И.Н. Компанец

# Н.Г. БАСОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ В ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА (ФИАН)

*К 100-летию со дня рождения академика Н.Г. Басова*
*и 60-летию образования Лаборатории - Отделения*
*квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова*
*в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН*

# Н.Г. БАСОВ
# И ИССЛЕДОВАНИЯ
# ПО КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ
# В ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ
# им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА (ФИАН)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга посвящена 100-летию со дня рождения гениального русского учёного Нобелевского лауреата академика Николая Геннадиевича Басова и 60-летней деятельности Лаборатории (затем Отделения) квантовой радиофизики, основанной им в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) в Москве. Выполненные здесь исследования по квантовой радиофизике привели к созданию мазеров и лазеров и открыли новую – «лазерную» эру, причём не только в развитии науки и техники, но и в повседневной жизни людей.

Эта книга – летопись цепочки событий, связывающих Н.Г. Басова с сотрудниками Лаборатории (Отделения) и Института и с их исследованиями, которые инициированы им и проводятся вот уже в течение более семидесяти лет его соратниками, учениками и учениками учеников. Сотрудники Отделения квантовой радиофизики ФИАН, продолжают активно обогащать науку новыми идеями и практическими результатами исследований, в то же время бережно относясь к научному наследству этого Великого Человека.

Работая в коллективе Лаборатории (Отделения) квантовой радиофизики с 1967 г., в том числе аспирантом Николая Геннадиевича, инженером, научным работником, руководителем подразделения и даже секретарём партийной организации, я в достаточной мере знал и понимал стоящие перед Учителем и коллективом задачи и решаемые проблемы и, опираясь на помощь коллег и архивные материалы, постарался обобщить виденное и пережитое в этой книге.

Я премного благодарен многим коллегам (персонально указаны ниже), предоставившим для книги свои материалы, включая тексты и фотографии. Особая благодарность А.В. Виноградову, И.Г. Зубареву, А.А. Ионину, С.П. Котовой, А.В. Масалову и А.А. Рупасову за полезные советы, обсуждения и коррекцию текстов, а В.А. Сауткину и А.Е. Дракину за сохранение архивных материалов и помощь в их использовании. И я очень признателен руководству Отделения КРФ в лице профессора Ионина А.А. и руководству ФИАН в лице члена-корреспондента РАН Колачевского Н.Н. за поддержку настоящей работы.

Составитель, редактор и автор Компанец И.Н.

**ВНЕСЛИ ВКЛАД В ПОДГОТОВКУ ТЕКСТОВ И ФОТО:**

Азязов В.Н.
Андреева Т.Л.
Артюков И.А.
Афримович В.Б.
Басова К.Т.
Безотосный В.В.
Беликова Т.П.
Березанская В.М
Березин П.Д.
Богатов А.П.
Борисенко Н.Г.
Быченков В.Ю.
Величанский В.Л.
Виноградов А.В.
Гончарова Н.Я.
Грасюк А.З.
Губин М.А.
Гуськов С.Ю.
Дракин А.Е.
Завестовская И.Н.
Засавицкий И.И.
Зубарев И.Г.
Ионин А.А.
Казакевич В.С.
Канавин А.П.
Ковалёв В.И.
Козловский В.И.
Конященко А.В.
Котова С.П.
Кривохижа С.В.
Крохин О.Н.
Крюков П.Г.
Кудрявцев Е.М.
Кудряшов С.И.
Куприянов Н.Л.
Куприянова Н.Г
Лескова Н.Л.
Лукичёв М.А.
Любченко Е.А.
Майорова А.М.
Масалов А.В.
Михеев П.А.
Молевич Н.Е.
Насибов А.С.
Наумов А.В.
Никулин В.Я.
Орлов Е.П.
Очкин В.Н.
Петров А.Л.
Петухов В.А.
Пожидаев Е.П.
Полухина Н.Г.
Попов Ю.М.
Путилин А.Н.
Рупасов А.А
Саакян А.Т.
Сауткин В.А.
Селезнёв Л.В.
Сенатский Ю.В.
Склизков Г.В.
Сметанин И.В.
Сорока И.В.
Сорокин В.Н.
Стародуб А.Н.
Фридман С.А.
Фроня А.А.
Чижикова З.А.
Шаульская Н.М.
Юрышев Н.Н.
Яшин И.И.
Яловой В.И.
Яресько С.И.

## ОГЛАВЛЕНИЕ


| | | Стр. |
|---|---|---|
| **ПРЕДИСЛОВИЕ** | | 2 |
| **ВНЕСЛИ ВКЛАД В ПОДГОТОВКУ ТЕКСТОВ И ФОТО** | | 3 |
| **ОГЛАВЛЕНИЕ** | | 4 |
| **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ** | | 7 |
| **1 ИСТОКИ** | | 9 |
| 1.1 | История и достижения ФИАН, нобелевские лауреаты | 9 |
| 1.2 | Начало работ по квантовой радиофизике в ФИАН, создание мазеров и лазеров | 16 |
| 1.3 | Образование лаборатории КРФ и выбор научных направлений | 24 |
| 1.4 | Многогранная роль Н.Г. Басова | 44 |
| 1.4.1 | Н.Г. Басов – инициатор и руководитель работ по КРФ в стране | 44 |
| 1.4.2 | Научно-организационная и общественная деятельность | 46 |
| 1.4.3 | МИФИ и подготовка кадров | 52 |
| 1.4.4 | Несколько штрихов к портрету гения | 58 |
| **2 РАЗВИТИЕ И ДОСТИЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ (ОТДЕЛЕНИЯ) КРФ в 70–90 -е годы** | | 61 |
| 2.1 | Введение | 61 |
| 2.2 | Лазерные исследования в Отделе КРФ | 63 |
| 2.2.1 | Сектор теоретической радиофизики (СТРФ) | 63 |
| 2.2.2 | Лаборатория газовых лазеров (ЛГЛ) | 72 |
| 2.2.3 | Лаборатория нелинейно-оптических явлений (ЛНОЯ) | 81 |
| 2.2.4 | Лаборатория фотохимических процессов (ЛФП) | 84 |
| 2.2.5 | Лаборатория химических лазеров (ЛХЛ) | 87 |
| 2.2.6 | Лаборатория применения лазеров (ЛПЛ) | 91 |
| 2.2.7 | Лаборатория стандартов частоты (ЛСЧ) | 94 |
| 2.2.8 | Лаборатория фотоники молекул (ЛФМ) | 99 |
| 2.2.9 | Лаборатория лазерной хирургии (ЛЛХ) | 102 |
| 2.2.10 | Крымская научная станция (КНС) ФИАН | 104 |
| 2.3 | Исследования по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) в Отделе ЛТС | 105 |
| 2.3.1 | Лаборатория лазерной плазмы (ЛЛП) | 107 |
| 2.3.2 | Лаборатория диагностики плазмы (ЛДП) | 117 |
| 2.3.3 | Лаборатория лазеров для термоядерного синтеза (ЛЛТС) | 119 |
| 2.3.4 | Сектор теории лазерной плазмы (СТЛП) | 121 |
| 2.3.5 | Сектор теории взаимодействия излучения с веществом (СТВИВ) | 126 |
| 2.4 | Исследования по оптоэлектронике (ОЭ) в Отделе ОЭ | 127 |
| 2.4.1 | Лаборатория инжекционных лазеров (ЛИЛ) | 128 |
| 2.4.2 | Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (ЛПЛЭН) | 132 |
| 2.4.3 | Лаборатория оптоэлектронных процессоров (ЛОЭП) | 137 |
| 2.4.4 | Лаборатория сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации (ЛСООИ) | 143 |
| 2.4.5 | Сектор регистрирующих сред (СРС) | 147 |

3 **РАЗВИТИЕ И ДОСТИЖЕНИЯ ОТДЕЛЕНИЯ КРФ В XX1 ВЕКЕ** 148
3.1 Введение 148
3.2 Лазерные исследования в Отделе КРФ 151
3.2.1 Сектор теоретической радиофизики (СТРФ) 151
3.2.2 Лаборатория газовых лазеров (ЛГЛ) 160
3.2.3 Лаборатория нелинейно-оптических явлений (ЛНОЯ) 171
3.2.4 Лаборатория фотохимических процессов (ЛФП) 180
3.2.5 Лаборатория химических лазеров (ЛХЛ) 185
3.2.6 Лаборатория применения лазеров (ЛПЛ) 195
3.2.7 Лаборатория стандартов частоты (ЛСЧ) 198
3.2.8 Лаборатория фотоники молекул (ЛФМ) 207
3.2.9 Лаборатория лазерной хирургии (ЛЛХ) 210
3.2.10 Лаборатория рентгеновской оптики (ЛРО) 213
3.2.11 Лаборатория инновационных лазерных систем (ЛИЛС) 218
3.3 Исследования в Центре лазерных и нелинейно-оптических технологий 220
3.3.1 Лаборатория газовых лазеров (ЛГЛ) 220
3.3.2 Лаборатория фемтосекундной нелинейной оптики (ЛФНО) 224
3.3.3 Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины (ЛЛНБ) 227
3.4 Исследования по лазерной плазме и ЛТС 228
3.4.1 Лаборатория лазерной плазмы (ЛЛП) 229
3.4.2 Лаборатория лазеров для термоядерного синтеза (ЛЛТС) 231
3.4.3 Лаборатория диагностики плазмы (ЛДП) 234
3.4.4 Лаборатория воздействия лазерного излучения (ЛВЛИ) 244
3.4.5 Сектор теории лазерной плазмы (СТЛП) 248
3.4.6 Сектор лазерно-плазменной физики высоких энергий (СЛПФВЭ) 258
3.4.7 Сектор теории взаимодействия излучения с веществом (СТВИВ) 266
3.5 Исследования по оптоэлектронике 271
3.5.1 Лаборатория инжекционных лазеров (ЛИЛ) 271
3.5.2 Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (ЛПЛЭН) 277
3.5.3 Лаборатория оптоэлектронных процессоров (ЛОЭП) 281
3.5.4 Лаборатория сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации (ЛСООИ) 293
**4 РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО КРФ В ДРУГИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ ФИАН** 301
4.1 Участие лабораторий Отделения оптики в лазерных исследованиях 301
4.1.1 Создание первого в СССР рубинового лазера 301
4.1.2 Создание фотодиссоционного лазера 303
4.1.3 Реализация и исследование режима самосинхронизация мод 306
4.1.4 Саморазогревной газовый лазер на парах меди 307
4.1.5 Метод внутрирезонаторной лазерной спектроскопии 310
4.1.6 Мощный газовый лазер на двуокиси углерода 311
4.1.7 Газодинамический $CO_2$ лазер 314
4.2 Участие лабораторий Отделения ФТТ в лазерных исследованиях 316
4.2.1 Введение 316
4.2.2 Создание лазеров на узкозонных полупроводниках 318

4.2.3 Исследования и разработки Лаборатории полупроводниковых лазеров по технологиям изготовления, испытаний и применений мощных инжекционных лазеров и по созданию новых типов твердотельных лазеров с диодной накачкой 322
4.2.4 Исследования Лаборатория физики плотной плазмы (ЛФПП) 325
4.2.5 Исследования Лаборатории термоядерных мишеней (ЛТМ) 330
4.3 Лазерные исследования на Троицкой площадке 334
4.3.1 Структурные преобразования и направления лазерных исследований 334
4.3.2 Исследования Лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой 337
4.3.3 Разработки предприятия ООО «Авеста-Проект» в ТОП ФИАН 341
4.4 Лазерные исследования в Самарском (Куйбышевском) филиале ФИАН 344
4.4.1 Создание и становление филиала 344
4.4.2 Главные достижения в прошлом столетии 349
4.4.3 Достижения СФ ФИАН в современный период 350
4.4.4 Поддержка и успехи молодых учёных 356
**5 УЧАСТИЕ СОТРУДНИКОВ В ЖИЗНИ ЛКРФ – ОКРФ И ФИАН** 358
5.1 Научные семинары и публикации 358
5.1.1 Научные семинары 358
5.1.2 Публикации 359
5.1.3 Конференции 363
5.2 Научные конкурсы и гранты 366
5.2.1 Конкурс научных работ ОКРФ на премию им. Н.Г. Басова 366
5.2.2 УНК и конкурс молодёжных научных работ ФИАН на премию им. Н.Г. Басова 370
5.2.3 Конкурс научных работ на премию Физического института 372
5.2.4 Конкурсы на получение грантов 373
5.3 Учёные, диссертационные, экспертные советы; научно-педагогическая деятельность; пропаганда знаний 374
5.3.1 Учёные, диссертационные и экспертные советы 374
5.3.2 Научно-педагогическая деятельность и пропаганда знаний 376
5.4 Научное и техническое сотрудничество 378
5.4.1 Сотрудничество в рамках ФИАН и страны 378
5.4.2 Международное сотрудничество 379
5.4 Работа общественных организаций в советский период 382
**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 393
**ПРИЛОЖЕНИЕ 1.** Сотрудники Лаборатории (Отделения) КРФ и специалисты тесно сотрудничавших с нею организаций, защитившие до 2022 г. докторские диссертации по тематике КРФ 395
**ПРИЛОЖЕНИЕ 2.** Премии, медали и почетные звания сотрудников Лаборатории (Отделения) квантовой радиофизики за научные достижения в области науки и техники 496
**ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ** 400

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКЦ – Астрокосмический центр
ВАК – Высшая аттестационная комиссия
ВКР – Вынужденное комбинационное рассеяние
ВНИИТФ – Всероссийский НИИ технической физики
ВНИИФТРИ – Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений
ВНИИЭФ – Всероссийский НИИ экспериментальной физики
ВРМБ – Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна
ВУФ – вакуумный ультрафиолет
ВШФ – Высшая школа физиков
ГДЛ – Газодинамический лазер
ГИАП – НИИ азотной промышленности
ГОИ – Государственный оптический институт
ЖК – Жидкий кристалл, жидкокристаллический
ЖЭТФ – Журнал экспериментальной т теоретической физики
ИК – Инфракрасный
ИКАН – Институт кристаллографии РАН
ИНТАС (сокр. от англ.) – Международная ассоциация по содействию сотрудничеству с учёными независимых государств бывшего Советского Союза
ИСАН – Институт спектроскопии РАН
ИСЗ – Искусственный спутник Земли
ИОФАН, ИОФ РАН – Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
ИПФ РАН – Институт прикладной физики РАН
ИТС – Инерциальный термоядерный синтез
КНС – Крымская научная станция
КПН – Когерентное пленение населенности
КПСС – Коммунистическая партия Советского Союза
КРФ – Квантовая радиофизика
КЧП – Комплекс чистых помещений
ЛД – Лазерный диод
ЛВЛИ –Лаборатория воздействия лазерного излучения
ЛГЛ – Лаборатория газовых лазеров
ЛДП – Лаборатория диагностики плазмы
ЛИВТ – Ленинградский институт водного транспорта
ЛИЛ – Лаборатория инжекционных лазеров
ЛИЛС – Лаборатория инновационных лазерных систем
ЛИПАН – Лаборатория измерительных приборов АН СССР (Лаборатория №2)
ЛК – Лаборатория колебаний
ЛКРФ – Лаборатория квантовой радиофизики
ЛЛКЛН – Лаборатория лазеров с катодно-лучевой накачкой
ЛЛНБ – Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины
ЛЛП – Лаборатория лазерной плазмы
ЛЛТС – Лаборатория лазеров для термоядерного синтеза
ЛЛХ – Лаборатория лазерной хирургии

ЛНОЯ – Лаборатория нелинейно-оптических явлений
ЛПЛ – Лаборатория применения лазеров
ЛПЛЭН – Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой
ЛОНТП – Лаборатория оптики низкотемпературной плазмы
ЛОЭП – Лаборатория оптоэлектронных процессоров
ЛРО – Лаборатория рентгеновской оптики
ЛСООИ – Лаборатория сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации
ЛСЧ – Лаборатория стандартов частоты
ЛТМ – Лаборатория термоядерных мишеней
ЛТС – Лазерный термоядерный синтез
ЛФМ – Лаборатория фотоники молекул
ЛФНО – Лаборатория фемтосекундной нелинейной оптики
ЛФП – Лаборатории физики полупроводников
ЛФПП – Лаборатория физики плотной плазмы
ЛФП – Лаборатория фотохимических процессов
ЛХЛ – Лаборатория химических лазеров
ЛЭЛТ – Лазерная электронно-лучевая трубка
МЗЛ – Многозначная логика
МИФИ – Московский инженерно-физический институт
МЛД – Матрица лазерных диодов
МЛЦ – Международный лазерный центр
НЖК – Нематический жидкий кристалл
НФО – Нейтронно-физический отдел
ОКБ – Особое конструкторское бюро
ОКРФ – Отделение квантовой радиофизики
ООО – Общество с ограниченной ответственностью
ООЭ – Отдел оптоэлектроники
ОТПМ – Отдел технологии полупроводниковых материалов
ОФТТ – Отделение физики твёрдого тела
ОЭ – Оптоэлектроника
ПДЛ – Полупроводниковый дисковый лазер
ПЛП – Прямой лазерный перенос (вещества)
ПМС – Пространственный модулятор света
РАН – Российская академия наук
РИИС – Редакционно-издательская и информационная служба
РФЯЦ – Российский Федеральный ядерный центр
СЖК – Сегнетоэлектрический жидкий кристалл
СЛПФВЭ – Сектор лазерно-плазменной физики высоких энергий
СТВИВ – Сектор теории взаимодействия излучения с веществом
СТЛП – Сектор теории лазерной плазмы
СТРФ – Сектор теоретической радиофизики
СФ – Самарский филиал
ТЛДН – Твердотельный лазер с диодной накачкой
ТОП – Троицкое обособленное подразделение
ФАНО – Федеральное Агентство науки и образования
ФИАН – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
ЦФПИ – Центр фундаментальных и прикладных исследований

# Глава 1. ИСТОКИ

## 1.1 История и достижения Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН)

Физический институт им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН) – старейший научно-исследовательский центр России, корни основания которого прослеживаются от Кунсткамеры, созданной Петром I в С.-Петербурге в 1714 г. (Рис 1.1). Находившиеся в ней физические приборы, машины и инструменты образовали материальную базу Физического кабинета, открытого Петром I в 1724 г. Этот год принято считать и годом учреждения Российской (вначале С. Петербургской) академии наук. Организованные ею первые курсы физики как самостоятельной науки читались в Физическом кабинете. А в середине 18-го века Физический кабинет уже стал центром физических исследований в России [1].

Рис. 1.1. История ФИАН

Первый директор Физического кабинета Г.-Б. Бильфингер проявил себя в С.-Петербургской Академии разносторонним физиком-экспериментатором. Членами Академии в разное время были знаменитый математик и физик-гидродинамик Даниил Бернулли и выдающийся математик Леонард Эйлер. Большой вклад в развитие физической науки, Физического кабинета и Академии внесли её директора Г.-В. Крафт, Г.-В. Рихман, Ф.-У.Т. Эпинус, В.В. Петров, Г.Ф. Паррот, Г.-

Ф.-Э. Ленц, М.-Г. Якоби, Г.И. Вильд. Б.Б. Голицын. В 1912 г. Физический кабинет был преобразован в Физическую лабораторию. Последним её директором был физик П.П. Лазарев. В 1921 г. Академия наук СССР приняла решение об объединении Физической лаборатории с Математическим кабинетом Академии наук в единый Физико-математический институт. Его первым директором стал известный математик В.А. Стеклов, а затем институтом руководили не менее известные физик А.Ф. Иоффе, математик, механик и кораблестроитель А.Н. Крылов и математик И.М. Виноградов [2].

В 1932 г. руководителем Физического отдела Физико-математического института стал академик С.И. Вавилов. С его назначением исследовательские работы активизировались, в коллектив пришёл целый ряд признанных ученых-физиков, было получено новое оборудование, начали функционировать разнообразные научные семинары. В эти годы было сделано открытие «излучения Вавилова-Черенкова», авторы которого после теоретического объяснения в 1958 г. удостоены Нобелевской премии.

28 апреля 1934 г. общее собрание Академии наук СССР приняло постановление о разделении Физико-математического института на два института – Математический и Физический, и эта дата считается официальной датой создания ФИАН [2, 3]. Директором его был назначен С.И. Вавилов. Летом 1934 г. оба института вместе с Академией наук переехали в Москву в здание на 3-й Миусской улице, построенное ещё в 1912 году на пожертвования для лаборатории профессора МГУ Лебедева П.Н. 18 декабря 1934 г. Физическому институту было присвоено имя Петра Николаевича Лебедева – выдающегося физика-экспериментатора, впервые измерившего давление света.

С.И. Вавилов, будучи сам специалистом в области физической оптики, смог создать полифизичный институт, в котором развиваются все основные направления современной физики и обе части фундаментальной физической науки – теория и эксперимент. Подтверждением этого является перечень сформировавшихся в ФИАН лабораторий:

- Лаборатория атомного ядра, возглавляемая Д.В. Скобельцыным – будущим преемником С.И. Вавилова на посту директора ФИАН (с 1951 по 1972 г.),
- Лаборатория физики колебаний во главе с Н.Д. Папалекси,
- Лаборатория физической оптики под руководством Г.С. Ландсберга,
- Лаборатория люминесценции во главе с С.И. Вавиловым,
- Лаборатория спектрального анализа под руководством С.Л. Мандельштама, составившая в будущем ядро института Спектроскопии АН СССР,
- Лаборатория физики диэлектриков, возглавляемая Б.М. Вулом,
- Лаборатория теоретической физики во главе с И.Е. Таммом,
- Лаборатория акустики под руководством А.А. Андреева, составившая в будущем ядро Института акустики АН СССР.

В годы Великой Отечественной войны сотрудники ФИАН воевали на фронте и трудились в эвакуации в Казани, где научные исследования не прекращались, но

были переориентированы на военно-прикладные и своими результатами приближали победу. Возвращение в Москву началось осенью 1943 г. [4].

В конце войны и сразу после неё активно развивалась инициированная В.И. Векслером ускорительная тематика, были последовательно введены в строй электронные синхротроны и протонный ускоритель, начались исследования фотоядерных и фотомезонных процессов. В связи с Советским атомным проектом для изучения космических лучей в 1946–1947 гг. были созданы высокогорные научные станции ФИАН на Памире и на Тянь-Шане, а для их высотного (аэростатного) мониторинга под Москвой в 1946 г. была основана Долгопрудненская научная станция. В 1948 г. основана Крымская научная станция (КНС) в п. Кацивели, которая стала одной из мощнейших наблюдательных радиоастрономических станций в мире и прославилась открытием В.В. Виткевичем в 1956 г. сверхкороны Солнца. В начале 1950-х годов сотрудники теоретического отдела ФИАН И.Е. Тамм, А.Д. Сахаров, В.Л. Гинзбург, В.И. Ритус и Ю.А. Романов внесли большой вклад в разработку гаранта мира – термоядерного оружия.

В 1945 г. директор ФИАН академик Вавилов С.И. был избран Президентом Академии наук СССР, Обе должности он совмещал вплоть до своей кончины в январе 1951 г. Директором Института был назначен академик Дмитрий Владимирович Скобельцын, внёсший значительный вклад в физику атомного ядра и космических лучей. В этом же году ФИАН переехал в новое здание и космических лучей. В этом же году ФИАН переехал в новое здание (показано на обложке) – д. 53 на Ленинском проспекте, в котором располагается и поныне. – д. 53 на Ленинском проспекте, в котором располагается и поныне.

Дальнейший сорокалетний советский период стал наиболее успешным в истории ФИАН [5]. Во-первых, в этот период сотрудникам были присуждены две Нобелевские премии по физике (Рис 1.2). В 1958 г. за открытие и истолкование уже упомянутого «излучения Вавилова – Черенкова» премию получили П.А. Черенков, И.Е. Тамм и И.М. Франк. В 1964 г. за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей на лазерно-мазерном принципе, премия вручена Н.Г. Басову и А.М. Прохорову (наряду с Ч. Таунсом из США). В 1976 г. была присуждена и третья Нобелевская премия, но не по физике, а «Премия мира», которую вручили сотруднику ФИАН А.Д. Сахарову, создателю термоядерной бомбы и трижды Герою социалистического труда, проявившему себя страстным борцом за мир. В этот же период был выполнен цикл работ по теории сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей, за что в 2003 г. Нобелевская премия по физике была присуждена В.Л. Гинзбургу (вместе с А.А. Абрикосовым и Э. Лаггеттом).

К другим важным работам второй половины XX-го века, отмеченным Ленинской и Государственной премиями и др. почётными наградами, например, относятся [5]: теория мюонного катализа (автор Франк И.М.), построение теории фоторождения мезонов и кумулятивный эффект при столкновении релятивистских

ядер (Балдин А.М.), открытие и исследование внешней зоны радиационного пояса Земли (Вернов С.Н.), эффект Франца-Келдыша при поглощении света полупроводником в электрическом поле (Келдыш Л.В.), запуск первых советских спутников для исследования Солнца «Космос-166» и Космос-230», исследования ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца в рамках программы «Интеркосмос» (Мандельштам С.Н., Житник И.А.), эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина – теоретический верхний предел энергии космических лучей от отдалённых источников (Зацепин Г.Т.), идея суперсимметрии как принцип построения теории элементарных частиц (Гольфанд Ю.А., Лихтман Е.П.), симметрия Бекки-Руэ- Стора-Тютина (Тютин И.В.), инфляционная теория возникновения Вселенной (Линде А.Д.), пробой на убегающих электронах (Гуревич А.В.), создание солнечных телескопов ТЕРЕК для межпланетной станции «ФОБОС-2» (Житник И.А., Кузин С.В., Перцов А.А., Слемзин В.А.).

Рис. 1.2. Нобелевские лауреаты – сотрудники ФИАН
Слева направо: в верхнем ряду – Е.И. Тамм, И.М. Франк, П.А. Черенков,
в нижнем ряду – Н.Г. Басов, А.М. Прохоров, А.Д. Сахаров, В.Л. Гинзбург

Здесь не указаны достижения в области квантовой электроники – в то время нового и наиболее быстро развивающегося направления физических исследований, основанного на принципах квантовой радиофизики и связанного с именами его основоположников – А.М. Прохорова и Н.Г. Басова, поскольку эти достижения будут подробно рассмотрены в последующих трёх разделах. Но безусловно с их учётом во второй половине XX-го века ФИАН выдвинулся в передовой центр физической науки СССР и превратился во всемирно известный крупный полифизичный научный центр.

В становлении именно такого ФИАНа нельзя переоценить и научно-организационную роль самих нобелевских лауреатов. В 1958 г.

тридцатипятилетний доктор физико-математических наук Н.Г. Басов был назначен заместителем директора ФИАН. Проработав в этой должности до 1973 г., он сменил академика Д. В. Скобельцына на посту директора и руководил Институтом по 1988 г.  С 1967 по 1991 г. являлся также членом Президиума Академий наук СССР и РАН. Дважды (в 1969 и 1982 г.) удостоен звания Героя Социалистического Труда, член Московского горкома КПСС (1974 – 1981 гг.), депутат Верховного совета СССР (1974 – 1989 гг.). А.М. Прохоров являлся заместителем директора ФИАН с 1968 г., а в 1982 г. стал директором Института общей физики (ИОФ РАН), образованного на базе возглавляемого им Отделения ФИАН. В течение двадцати лет (1973 – 1993 гг.) являлся академиком-секретарём Отделения общей физики и астрономии и был членом Президиума Академий наук СССР и РАН. Дважды Герой Социалистического Труда (1969 и 1986 гг.).

Кроме уже названных четырёх научных станций, в период директорства Н.Г. Басова в состав Института вошли: Особое конструкторское бюро (ОКБ ФИАН), созданное в 1963 г. в подмосковном г. Троицке для обеспечения исследовательских работ ФИАН, и филиал в г. Самаре (бывшем Куйбышеве), организованный в 1980 г. с целью создания и внедрения в промышленность новых лазерных систем и технологий. Общая численность сотрудников ФИАН до выхода из него в 1982 г. Отделения «А» во главе с А.М. Прохоровым составляла около 4,5 тысяч. К этому времени в ФИАН работали: 6 лауреатов нобелевской премии, 9 героев социалистического труда, 29 лауреатов Ленинской премии, 156 лауреатов Государственной премии СССР, 35 лауреатов премии Ленинского комсомола, 46 лауреатов различных международных премий и 46 ученых, удостоенных именных премий и золотых медалей Академии наук СССР. В знак высочайшего признания заслуг перед государством Институт в 1967 г. был награждён орденом Ленина, а в год своего пятидесятилетия (1984 г.) – орденом Октябрьской Революции.

Позднее, в 1990 г. в структуре Института появился Астрокосмический центр (АКЦ), образованный после перевода в ФИАН отдела космических радиотелескопов из Института космических исследований АН СССР, а также Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН. В 1995 г. появился Физико-технический центр ФИАН в г. Протвино с комплексом протонной лучевой терапии. Однако, время от времени происходил и обратный процесс. Например, часть сотрудников ФИАН в 1951 г. перешла в Дубну в будущий Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), а в 1953 г. из ФИАН выделилась Акустическая лаборатория с образованием Акустического института АН СССР. В 1968 г. часть сотрудников во главе с С.Л. Мандельштамом образовали новый Институт спектроскопии АН СССР в г. Троицке Московской области, а в 1970 г. часть сотрудников перешла во вновь созданный Институт ядерных исследований АН СССР в Москве. Наконец, в 1982 г. на базе Отделения ФИАН был образован Институт общей физики (ИОФ РАН), носящий теперь имя А.М. Прохорова.

В девяностые годы – годы «перестройки» вследствие недофинансирования Российской академии наук и её институтов многие сотрудники ФИАН, особенно

молодые и/или с детьми, покинули институт, «уйдя в бизнес» или уехав за границу. Численность института сократилась до 1000 сотрудников, помещения института еле отапливались, зарплата выдавалась нерегулярно, защиты диссертаций стали редким явлением. В эти самые трудные для мирного времени годы, годы перехода страны к рыночной экономике и дефолта 1998 г., доля руководить Институтом выпала академику Л.В. Келдышу (с 1989 по 1994 г.) – признанному авторитету в области физики твёрдого тела, и академику О.Н. Крохину (1994-2004 гг.) – ученику Н.Г. Басова и признанному авторитету в области физики лазеров и плазмы.

После «миллениума» ситуация стабилизировалась, несколько улучшилось финансирование, штат сотрудников постепенно увеличился до полутора тысяч, но сказывались отсталость промышленности, особенно высокотехнологичной, банкротство отраслевых институтов, «утечка» научных кадров за границу и, как следствие, невостребованность результатов науки в России, тем более фундаментальной. В этих условиях с 2004 по 2015 г. пришлось быть директором академику Г.А. Месяцу. Начались нападки на Академию наук РАН и попытки её реформировать или даже заменить. В итоге Академию наук подчинили «придуманному» Федеральному Агентству науки и образования (ФАНО), но через несколько лет уже Министерству образования и науки, а затем другому - новому Министерству науки и высшего образования.

В таких меняющихся условиях с 2015 г. по настоящее время руководит Институтом профессор, член-корреспондент РАН Колачевский Н.Н. Позитивными моментами в последние годы стало повышение зарплаты научных сотрудников, особенно публикующих научные работы в высокорейтинговых зарубежных журналах, выделение финансирования на обновление явно устаревшей приборной базы, стимулирование молодёжи для работы в науке в рамках создания новых научных групп и лабораторий, но все эти меры всё же явно недостаточны.

Несмотря на потери, связанные с реформированием государства и его науки, и на продолжающееся её недофинансирование, сотрудники ФИАН в течение последних двух десятилетий не ослабляли усилий и добились новых замечательных результатов [6]. Например, по инициативе В.Л. Гинзбурга теперь создан Центр высокотемпературной сверхпроводимости и сверхпроводящих наноструктур, оснащённый по последнему слову техники. В лаборатории рентгеновской астрономии Солнца в 2001–2005 гг. успешно выполнен цикл работ по исследованию активных процессов на Солнце, отмеченный в 2008 г. Премией Правительства РФ. Для продолжения исследований Солнца в феврале 2009 г. запущен и работает спутник КОРОНАС-ФОТОН с аппаратурой «ТЕСИС». ФИАН выполнил эксперимент ATLAS – один из двух самых крупных в ЦЕРН на большом адронном коллайдере (LHC), причём для него был создан трековый детектор переходного излучения, содержащий 370 тысяч каналов информации о параметрах частиц, рождающихся в протон-протонных соударениях. В Физико-техническом центре в Протвино создана эффективная ускорительная установка для радиационной терапии онкологических заболеваний. Ещё одна созданная в ФИАН

оригинальная медицинская разработка – сверхпроводящий магнитно-резонансный томограф с магнитной индукцией в рабочей зоне 1,5 Тесла. В АКЦ ФИАН разработаны и выполняют космическую миссию проекты «Миллиметрон» и «Радиоастрон», причём последний имеет беспрецедентно высокое разрешение – до миллионных долей угловой секунды. Троицкое обособленное подразделение (ТОП), выросшее из ОКБ ФИАН и включающее теперь «Троицкий технопарк ФИАН», успешно работает в сфере высоких технологий, главным образом, используя разработки ФИАН.

В настоящее время в штате ФИАН, включая филиалы Института, числится около 1600 человек, из которых около половины – научные сотрудники, в том числе около 200 докторов и более 300 кандидатов наук. Ежегодно сотрудниками ФИАН публикуется около 1500 научных статей и докладов на конференциях.

Исследования проводятся в шести научных отделениях Института:

- Астрокосмический центр,
- Отделение квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова,
- Отделение оптики,
- Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма,
- Отделение физики твердого тела,
- Отделение ядерной физики и астрофизики,

а также в некоторых отделах – подразделениях при дирекции ФИАН и в филиалах.

Тематика научных исследований охватывает практически все направления современной физики:

- Теоретическая физика, включая квантовую теорию поля, квантовую статистику и теорию фундаментальных взаимодействий, нелинейную физику; физика высоких энергий, элементарных частиц, ядерная физика; биофизика;
- Физика ускорителей заряженных частиц; импульсная электроника большой мощности; физическая электроника;
- Классическая и квантовая оптика, люминесценция, рассеяние света; спектроскопия атомов и молекул; конденсированных сред, газов и плазмы; рентгеновская оптика;
- Квантовая радиофизика; взаимодействие лазерного излучения с веществом; нелинейная оптика; лазерная метрология; лазерные информационные технологии;
- Физика плазмы; управляемый термоядерный синтез; лазерный термоядерный синтез;
- Физика твердого тела; полупроводники; мезоскопика; твердотельные наноструктуры; нанотехнологии; оптоэлектроника; сверхпроводимость;
- Астрофизика, астрономия во всех диапазонах, космические лучи, космология (наземные и космические, экспериментальные и теоретические исследования); физика Солнца, атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли и планет; планетная и прикладная астрономия;

- Экспериментальная техника, новые физические методы в научных исследованиях, технологии, технике, медицине и экологии.

## 1.2 Начало работ по квантовой радиофизике в ФИАН, создание мазеров и лазеров

История начала работ по квантовой радиофизике (КРФ) в ФИАН неразрывно связана с Лабораторией колебаний (ЛК) ФИАН. Своими традициями и яркими научными открытиями она во многом обязана руководителям – академикам Н.Д. Папалекси (руководил с 1934 по 1947 гг.), М.А. Леонтовичу (с 1947 по 1954 гг.) и А.М. Прохорову (с 1954 по 1998 гг.), а также научному руководителю академику Л.И. Мандельштаму (с 1934 по 1944 гг.). Непосредственными основателями нового направления явились Александр Михайлович Прохоров и Николай Геннадиевич Басов, жизненные пути которых сошлись в ЛК (Рис. 1.3).

Рис. 1.3. Николай Геннадиевич Басов и Александр Михайлович Прохоров (1950-е годы)

**А.М. Прохоров** родился 11 июля 1916 года в Атертоне, в Австралии, где его родители – профессиональные революционеры оказались после побега в 1911 году из сибирской ссылки [7]. В 1923 году Саша Прохоров с родителями возвратился в СССР, сначала в Оренбург (на родину матери), затем в Ташкент, потом в Ленинград. Там он окончил семилетку и рабфак. В 1934 году Александр Прохоров поступил в Ленинградский Государственный Университет на физический факультет и с отличием окончил его. Предложенному месту ассистента в университете Александр Михайлович предпочел аспирантуру в Москве, в Физическом Институте им. П.Н. Лебедева Академии наук, под руководством Л.И. Мандельштама.

В первых своих научных работах А.М. Прохоров исследовал распространение радиоволн вдоль земной поверхности и в ионосфере. Но вскоре началась Великая Отечественная война, и А.М. Прохоров добровольцем ушёл на фронт. Служил разведчиком сначала под Тулой, затем на Северо-Западном фронте. В марте 1942 года Александра Михайловича тяжело ранили, но после лечения он продолжил воевать на Западном фронте, потом на Северо-Западном. В феврале 1943 г. был ранен вторично и после долгого лечения демобилизован в 1944 г.

Возвратившись в Москву и ЛК ФИАН, А.М. Прохоров активно занялся разработкой методов стабилизации частоты радио-генераторов. Результаты этой работы легли в основу его кандидатской диссертации по теории нелинейных колебаний, защищённой в 1947 г. Затем А.М. Прохоров предложил новый режим генерации миллиметровых волн в синхротроне, установил их когерентный характер и по результатам исследования синхротронного излучения в циклических ускорителях электронов защитил в 1952 г. докторскую диссертацию. Продолжая работать в области синхротронного излучения, А.М. Прохоров, по предложению директора ФИАН академика Д. В. Скобельцына, начал цикл исследований по радиоспектроскопии молекул и затем логично перешёл к радиоспектроскопическим исследованиям кристаллов с помощью метода электронного парамагнитного резонанса.

**Н.Г. Басов** родился 14 декабря 1922 г. в г. Усмань Тамбовской губернии (теперь Липецкой области) в семье будущего профессора Воронежского университета [8]. Окончание школы совпало с началом Великой Отечественной войны, и в 1941 г. Н.Г. Басов был призван в армию и направлен в Куйбышевскую военно-медицинскую академию. В 1942 г. был переведен в Киевское военно-медицинское училище, дислоцирующееся в Свердловске, которое окончил в 1943 г., получив квалификацию фельдшера, с присвоением звания лейтенанта медицинской службы. Был направлен в батальон химической защиты и до конца войны находился в рядах действующей армии на 1-ом Украинском фронте.

В 1946 г. Н.Г. Басов поступил в Московский механический институт (с 1953 г. Московский инженерно-физический институт – МИФИ) и, ещё будучи студентом, начал в 1949 г. работать лаборантом в ЛК ФИАН, которую возглавлял академик М.А. Леонтович, в группе молодых физиков под руководством А.М. Прохорова. После получения диплома в 1950 г. Н.Г. Басов поступил в аспирантуру ММИ-МИФИ на кафедру теоретической физики, продолжая работу в ФИАН под научным руководством М.А. Леонтовича (одновременно заведующего кафедрой ММИ и Лабораторией колебаний ФИАН). После перехода в 1954 г. М.А. Леонтовича в ЛИПАН к Курчатову И.В. руководителем Лаборатории колебаний стал д.ф.-м.н. А.М. Прохоров. Первые работы Н.Г. Басова были связаны с исследованием магнитных моментов ядер радиоспектроскопическими методами, и по этой теме он защитил в 1953 г. кандидатскую диссертацию.

Плодотворное **сотрудничество Н.Г. Басова и А.М. Прохорова** в Лаборатории колебаний в эти годы привело к основополагающим работам в

области квантовой радиофизики. Уже в 1952 г. они вместе подготовили и в январе 1953 г. сделали доклад на всесоюзном совещании по магнитным моментам ядер (стенограмма доклада сохранилась в архивах РАН), в котором были впервые изложены результаты теоретического анализа эффектов усиления и генерации электромагнитного излучения квантовыми системами и тем самым были сформулированы основные положения теории молекулярного квантового генератора на молекулах аммиака [8, 9]. Первая статья Н.Г. Басова и А.М. Прохорова на эту тему была послана в ЖЭТФ в январе 1954 г. и вышла в октябре. Аналогичная работа американского физика Ч. Таунса с сотрудниками была послана в печать в мае 1954 г. и опубликована в июльском номере журнала Physical Review. Этот год и считается годом создания принципиально новых малошумящих квантовых генераторов и усилителей радиочастотного диапазона – мазеров. В 1956 г. Басов Н.Г. защитил докторскую диссертацию на тему «Молекулярный генератор». (Рис. 1.4).

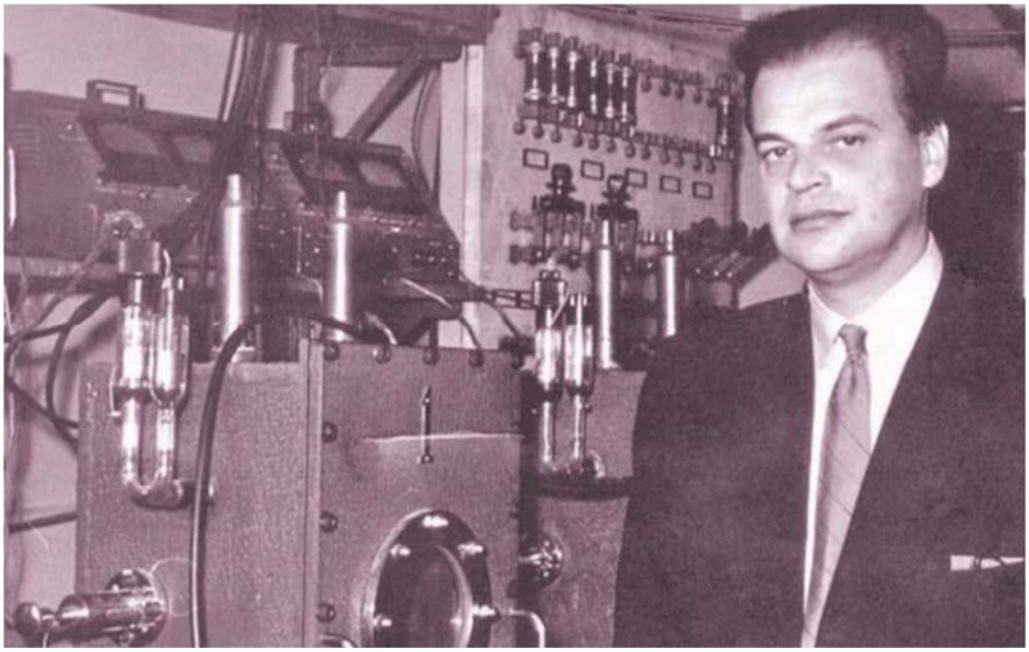


Рис. 1.4. Н.Г. Басов у экспериментальной установки первого молекулярного генератора (середина 50-х годов)

В 1955 г. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров предложили эффективный и универсальный метод получения инверсной заселенности – метод селективной накачки электромагнитным излучением так называемой "трехуровневой" системы, нашедший чрезвычайно широкое применение в квантовых генераторах. Суть метода, нашедшего чрезвычайно широкое применение в оптических квантовых генераторах, состоит в том, что на дополнительном третьем уровне можно накопить большое число возбуждённых частиц, испускающих кванты излучения при переходах на нижний (с минимальной энергией) уровень под действием аналогичного излучения других частиц, то есть вынужденно.

С этого времени Н.Г. Басов «загорелся» поиском путей создания лазеров – генераторов более коротковолнового (оптического) диапазона. В 1958 г. им совместно с Б.М. Вулом и Ю.М. Поповым в патентной заявке было предложено создавать лазерные источники излучения на основе полупроводников, возбуждаемых импульсным электрическим полем. Через полтора года Н.Г. Басов, О.Н. Крохин и Ю.М. Попов предложили их возбуждать через *p-n* переход. Наряду с этими идеями, учёными США предлагалось использовать в лазерах кристаллы рубина (Ч. Таунс, А. Шавлов) и газовые смеси (А. Джаван, В. Беннет).

Хотя понятие вынужденного (под действием внешнего) излучения было введено Альбертом Эйнштейном ещё сорок лет назад в 1917 г., но более 20 лет инверсное состояние квантовой системы вообще считалось неосуществимым, и только в докторской диссертации В.А. Фабриканта, защищённой в 1939 г. в ФИАНе, было указано на потенциальную возможность квантового усиления света (эти результаты практически остались незамеченными). Басов Н. Г. и Прохоров А.М. не только реализовали инверсную квантовую систему, но введя «обратную связь», получили генерацию и усиление вынужденного излучения, а также показали тождественность излучаемых фотонов вынуждающим и их когерентность (синфазность).

За открытие нового принципа генерации и усиления электромагнитного излучения на основе квантовых систем в 1959 г. Н.Г. Басову и А.М. Прохорову была присуждена Ленинская премия. Их исследования, а также работы, выполненные в США примерно в то же время Ч. Таунсом с сотрудниками, привели к рождению и бурному развитию новой области физики – квантовой электроники (лазерной физики). В 1964 г. за фундаментальные исследования в этой области, приведшие к созданию на мазерно-лазерном принципе генераторов и усилителей излучения, Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Ч.Х. Таунс стали лауреатами Нобелевской премии (Рис. 1.5 и Рис. 1.6). В дипломах о награждении изображён мальчик с источником световых лучей, показанный на обложке книги.

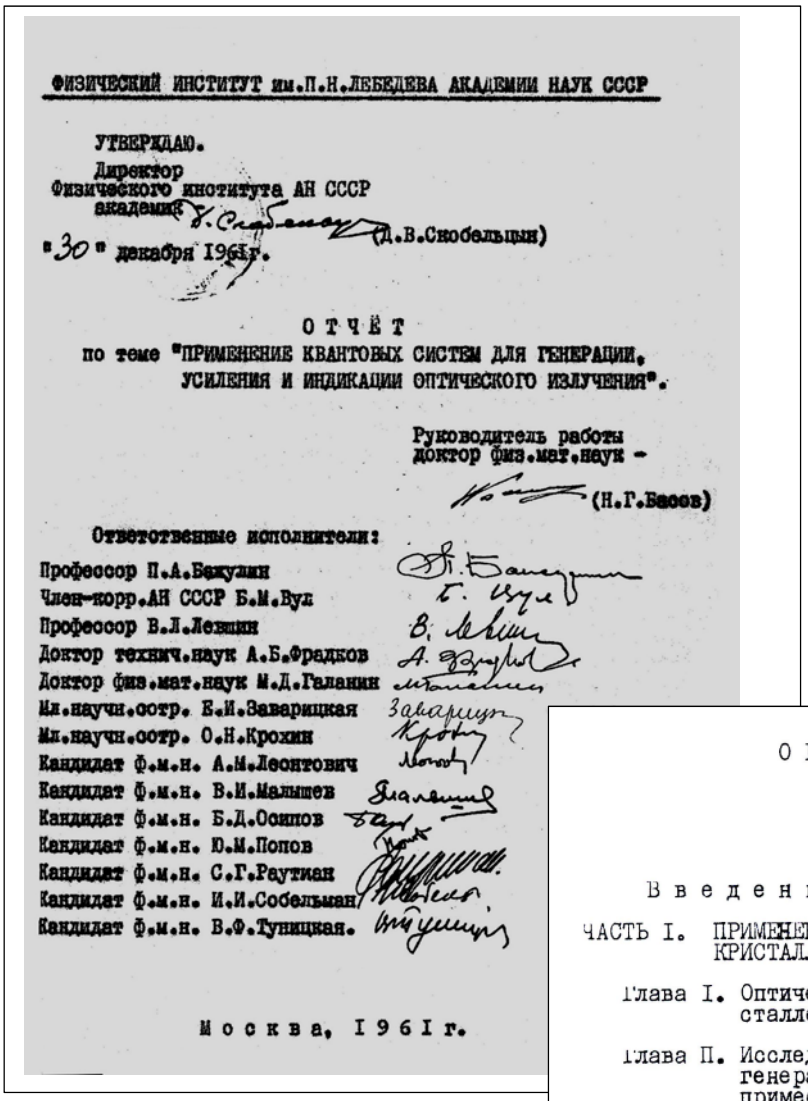
Директор ФИАН Д.В. Скобельцын способствовал выдвижению Н.Г. Басова и А.М. Прохорова на престижные награды и усилению работ по лазерной тематике. В 1958 г. Н.Г. Басов был назначен заместителем директора по научной работе. В 1959 г. под его руководством в составе Лаборатории колебаний был организован сектор молекулярных генераторов, а в 1963 г. сектор выделился в отдельную Лабораторию квантовой радиофизики. В 1960 году А.М. Прохорова был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, и в 1962 г. членом–корреспондентом был избран Н.Г. Басов. Действительными членами Академии наук СССР оба стали в 1966 г.

Предвидя скорую реализацию лазеров, Н.Г. Басов в 1958 г. организовал и стал руководителем первой в СССР научной программы по исследованию возможности генерации и усиления электромагнитного излучения в ИК и оптической области спектра. Программа проводилась в рамках АН СССР, причём только Физическим институтом, для чего Н.Г. Басов объединил в одном

коллективе сотрудников своего сектора из ЛК и нужных сотрудников других лабораторий ФИАН. На Рис. 1.7 представлен титульный лист отчёта ФИАН 1961 г. по этой программе и его оглавление. Параллельно пошла работа и по другой – «закрытой» программе с шифром «Фотон» (рассекречена), поскольку Н.Г. Басов не сомневался, что у будущих лазеров будут хорошие перспективы в системах двойного назначения. Напомним, что тогда ещё никаких лазеров не было и в помине! Обе работы существенно продвинули ФИАН к достижению цели.

Рис. 1.5. Нобелевские лауреаты (на переднем плане слева направо)
А.М. Прохоров, Н.Г. Басов и Ч. Таунс на семинаре в лаборатории КРФ, 1965 г.

Рис. 1.6. Нобелевская медаль Н.Г. Басова



ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им.П.Н.ЛЕБЕДЕВА АКАДЕМИИ НАУК СССР

УТВЕРЖДАЮ.
Директор
Физического института АН СССР
академик (Д.В.Скобельцын)
"30" декабря 1961 г.

О Т Ч Ё Т
по теме "ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ, УСИЛЕНИЯ И ИНДИКАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ".

Руководитель работы
доктор физ.мат.наук -
(Н.Г.Басов)

Ответственные исполнители:
Профессор П.А.Бажулин
Член-корр.АН СССР Б.М.Вул
Профессор В.Л.Левшин
Доктор технич.наук А.Б.Фрадков
Доктор физ.мат.наук М.Д.Галанин
Мл.научн.сотр. Е.И.Заварицкая
Мл.научн.сотр. О.Н.Крохин
Кандидат ф.м.н. А.М.Леонтович
Кандидат ф.м.н. В.И.Малышев
Кандидат ф.м.н. Б.Д.Осипов
Кандидат ф.м.н. Ю.М.Попов
Кандидат ф.м.н. С.Г.Раутиан
Кандидат ф.м.н. И.И.Собельман
Кандидат ф.м.н. В.Ф.Туницкая.

Москва, 1961 г.

а

О Г Л А В Л Е Н И Е


| | Стр. |
|---|---|
| Введение ..... | 4 |
| ЧАСТЬ I. ПРИМЕНЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КРИСТАЛЛОВ..... | 16 |
| Глава I. Оптический генератор на кристалле рубина ..... | 16 |
| Глава II. Исследование люминесценции и генерации кристаллов $CaF_2$ с примесью трехвалентных ионов урана ..... | 20 |
| ЧАСТЬ II. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ..... | 25 |
| Глава II.Исследование антимонида индия.. | 25 |
| ЧАСТЬ III. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ..... | 28 |
| Глава I. Оптический метод возбуждения газов ..... | 30 |
| § 1. Оптическое возбуждение паров цезия ..... | 30 |
| § 2. Сенсибилизированная флюоресценция паров натрия ..... | 31 |
| § 3. Фотодиссоциация молекул ..... | 33 |
| Глава II. Применение газового разряда.... | 36 |
| § 1. Использование резонансной передачи возбуждения в газовом разряде ..... | 36 |
| § 2. Пленение излучения в газовом разряде ..... | 39 |
| § 3. Работа по воспроизведению генератора на газовой смеси неона и гелия ..... | 40 |


б

Рис. 1.7. Титульный лист (а) и оглавление (б) открытого отчёта ФИАН 1961 г. по программе «Применение квантовых систем для генерации, усиления и индикации оптического излучения»

После успешного выполнения в ФИАН обеих программ в декабре 1962 г. было принято первое в СССР Постановление ЦК КПСС и СМ СССР по развитию лазерной техники. В выполнении Постановлений уже участвовали различные академические и ведомственные научно-исследовательские институты, а также некоторые производственные предприятия. Затем были и другие Постановления ЦК КПСС и СМ СССР, в том числе с другими головными исполнителями. В результате лазерные исследования распространились по многочисленным научным и промышленным центрам Советского Союза, но у истоков этого движения стоял Н.Г. Басов.

Работы по созданию мазеров и лазеров в период с 1957 до 1963 г. привлекли молодежь и сотрудников не только ФИАН, но и др. организаций в СССР. Началась конкуренция разных научных коллективов страны, причём с оглядкой на работы в США. В мае 1960 года американский физик Теодор Мейман запустил первый оптически возбуждаемый импульсный лазер на кристалле рубина, о чём было сообщено в журнале «Nature» в августе того же года. Начатые в конце 1960 г. работы в СССР привели к запуску в сентябре 1961 г. первого отечественного рубинового лазера (Рис. 1.8) сотрудниками Лаборатории люминесценции ФИАН Галаниным М.Д., Леонтовичем А.М. и Чижиковой З.А.

Рис. 1.8. Первый рубиновый лазер СССР, созданный в ФИАН

В том же 1961 году А. Джаван с коллегами в США запустили первый работающий в непрерывном режиме лазер на смеси газов гелия и неона, возбуждаемой постоянным электрическим разрядом. Аналогичный лазер был создан в ФИАН в 1962 г. Басовым Н.Г., Маркиным Е.П. и Машем Д.Ш.

В начале 60-х годов работы по мазерам и по их использованию ещё продолжались, поскольку они рассматривались как перспективные источники стандартов частоты. Например, Чихачёв Б.М. с коллегами (Дуденковой А.В.,

Грасюком А.З., Зубаревым И.Г.) создали радиопередатчик, стабилизированный по аммиачному молекулярному генератору, для установки на искусственном спутнике Земли. Также в секторе молекулярных генераторов Страховский Г.М. получил генерацию в водородном мазере, причём с наилучшими метрологическими характеристиками. Однако Н.Г. Басов передал этот мазер во Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), где находится государственная служба времени. На этом работы по созданию и исследованию мазеров в ФИАН были закрыты, поскольку главным направлением работ стали исследования по созданию лазеров.

Большое влияние на развитие исследований имела обзорная статья Н. Г. Басова «Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучений с помощью квантовых систем», направленная в редакцию УФН за несколько месяцев до сообщения Т. Меймана в прессе о запуске первого лазера и опубликованная в 1960 г. В течение 1958 – 1962 гг. Басовым Н.Г. и его учениками были предложены и обоснованы главные методы создания полупроводниковых лазеров: с оптической накачкой, инжекционных и лазеров с электронным возбуждением. Опираясь на эти работы, ученые Ленинградского физико-технического института начали исследования излучения полупроводников и в начале 1962 г. впервые наблюдали индуцированное излучение из *p-n* перехода в арсениде галлия. Активно включилась в исследования и лаборатория физики полупроводников ФИАН (Б.М. Вул, В.С. Вавилов, А.П. Шотов, В.С. Багаев и др.), в которой в декабре 1962 г. был запущен первый отечественный полупроводниковый лазер на p-n переходе в арсениде галлия (Рис. 1.9). Запуск аналогичного лазера в США состоялся всего на 3 месяца ранее.

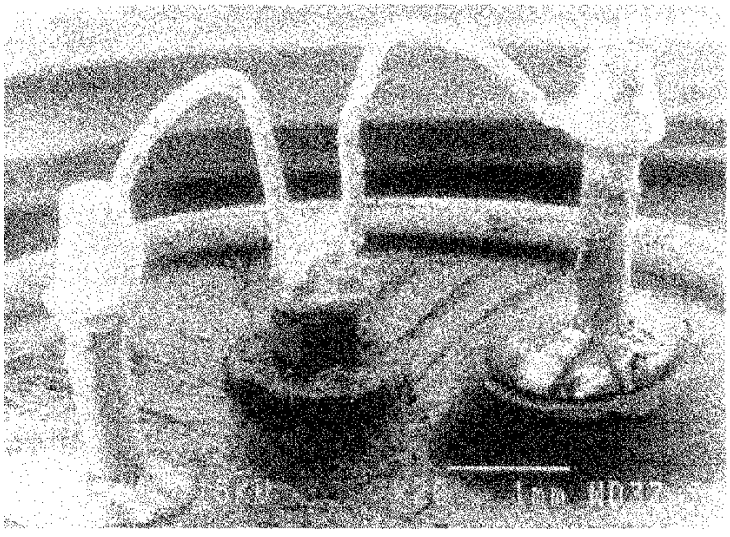


Рис. 1.9. Первый полупроводниковый инжекционный лазер СССР, созданный в ФИАН

Для создателей лазеров стало ясно, что уникальные характеристики лазерного излучения (когерентность, монохроматичность, возможность получения коротких

импульсов и высоких мощностей) открывают широчайшие перспективы применения лазеров в науке, различных отраслях народного хозяйства, в военном деле. Уже в 1961 г. Н.Г. Басов и О.Н. Крохин первыми высказали идею осуществления лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) путем нагрева мишени излучением лазера до температуры в несколько кэВ, достаточной для протекания реакций синтеза. Об этом Н.Г. Басов в 1962 г. доложил на заседании Президиума АН СССР, а в 1963 г. на III Международной конференции по квантовой электронике [10]. Тем самым на многие годы вперёд было предопределено развитие работ по новому наиважнейшему научно-техническому направлению.

В дальнейшем по инициативе Н.Г. Басова были развернуты работы по мощным лазерам на разных активных средах и с разными типами накачки, в том числе с привлечением промышленных организаций и оборонного ведомства. [11]. Были начаты работы по созданию стандартов частоты на основе маломощных газовых лазеров, работы по фотодиссоционным и химическим лазерам, по созданию лазерных усилителей и мощных когерентных сумматоров, в том числе на полупроводниковых лазерах с оптической накачкой. Применение полупроводниковых инжекционных лазеров сулило революцию в средствах связи, информатики, видеотехники.

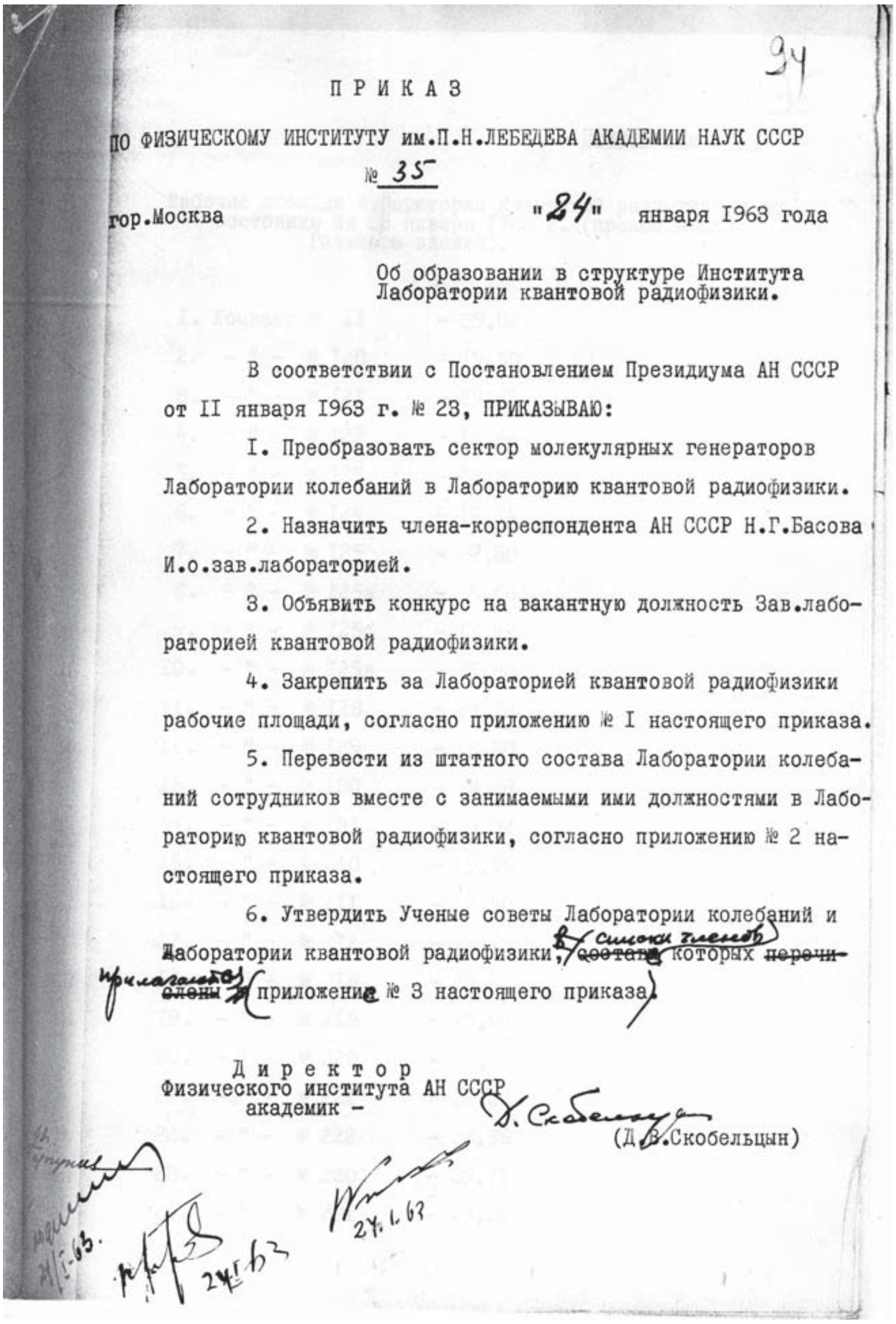
Практика превзошла все ожидания учёных и показала, что с развитием работ по квантовой радиофизике вторая половина 20-го века ознаменовалась открытием новой научно-технологической эры – лазерной, вставшей по своему значению в один ряд с атомной и космической эрами.

Со времени создания мазеров и лазеров прошло более 60 лет, многое изменилось, и сегодня может показаться удивительным, почему всего через 10-15 лет после окончания опустошительной войны советским учёным удалось совершить грандиозный вклад в мировую науку, открывший столь же грандиозные перспективы практического освоения результатов. По-видимому, труд ученых был очень востребованным, и государство реально заботилось о развитии в стране современной науки, – предположил А.М. Прохоров в поздравительной статье, посвящённой 75-летию Н.Г. Басова [12]. Добавим само собой разумеющееся, что оба они были не просто талантливыми учёными, а научными гениями.

## 1.3 Образование Лаборатории квантовой радиофизики и выбор научных направлений

Лаборатория квантовой радиофизики ФИАН (ЛКРФ) была образована 24 января 1963 г. по приказу №35 директора ФИАН академика Д.В. Скобельцына (Рис. 1.10) путём преобразования в неё сектора молекулярных генераторов, которым руководил Н.Г. Басов. Основанием для такого шага явилось Постановление АН СССР №23 от 11 января 1963 г., подготовленное по инициативе и при участии Н.Г. Басова в 1962 г.

В штат лаборатории вошли 62 сотрудника. Это был уже довольно большой коллектив, но собирался он с начала пятидесятых годов буквально по крупицам. Все сотрудники и экспериментальные установки размещались практически на тех же площадях в здании ФИАН, что и до образования лаборатории, а также в только что построенном двухэтажном здании – «павильоне» (Рис. 1.11), по соседству с главным зданием.



94

П Р И К А З

ПО ФИЗИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ им.П.Н.ЛЕБЕДЕВА АКАДЕМИИ НАУК СССР

№ 35

гор.Москва "24" января 1963 года

Об образовании в структуре Института Лаборатории квантовой радиофизики.

В соответствии с Постановлением Президиума АН СССР от II января 1963 г. № 23, ПРИКАЗЫВАЮ:

I. Преобразовать сектор молекулярных генераторов Лаборатории колебаний в Лабораторию квантовой радиофизики.

2. Назначить члена-корреспондента АН СССР Н.Г.Басова И.о.зав.лабораторией.

3. Объявить конкурс на вакантную должность Зав.лабораторией квантовой радиофизики.

4. Закрепить за Лабораторией квантовой радиофизики рабочие площади, согласно приложению № I настоящего приказа.

5. Перевести из штатного состава Лаборатории колебаний сотрудников вместе с занимаемыми ими должностями в Лабораторию квантовой радиофизики, согласно приложению № 2 настоящего приказа.

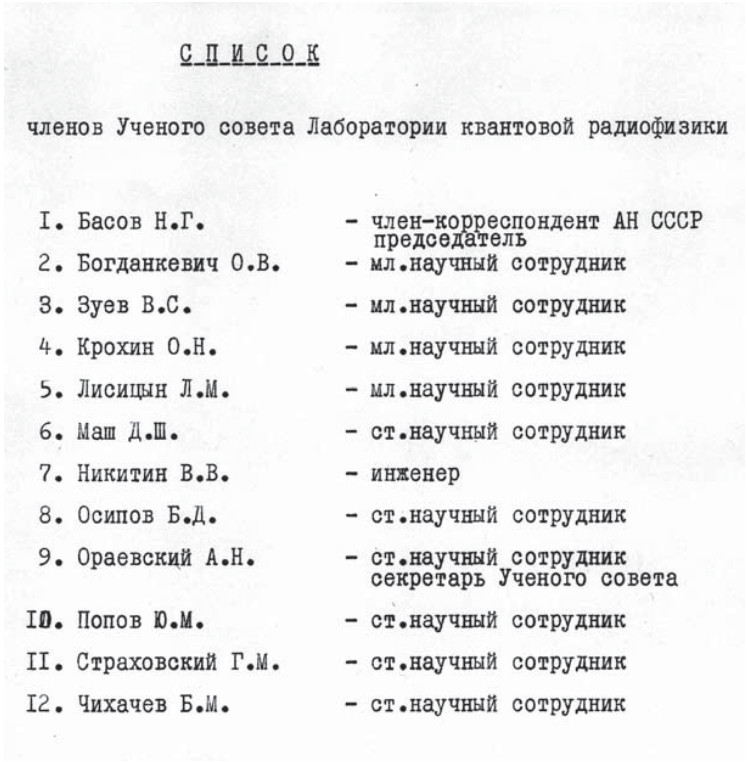
6. Утвердить Ученые советы Лаборатории колебаний и Лаборатории квантовой радиофизики, ~~состав~~ списки членов которых ~~перечислены в~~ прилагаются (приложение № 3 настоящего приказа).

Д и р е к т о р
Физического института АН СССР
академик - (Д.В.Скобельцын)

Рис. 1.10. Копия приказа №35 от 24 января 1963 г. по Физическому институту им. П.Н. Лебедева Академии наук СССР об образовании в структуре Института Лаборатории квантовой радиофизики

Рис. 1.11. Фото «павильона» – первого лабораторного здания для ЛКРФ

Двенадцать научных сотрудников являлись членами Учёного совета ЛКРФ (Рис. 1.12), включая председателя д.ф.-м.н. Басова Н.Г. и секретаря совета к.ф.-м.н. Ораевского А.Н. Несмотря на невысокие должности и учёные степени (Н.Г. Басов был в совете единственным доктором наук), члены совета уже успели поработать с Николаем Геннадьевичем и имели научные заделы для будущих диссертаций. Сотрудники по-прежнему посещали регулярный научный семинар Лаборатории колебаний, но уже по мере необходимости собирался семинар ЛКРФ, ставший вскоре тоже регулярным (Рис. 1.13). Роль Николая Геннадиевича была исключительно высока: он сам определял тематику исследований либо, по мере развития коллектива, поддерживал идеи и предложения своих сотрудников. Он был в курсе всех текущих работ, так что встречи и визиты к нему были не только докладами о выполнении заданий, но и обсуждениями, интересными и полезными для самих исполнителей.



С П И С О К

членов Ученого совета Лаборатории квантовой радиофизики

| | |
|---|---|
| I. Басов Н.Г. | – член-корреспондент АН СССР председатель |
| 2. Богданкевич О.В. | – мл.научный сотрудник |
| 3. Зуев В.С. | – мл.научный сотрудник |
| 4. Крохин О.Н. | – мл.научный сотрудник |
| 5. Лисицын Л.М. | – мл.научный сотрудник |
| 6. Маш Д.Ш. | – ст.научный сотрудник |
| 7. Никитин В.В. | – инженер |
| 8. Осипов Б.Д. | – ст.научный сотрудник |
| 9. Ораевский А.Н. | – ст.научный сотрудник секретарь Ученого совета |
| I0. Попов Ю.М. | – ст.научный сотрудник |
| II. Страховский Г.М. | – ст.научный сотрудник |
| I2. Чихачев Б.М. | – ст.научный сотрудник |

Рис. 1.12. Список членов Учёного совета ЛКРФ (1963 г.)

Рис. 1.13. Научный семинар лаборатории КРФ (1968 г.). В первом ряду слушают докладчика (слева направо) А.В. Дуденкова, А.Г. Молчанов, Ю.М. Попов, Г.М. Страховский, А.Н. Ораевский, Н.Г. Басов, О.Н. Крохин

Формально выделенных научных групп или секторов в Лаборатории КРФ первоначально не было (впервые они появлялись в 1965 г.), так как большинство проводимых работ были поисковыми. Можно только сказать, что научные сотрудники сами «группировались» по некоторым тематикам, например, около В.С. Зуева (фотохимические лазеры), А.З. Грасюка (оптическая накачка), Б.Д. Осипова и затем О.В. Богданкевича (накачка полупроводников электронным лучом).

Более чётко можно выделить пять структурно не оформленных вспомогательных подразделений, всесторонне обеспечивающих проведение исследовательских работ, а именно: конструкторскую группу (руководитель Белов Б.И., позднее Смирнов В.Г.), механическую (руководитель Смурыгин В.И., позднее Меркулов Е.Н.), радиоэлектронную (руководитель Дивильковский И.М.), оптическую (руководитель Сагитов С.И.) и химическую группу (руководитель к.х.н. Леонов Ю.С.). На Рис. 1.14, 1.15, и 1.16 приведены групповые фото сотрудников ЛКРФ, сделанные в 1967 г.

Уже в начале 60-х годов Н.Г. Басов определил одну из главных тенденций в развитии лазерной техники – создание мощных лазеров как непрерывного, так и импульсного действия. Они были необходимы для осуществления лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), для лазерных технологий, для лазерной локации Луны и решения целого ряда других задач, включая задачи специального назначения. В этом предложении проявились глубокая проницательность и научная смелость – ведь в то время существовали лишь твердотельные лазеры с энергией в импульсе менее джоуля и непрерывные газовые лазеры мощностью менее ватта.

Рис. 1.14. Фото 1 сотрудников лаборатории КРФ (1967 г.)

Рис. 1.15. Фото 2 сотрудников лаборатории КРФ (1967 г.)

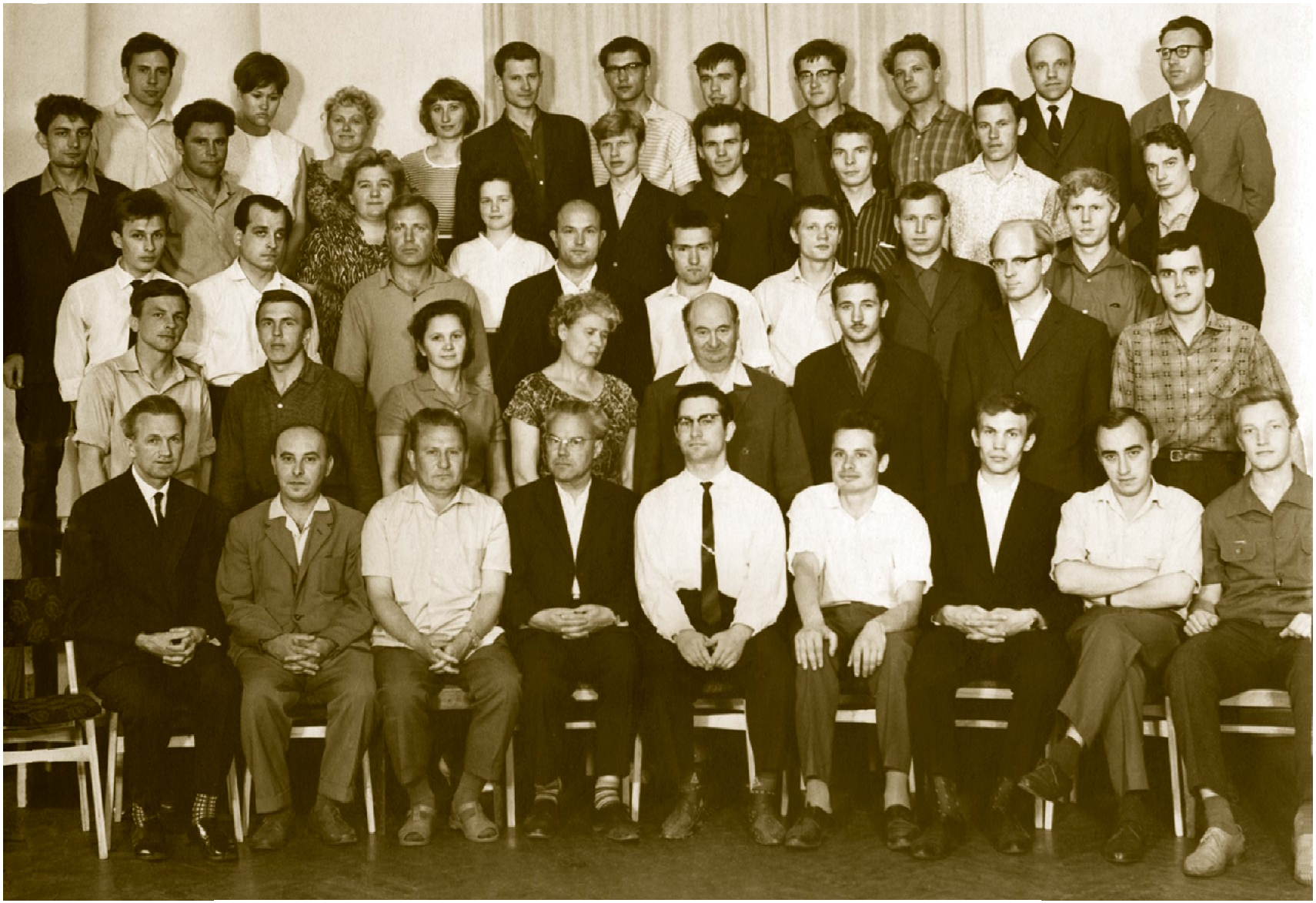


Рис. 1.16. Фото 3 сотрудников лаборатории КРФ (1967 г.)

Успешное выполнение в 1961 г. научной программы ФИАН (как открытой, так и «закрытой») по исследованию возможности генерации и усиления электромагнитного излучения в ИК и оптической области спектра дало мощный толчок развитию работ по лазерной тематике в ЛКРФ. В качестве методов возбуждения мощных лазеров рассматривались: тепловая накачка, химическая, оптическая, накачка электронным пучком и несколько позднее – совместное воздействие на газовую среду ионизирующего излучения и электрического поля (электроионизационный разряд). В связи с этим было начато широкое и планомерное изучение физики электрических разрядов как источников излучения и интенсивных ударных и тепловых волн, а также связанных с этой проблемой разнообразных физических и технических вопросов.

В середине 60-х годов Афанасьевым Ю.В. и Крохиным О.Н. были выполнены пионерские работы по газодинамической теории воздействия лазерного излучения на конденсированное вещество, включающие гидродинамическую теорию высокотемпературных и плазменных явлений при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом. Были исследованы основные физические процессы в лазерной плазме, начиная с тепловой стадии образования лазерно-плазменного факела и заканчивая его гидродинамической стадией в различных вариантах лазерной короны. Были найдены гидродинамические коэффициенты полезного действия для различных моделей термоядерных мишеней.

Начали разрабатываться мощные лазеры для ЛТС (вначале на кристаллах рубина, затем на неодимовом стекле) и готовиться мишени для их облучения лазерным излучением. Осваивались методы модуляции добротности лазера для получения мощных коротких (наносекундных) импульсов. В группе Крюкова П.Г. в сотрудничестве с Летоховым В.С. были исследованы методы генерации ультракоротких (пикосекундных) импульсов. К изготовлению активных элементов больших размеров из стекла, легированного неодимом, подключили Лыткаринский завод оптического стекла. Образцы мишеней высокого качества из дейтерированного лития изготовили оружейники.

После проведения в течение нескольких лет ряда безуспешных экспериментов в 1968 г. сотрудниками группы Крюкова П.Г. на установке в «павильоне» был продемонстрирован нагрев плазмы до термоядерных температур и были получены первые нейтроны при облучении мишеней из дейтерида лития импульсами неодимового лазера длительностью $10^{-11}$ с. Результаты экспериментов, сразу же доложенные Н.Г. Басовым на V международной конференции по квантовой электронике в США, послужили мощным стимулом для дальнейшего развития работ по лазерному термоядерному синтезу. В 1970 г. за разработку метода генерации мощных лазерных импульсов и использование их для высокотемпературного нагрева плазмы участники экспериментов Крюков П.Г., Захаров С.Д. и Сенатский Ю.В. были отмечены премией Ленинского Комсомола (Рис. 1.17).

Рис. 1.17. Участники экспериментов по высокотемпературному нагреву плазмы (слева направо) П.Г. Крюков, Ю.В. Сенатский и С.Д. Захаров

По инициативе Н.Г. Басова к дальнейшим работам по ЛТС привлекаются специалисты, имевшие опыт исследований в области горячей плазмы и взаимодействия излучения с плазмой и веществом. Первым в 1959 г. перевёлся из Снежинска и стал работать в ФИАН Крохин О.Н. В 1964 г. из ВНИИЭФ (г. Саров, бывший г. Арзамас) пришёл Склизков Г.В., удостоенный в 1963 г. Ленинской премии за работы по новой технике, а в 1966 г. из ВНИИТФ (г. Снежинск) перевёлся Розанов В.Б., получивший в том же 1966 году Ленинскую премию за аналогичные работы.

В 1963 г. Н.Г. Басов вместе с Ораевским А.Н. в статье в ЖЭТФ "Получение отрицательных температур методом нагрева и охлаждения системы" обосновывает получение инверсной населенности при тепловой накачке. В том же году в статье, опубликованной в следующем томе ЖЭТФ, Ораевский А.Н. развивает этот подход для химических реакций, тем более что Дж. Поланый в 1961 г. уже высказал идею о возможности их использования для создания лазеров в ИК диапазоне. В первом запущенном в 1965 г. в США химическом лазере на вращательно – колебательных переходах молекулы HCl лазерная генерация оказалась не эффективной, и Ораевский А.Н. в 1968 г. предложил использовать для этих целей цепные разветвленные реакции, а именно реакцию фтора с водородом. В 1969 г. практически одновременно группе Тальрозе В.Л из Института химической физики и сотрудникам ЛКРФ (Басов Н.Г., Кулаков Л.В., Маркин Е.П., Никитин А.И. и Ораевский А.Н.) удалось получить генерацию на указанной смеси. Эта работа положила начало экспериментальным исследованиям химических лазеров в ФИАН, в которых участвовали Башкин А.С. (ранее занимался мазерами), Кошелев Е.Л., Томашов В.Н., Юрышев Н.Н, Игошин В.И. и другие.

С образованием лаборатории КРФ под руководством Н.Г. Басова начались активные работы по фотодиссоционным лазерам, в том числе с накачкой

взрывного типа, и по лазерам на основе вынужденного комбинационного рассеяния. К ним были привлечены Зуев В.С., Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Ефимков В.Ф., Катулин В.А., Носач О.Ю. А.Л. Петров и специалисты ВНИИЭФ (Рис. 1.18). В результате был создан мощный фотодиссоционный йодный лазер наносекундных импульсов, который рассматривался как наиболее перспективный для использования в системах ПРО [9].

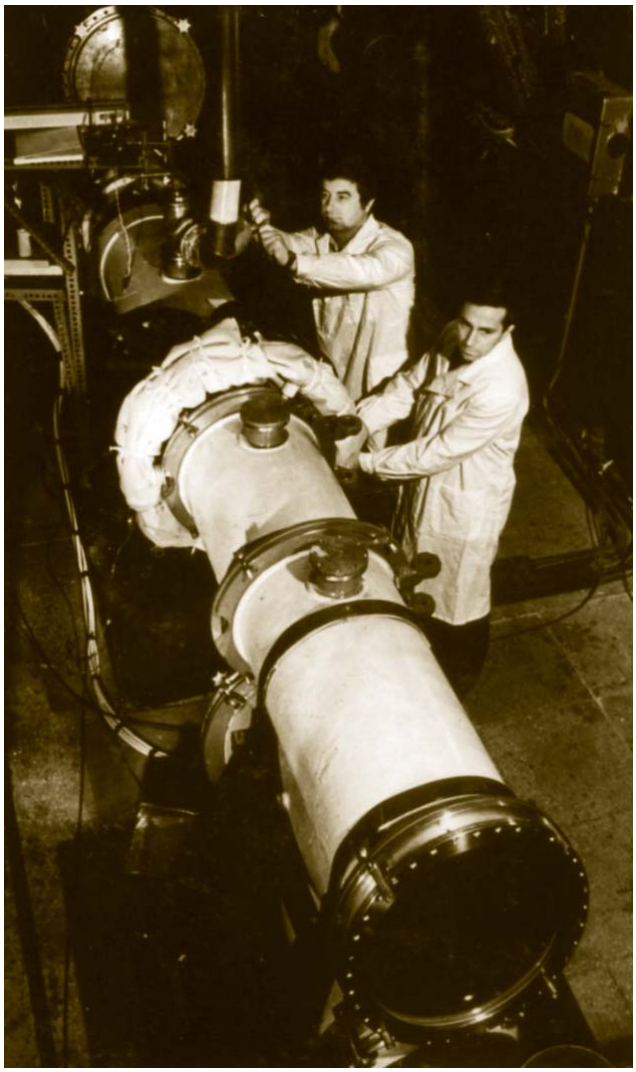


Рис. 1.18. В.А. Катулин (слева) и А.Л. Петров за настройкой мощного фотоионизационного лазера с открытым разрядом

Грасюком А.З. и Зубаревым И.Г., были выполнены первые эксперименты по одно- и двухфотонной оптической накачке полупроводниковых квантовых генераторов. Особое внимание уделялось разработке и исследованию новых методов нелинейной оптики, позволяющих повышать плотность энергии и направленность генерируемого излучения. В 1964 г. Н.Г. Басовым совместно с А.З. Грасюком, В.А. Катулиным и И.Г. Зубаревым была впервые получена генерация в арсениде галлия при его возбуждении стоксовой компонентой комбинационного рассеяния излучения рубинового лазера в жидком азоте (Рис. 1.19, 1.20). При таком способе накачки глубина возбуждённой области была почти на два порядка больше, чем при прямой накачке рубином. Эти работы

показали возможность как селективного когерентного суммирования излучения отдельных лазеров, так и преобразования длинноволнового излучения в коротковолновое при использовании полупроводников, а также создания оптически возбуждаемых дисковых лазеров, излучающих с другой (не освещаемой) стороны. Не менее эффективным также оказалось использование вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ). В последующем эти работы привели к открытию нового явления – обращения волнового фронта.

Рис. 1.19. Н.Г. Басов, А.З. Грасюк и В.Ф.Ефимков (на заднем плане) обсуждают проведение эксперимента, 1965 г.

Рис. 1.20. Н.Г. Басов, Ч. Таунс и И.Г. Зубарев (в центре) обсуждают проведение эксперимента, 1965 г.

Еще в 1964 г. Н.Г. Басов в своей Нобелевской лекции предложил использовать электронные пучки для возбуждения лазерных сред, в том числе конденсированных инертных газов **(**ксенона, аргона, криптона и их смесей**)** с целью получения генерации в коротковолновой области спектра. В 1967 г. наблюдалось интенсивное свечение твёрдого ксенона, но на два электронвольта меньше, чем предполагаемая ширина запрещённой зоны ксенона. Аспирант Молчанов А.Г. объяснил это свечением эксимерных молекул и предложил четырёхуровневую схему излучательных переходов. В начале 1970 г. было обнаружено лазерное сужение линии излучения, что явилось предтечей создания эксимерных лазеров.

Первый эксимерный лазер на димере сжиженного ксенона был создан в ЛКРФ в 1970 г. Н.Г. Басовым, В.А. Данилычевым и Ю.М. Поповым, а спустя всего год в 1971 г. был теоретически обоснован и запущен Басовым Н.Г., Беленовым Э.М., Данилычевым В.А. и Сучковым А.Ф. первый электроионизационный лазер (на углекислом газе). При участии молодых сотрудников А.А. Ионина, О.М. Керимова И.Б.Ковша и В.А. Соболева была продемонстрирована возможность работы такого лазера при давлении газовой смеси в несколько десятков атмосфер и рабочем объеме до 10 л. (Рис. 1.21 и 1.22). В 1978 г. Беленов Э.М., Данилычев В.А., Ковш И.Б., Попов Ю.М., Сучков А.Ф. были удостоены Государственной премии за разработку физических принципов, создание и исследование газовых лазеров, возбуждаемых с использованием ионизирующего излучения.

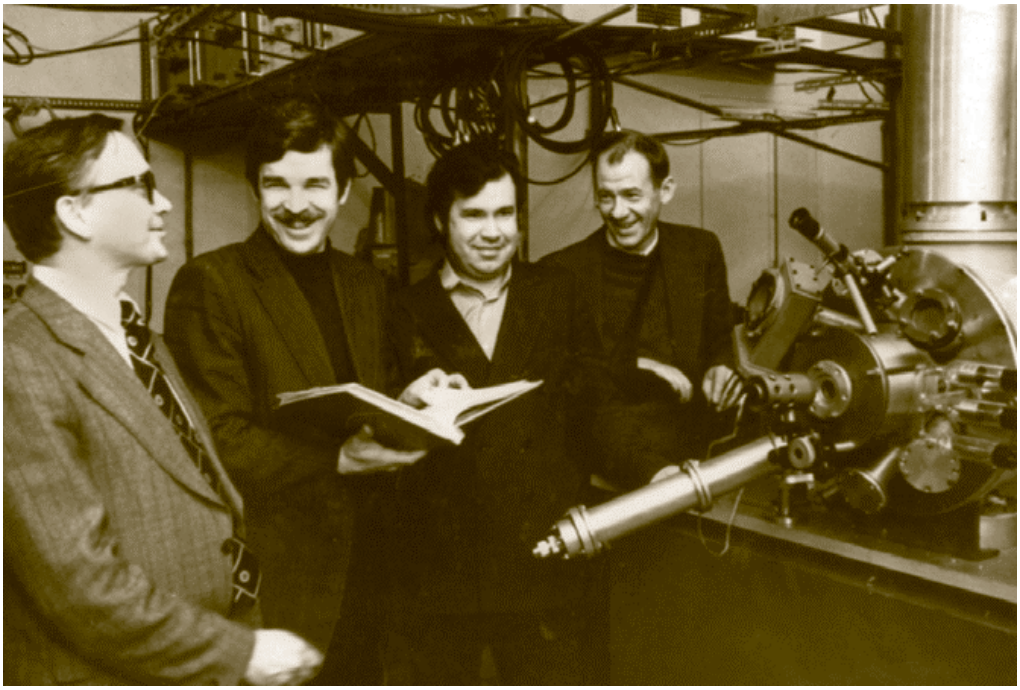


Рис. 1.21. Лауреаты Госпремии 1978 г. (слева направо) Данилычев В.А., Ковш И.Б., Беленов Э.М. и Сучков А.Ф.

Рис. 1.22. Участники исследований первых ЭИ $CO_2$ лазеров (слева направо): В.А. Соболев, О.М. Керимов, А.А. Ионин (в н/вр. руководитель ОКРФ)

После запуска инжекционного лазера на арсениде галлия стали активно развиваться работы по технологии полупроводников (их возглавил Никитин В.В.) и накачке полупроводниковых лазеров. В 1964 г. Богданкевичем О.В. с Девятковым А.Г. и др. коллегами впервые была получена лазерная генерация в полупроводниковой пластине сульфида кадмия при её возбуждении электронным пучком по схеме дискового лазера, предложенного Н.Г. Басовым (Рис. 1.23). В дальнейшем эти работы привели к созданию совместно с Насибовым А.С., Зверевым М. и Печёновым А.Н. лазерного телевизионного экрана.

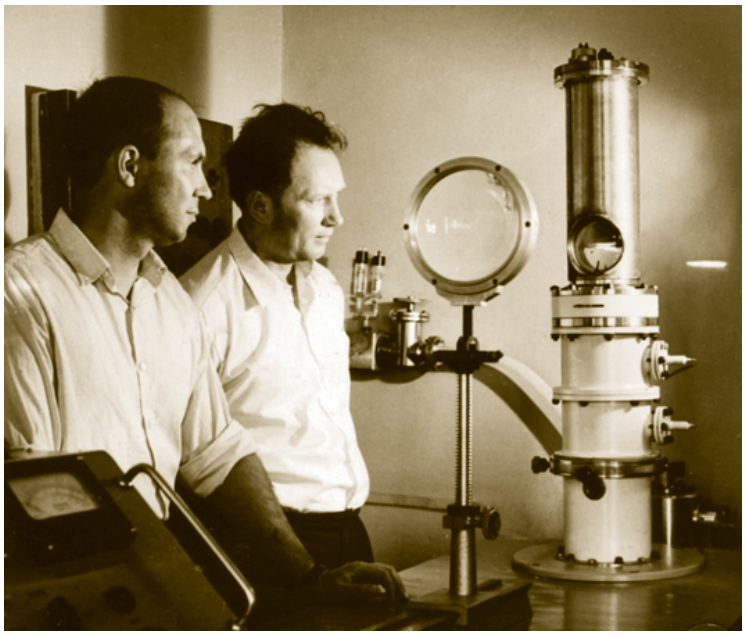


Рис. 1.23. Богданкевич О.В. (справа) и Савельев А.А. около электронно-пучковой установки

Продолжались активные работы и в области инжекционных полупроводниковых лазеров. Начатый по инициативе Н.Г. Басова цикл фундаментальных исследований, приведший к созданию полупроводниковых лазеров, был удостоен в 1964 г. Ленинской премии. Это была первая высокая премия, полученная сотрудниками лаборатории КРФ Крохиным О.Н. и Поповым Ю.М. совместно с сотрудниками лаборатории полупроводников Б.М. Вулом, и А.П. Шотовым и коллегами из Ленинградского ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Рис. 1.24).

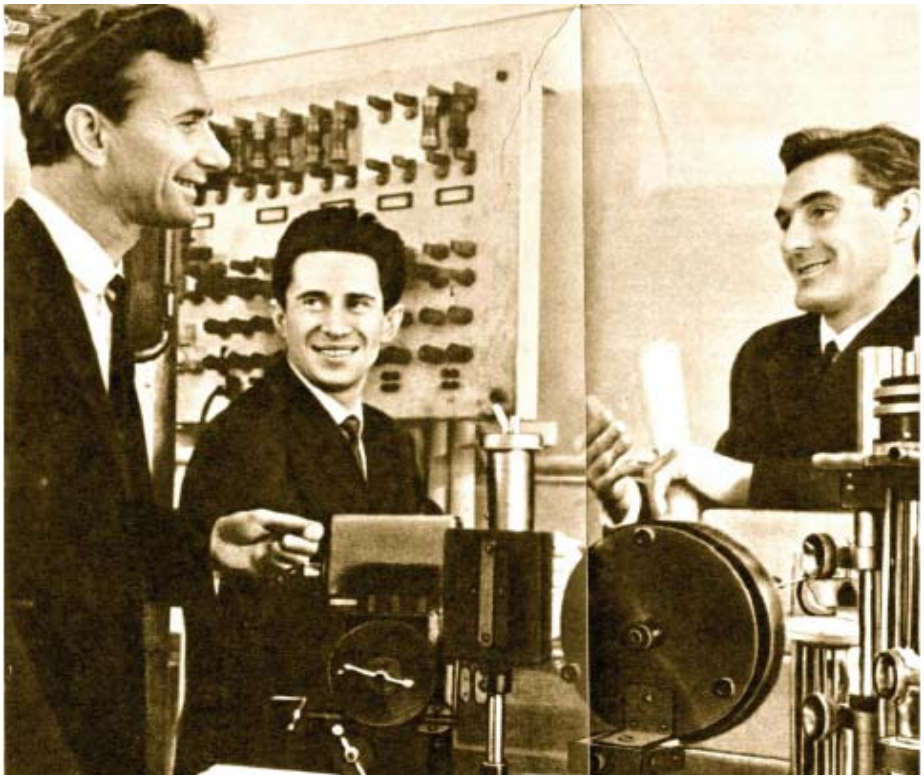


Рис. 1.24. Создатели полупроводникового инжекционного лазера (справа налево): О.Н. Крохин, Ю.М. Попов и А.П. Шотов

В период 1965 – 1970 гг. Н.Г. Басовым с сотрудниками был выполнен большой цикл теоретических и экспериментальных исследований по различным режимам работы инжекционных лазеров и по расширению диапазона их генерации, в том числе с использованием тройных соединений и гетеропереходов. Был создан усилитель света на р-п переходе в арсениде галлия и впервые исследованы его спектральные характеристики и чувствительность. Получена генерация регулярных импульсов длительностью менее наносекунды при частоте повторения свыше 1 ГГц, выяснены причины многомодовой и нестационарной генерации инжекционных лазеров. На их основе созданы быстродействующие логические элементы, такие как генератор тактовой частоты, мультивибратор, элементы И, ИЛИ, НЕ и ПАМЯТЬ. К этим работам были привлечены Елисеев П.Г., Никитин В.В., Богатов А.П., Полуэктов И.А., Семёнов А.С., Самойлов В.Д., Захаров Ю.П., Молочев В.И. и др. сотрудники ЛКРФ (Рис. 1.25-1.27).

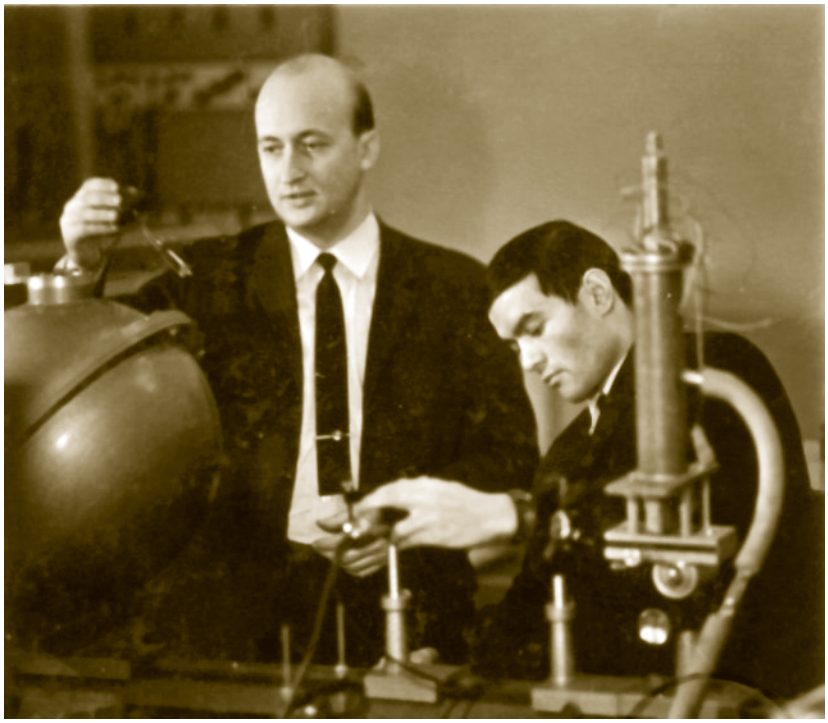


Рис. 1.25. П.Г. Елисеев с аспирантом И. Исмаиловым

Рис. 1.26. А.П. Богатов

Рис. 1.27. А.С. Семёнов

Что касается относительно маломощных газовых лазеров, то уже первые исследования характеристик их излучения (спектральной ширины, стабильности) и поглощающих излучение сред показали, что такие лазеры приобретают громадное значение для создания лазерного стандарта частоты, который одновременно может служить единым эталоном времени и длины, причём на несколько порядков более стабильным, чем молекулярные стандарты (Рис. 1.28). Большую роль сыграла обзорная работа Н.Г. Басова и В.С. Летохова "Оптические

стандарты частоты", опубликованная в 1968 г. в УФН. В ней были отражены новые тенденции развития квантовых стандартов частоты в оптическом диапазоне и возможности, открывающиеся для физических измерений в случае реализации лазеров с воспроизводимостью частоты $10^{-13}$ – $10^{-14}$.

Что касается относительно маломощных газовых лазеров, то уже первые исследования характеристик их излучения (спектральной ширины, стабильности) и поглощающих излучение сред показали, что такие лазеры приобретают громадное значение для создания лазерного стандарта частоты, который одновременно может служить единым эталоном времени и длины, причём на несколько порядков более стабильным, чем молекулярные стандарты (Рис. 1.28). Большую роль сыграла обзорная работа Н.Г. Басова и В.С. Летохова "Оптические стандарты частоты", опубликованная в 1968 г. в УФН. В ней были отражены новые тенденции развития квантовых стандартов частоты в оптическом диапазоне и возможности, открывающиеся для физических измерений в случае реализации лазеров с воспроизводимостью частоты $10^{-13}$ – $10^{-14}$.

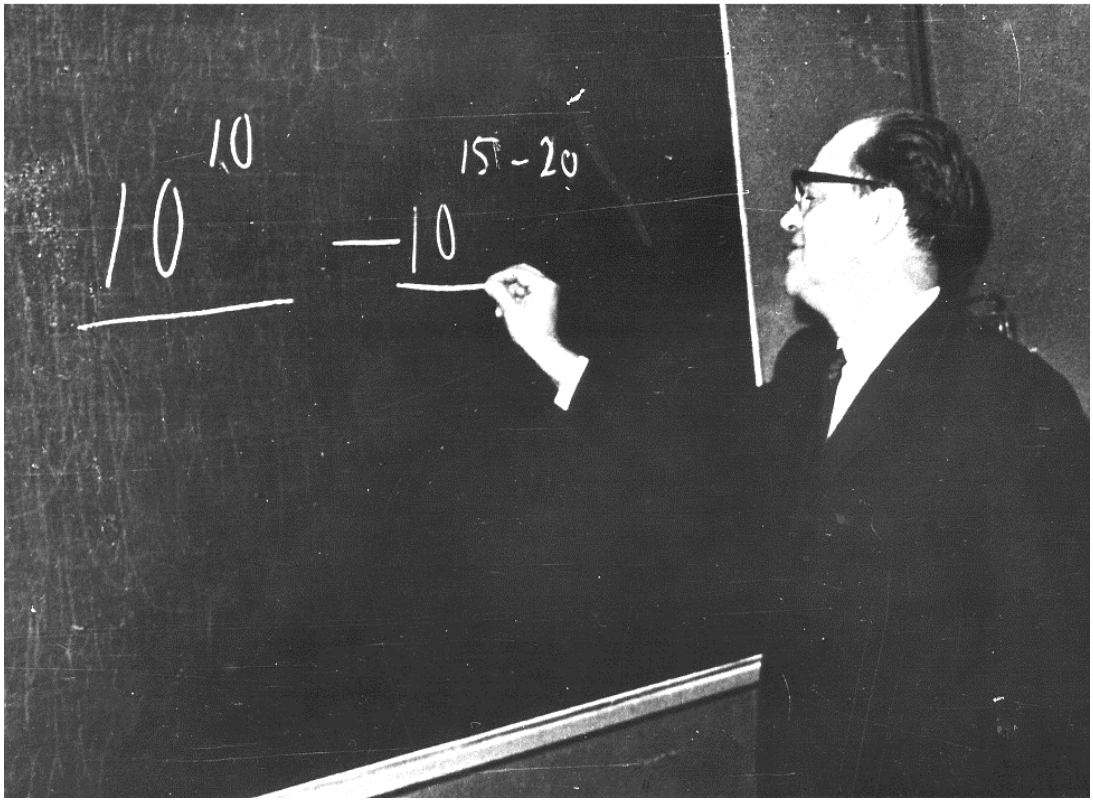



Рис.1.28. Н.Г. Басов предвосхищает развитие оптического стандарта частоты

Работы по новым методам выделения узких спектральных линий (с шириной много меньшей доплеровской), необходимых для целей стабилизации частоты лазерного излучения, сформировали новое направление в квантовой электронике – прецизионную лазерную спектроскопию. К исследованиям были привлечены Никитин В.В. и молодые сотрудники и аспиранты Амбарцумян Р.В., Губин М.А., Компанец О.Н., Компанец И.Н. (Рис. 1.29).

Рис. 1.29. В.В. Никитин (справа) и М.А. Губин настраивают
He-Ne лазер (λ~3,39 мкм) с поглощающей метановой ячейкой

К числу первых демонстраций возможностей применения лазеров можно отнести эксперимент по определению расстояния до Луны с помощью лазера на рубине и телескопа ЗТШ-2,6 [13], выполненный в сентябре 1963 г., на следующий год после аналогичной локации Луны в США. В эксперименте участвовали сотрудники ЛКРФ Грасюк А.З., Зуев В.С., Крюков П.Г., сотрудники группы Кокурина Ю.Л. из Крымской научной станции ФИАН в пос. Кацивели (В.В. Курбасов, А.Н. Сухановский) и сотрудники Крымской астрофизической обсерватории (В.Ф. Лобанов, В.М. Можжерин, Н.С. Черных, К.К. Чуваев) в пос. Северный, где и располагался телескоп. Первые измерения расстояний до Луны, уже имевшие определённую практическую ценность, были проведены в 1965 г. Хотя при длительности лазерного импульса порядка 50 нс реальная ошибка в расстоянии составила около 200 м, результат уже позволял существенно продвинуться в решении задач селенодезии и астрометрии.

В 1964 года состоялась демонстрация достижений в области создания и применения лазеров на специальной выставке, организованной ФИАН, ГОИ им. С.И. Вавилова и др. организациями для партийно-правительственной делегации во главе с руководителем государства Н.С. Хрущёвым. В частности, Басовым Н.Г., Грасюком А.З. и Зубаревым И.Г. была успешно продемонстрирована действующая лазерная установка – двухкаскадный регенеративный (многопроходный) рубиновый усилитель входных импульсных сигналов (даже отдельных фотонов) до заданного «макроскопического» уровня в кольцевой (трёхзеркальной) оптической схеме.

Николай Геннадиевич всегда был полон идей, и о новой идее он обычно рассказывал, потирая руки. Наиболее часто это было утром, особенно в понедельник, поскольку идеи возникали и ночью, и в выходные дни. Делился ими он, прежде всего, с близкими коллегами и руководителями подразделений – Крохиным О.Н., Поповым Ю.М., Афанасьевым Ю.В., Данилычевым В.А., Зубаревым И.Г., Зуевым В.С., Розановым В.Б., Склизковым Г.В. и с другими, кого касалось дело (Рис. 1.30, 1.31). При обсуждении научных проблем, каждый мог высказывать свое мнение, должности и стаж работы были не в счёт.

Рис.1.30 Н.Г. Басов с ближайшими сотрудниками (слева направо): Ю.М. Попов, Д.В. Ковалевский, О.Н. Крохин, на рубеже 60-70-х годов

Рис. 1.31 Руководители подразделений на совещании у Н.Г. Басова

Николай Геннадиевич интересовался всеми сторонами жизни Лаборатории. Сам принимал на работу сотрудников и знал большинство сотрудников по имени и отчеству. Лично тепло поздравлял женщин с праздником 8 марта на торжественном собрании, организуемом профсоюзной организацией. В другие праздники поздравлял сотрудников по радиосети (она тогда работала), а также лично, обходя некоторые лаборатории. «Болел», как и все, за выступления спортивной команды ЛКРФ.

Лаборатория квантовой радиофизики ФИАН, или «Басовская» лаборатория, как её стали называть, быстро приобрела широкую известность в научном мире и в течение десятилетий оказывала и оказывает заметное влияние на деятельность отечественных и зарубежных учёных. Как рассказывали фиановские участники международных, даже не лазерных конференций, иностранцы, узнав место их работы, задавали множество вопросов по исследованиям лаборатории КРФ, в том числе по вопросам, не имеющим прямого отношения к тематике конференции. Советские научные журналы и препринты ФИАН со статьями по лазерной тематике оперативно переводились на Западе.

Результаты, полученные уже в первые годы работы ЛКРФ, позволили планировать новые перспективные исследования и дали возможность получить дополнительные штатные единицы и средства как на оснащение лаборатории приборами и материалами, так и на строительство отдельного четырёхэтажного здания (корпуса №1), который был построен на территории ФИАН в 1966 г. (Рис. 1.32). Кроме лабораторных и офисных помещений для научных работников и администрации, в нем были помещения для библиотеки, конференц-зал, а также специализированные помещения для мастерской с участками хранения и заготовки материалов, станочным, слесарным, стеклодувным и инструментальным участками. Семинар лаборатории теперь проводился в конференц-зале нового корпуса (Рис. 1.13), вмещавший сотрудников не только ЛКРФ, но и др. лабораторий и организаций, заинтересованных в посещении семинара.

С целью обеспечения дальнейшего развития ФИАН, по Постановлению ЦК КПСС и Правительства для него в 1963 г. была выделена земля под строительство Особого конструкторского бюро (ОКБ). Площадку для него Н.Г. Басов выбрал примерно в 20 км от тогдашних границ Москвы на месте посёлка Красная Пахра (позднее – Академгородок). Теперь это всем известный город Троицк, который оказался чуть ли не в геометрическом центре Новой Москвы. На этой земле в 1966 г. было построено большое отдельное здание ОКБ (Рис. 1.33), в котором разместились механический и оптический цеха, стеклодувная и др. мастерские, участки по изготовлению и сборке различной аппаратуры. Строились и др. сооружения общего для ФИАН назначения, например, столовая, гараж. На этой же площадке в 1967 г. южнее здания ОКБ был построен специализированный двухэтажный корпус для лаборатории КРФ (корпус КРФ-1), в котором продолжились начатые в московской части работы по возбуждению

полупроводников электронным пучком и по созданию мощных химических лазеров. Параллельно в городе Троицке возводились жилые дома, магазины, школы и др. объекты социальной инфраструктуры.

Рис.1.32. Комплекс зданий Отделения КРФ ФИАН, включающий четырёхэтажный корпус №1 ЛКРФ (в центре) и более поздние пристройки (пятиэтажная справа и последняя семиэтажная слева)

Рис. 1.33. Здание ОКБ (на переднем плане), за ним полоска деревьев и домов вдоль Калужского шоссе

Строительство в Москве и Троицке, а также выделение финансовых средств и штатных единиц под новые лазерные исследования осуществлялись во многом благодаря организации Н.Г. Басовым работ в интересах оборонно-промышленного комплекса. Об этом достаточно подробно написано в [11, ч. 6, с. 78-113]. Н.Г. Басов был научным руководителем многих таких работ, а сотрудники ЛКРФ были консультантами, по причине чего в ЛКРФ часто работали прикомандированные сотрудники из дружественных организаций, а сотрудникам ЛКРФ приходилось выезжать в эти организации и даже на полигоны для тестирования лазерных изделий. Как известно, подобное взаимодействие научных и военно-промышленных организаций было и у наших главных конкурентов в США.

## 1.4 Многогранная деятельность Н.Г. Басова

### 1.4.1 Н.Г. Басов – инициатор и руководитель работ по КРФ в СССР

Материалы, уже приведённые в разделах 1.2 и 1.3, характеризуют Н.Г. Басова как инициатора и руководителя работ по КРФ в нашей стране. Ко времени создания лаборатории КРФ в 1963 г. в СССР уже нашли применения малошумящие и очень точные молекулярные стандарты частоты на основе аммиака и водорода, а в ФИАН были созданы первые лазеры и предложена широкая программа работ по исследованиям и применениям этих и других перспективных лазеров. Н.Г. Басов, имея незаурядные организаторские способности и будучи к тому времени лауреатом Ленинской премии (1959 г.), заместителем директора ФИАН (с 1958 г.), членом-корреспондентом Академии наук СССР (с 1962 г.), членом Октябрьского райкома КПСС (1960-1961 гг.) и депутатом Московского городского Совета (1961-1963 гг.), проводил активную работу по расширению фронта исследовательских работ и по внедрению их результатов в заинтересованных организациях, по расширению связей с промышленными и оборонными предприятиями. Под руководством Н.Г. Басова была начата разработка целого ряда комплексных программ по развитию важнейших направлений квантовой электроники, а ФИАН стал головной организацией при выполнении многих работ со смежными организациями в области квантовой радиофизики и её применений.

В те времена Правительство СССР уделяло серьёзное внимание развитию лазеров. На государственном уровне принимались решения о форсировании лазерных исследований в Академии наук и ВУЗах, об организации промышленного производства лазеров, о подготовке кадров по новой специальности, координации действий привлечённых к работам предприятий около десятка министерств.

Главным в научной деятельности Н.Г. Басова являлось создание и развитие новых перспективных научных направлений, кардинально меняющих традиционные взгляды, и одновременно проведение исследований в уже развитых направлениях для обеспечения решения крупных и конкретных задач науки и техники. Он определял тематику этих исследований и доверял их выполнять своим сотрудникам, в большинстве случаев ещё молодым Этим прежде всего объясняется

разнообразие и широта научных направлений, созданных Н.Г. Басовым и его школой.

Многие направления и в прикладных, и в фундаментальных науках, поглощавшие интеллектуальные, человеческие и материальные ресурсы, сегодня не выглядят привлекательными, а иные даже оказались тупиковыми. И уж совсем ничтожная часть идей и результатов находит практическое применение, продолжающееся в течение длительного времени. Среди них можно смело указать разработки, связанные с именем Н.Г. Басова и его сотрудников: водородный мазер, ЛТС, полупроводниковые (1959), дисковые (1969), эксимерные (1970) и электроионизационные (1971) лазеры, многослойная рентгеновская оптика (1976), применение квантовых генераторов в метрологии, службе точного времени, эталонах времени и частоты, навигации, геодезии, и многое другое.

Это яркие примеры научного предвидения Н.Г. Басова [14]. К другим важным достоинствам учёного можно отнести умение находить и привлекать талантливых людей и государственный подход к делу. Последнее может быть подтверждено примером передачи из ЛКРФ во ВНИИФТРИ (п. Менделеево Московской области) группы создателей водородного мазера под руководством В.М. Татаренкова вместе с установкой и др. оборудованием, при фактической длительной опеке Н.Г. Басовым этой группы. В 1967 г. разработанный группой комплекс аппаратуры вошёл в официально утверждённый Государственный первичный эталон времени и частоты. Впоследствии В.М. Татаренков возглавил Главный метрологический центр Государственной службы времени и частоты.

На фоне широты интересов Н.Г. Басова стоит упомянуть об особом его отношении к теоретическим исследованиям, что, например, отмечал Д.В. Скобельцын. Николай Геннадьевич ещё больше вдохновлялся, если текущая работа заводила в малоисследованные области физики или возникали тонкие и глубокие вопросы. В этих случаях Н.Г. Басов не стеснялся обращаться к самым крупным авторитетам. Рассказывают, что будучи ещё молодым исследователем, в связи с концепцией лазера он обсуждал с Л.Д. Ландау вопросы квантовой теории излучения. Вскоре после возникновения идеи лазерного термоядерного синтеза он развернул совместные работы с коллективом А.Н. Тихонова и А.А. Самарского, видных специалистов по математической физике и вычислительной математике, а также с теоретиками ядерных центров в Сарове и Снежинске, причём многие работы продолжаются и поныне. Со студенческих лет Н.Г. Басов сохранил дружбу с выдающимся теоретиком-ядерщиком А.М. Балдиным.

Н.Г. Басов хорошо знал многих сотрудников теоретического отдела ФИАН, относясь к ним как к партнёрам, у которых всегда можно получить квалифицированную консультацию и свободно обсудить волновавшие его научные проблемы самого широкого толка. Вскоре после основания собственной лаборатории он создал в ней группу теоретиков, ставшую позже сектором. Постоянно привлекал их внимание к проблемам, над которыми работали экспериментаторы, и в то же время одобрял тех, кто обращался к

фундаментальным и сложным вопросам физики. Много теоретиков было среди его ближайших сотрудников и замов, например, Крохин О.Н., Ораевский А.Н., Попов Ю.М., Розанов В.Б., Ю.В. Афанасьев, Е.Г. Гамалий (Рис. 1.34).

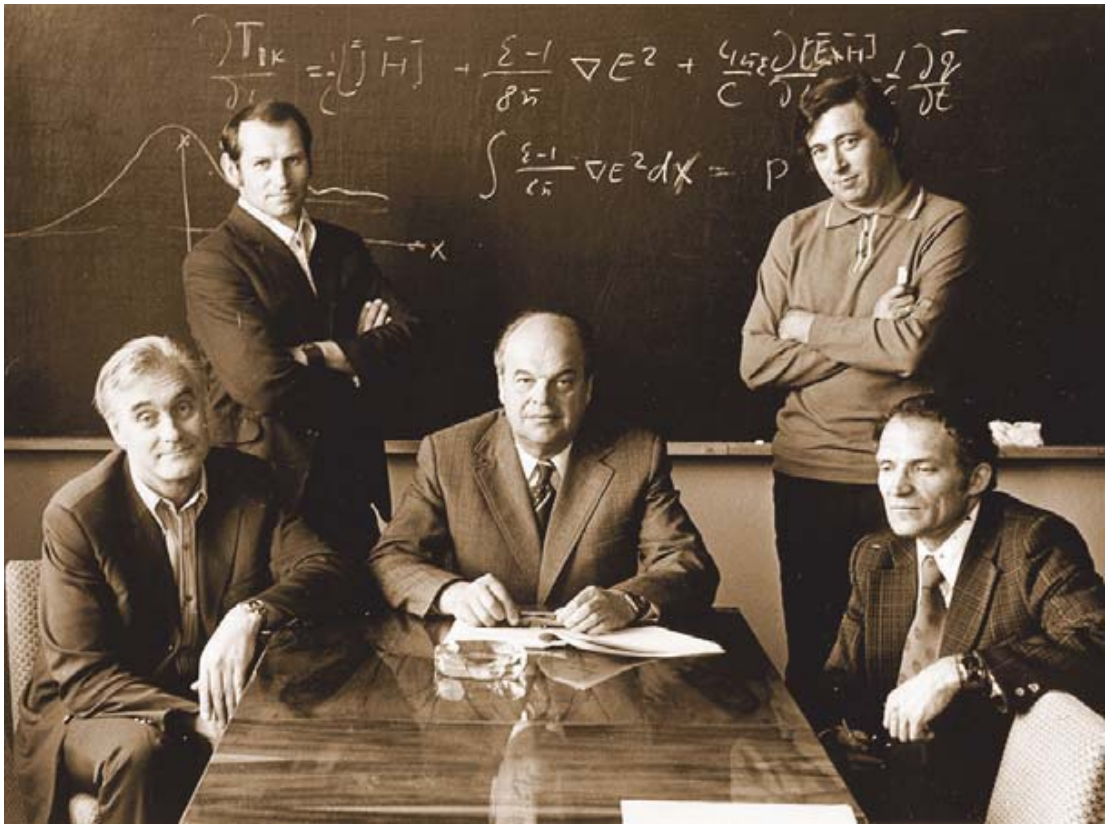


Рис. 1.34. Н.Г. Басов с теоретиками ЛТС (слева направо):
О.Н. Крохин, Е.Г. Гамалий, Ю.В. Афанасьев, В.Б. Розанов

### 1.4.2 Научно-организационная и общественная деятельность

Обширной и многогранной была научно – организационная деятельность Н.Г. Басова [15]. Его работа на посту заместителя директора (1958-1973 г.г.) и директора ФИАН (по 1988 г.) имела большое значение для Физического института и коллектива его сотрудников. Именно в этот период ФИАН, как полифизический институт, выдвинулся в ряд передовых центров физической науки СССР.

Как заместитель директора ФИАН, Н.Г. Басов отдельно или вместе с директором Д.В. Скобельцыным (Рис. 1.35) регулярно посещал подразделения ФИАН, включая филиалы, и подробно знакомился с их тематикой и состоянием дел, что давало возможность эффективно помогать им как с научной, так и с административной стороны [14]. Он быстро вникал в суть работы, стремился выделить ключевые проблемы и найти их решения, увлекая участников обсуждений своими идеями и убеждённостью. Подобные визиты, внимание, а также реальная поддержка начальства в финансировании и оснащении оборудованием стимулировали научную деятельность, вдохновляли сотрудников и создавали творческую рабочую атмосферу в коллективах.

Рис.1.35. Директор ФИАН Д.В. Скобельцын, его заместители А.И Исаков и Н.Г. Басов с зав. лабораториями Н.Н. Соболевым, Г.Т. Зацепиным и Б.М. Вулом. Конец 1960-х гг.

Например, в начале 1970-х годов Н.Г. Басов контролировал сооружение нового гигантского радиотелескопа на радиоастрономической станции ФИАН в Пущино, средства для которого выделялись не по статье капитального строительства, а непосредственно дирекцией ФИАН, в значительной степени благодаря активной поддержке Н.Г. Басова. Позже он приезжал, чтобы проверить, как справляется с делами новый, назначенный им руководитель станции А.Д. Кузьмин (Рис. 1.36).

Рис. 1.36. Директор Н.Г. Басов на Радиоастрономической станции ФИАН в г. Пущино с заведующим лабораторией А.Д. Кузьминым (слева) и главным конструктором радиотелескопов П.Д. Калачёвым, 1980 г.

Благодаря сказанному, а также общему признанию Н.Г. Басова талантливым и инициативным универсальным учёным, он приобрёл высокий авторитет в коллективе, тем более что помогал развитию работ не только по лазерной тематике, но по всем без исключения научным направлениям Института того времени. Многие работы велись по постановлениям вышестоящих организаций и других ведомств, в том числе по постановлениям, инициированным самим Н.Г. Басовым. Помогало и то, что в этих организациях и ведомствах Н.Г. Басов имел высочайший авторитет.

В тот период чрезвычайно быстро расширялась и совершенствовалась экспериментальная база ФИАН [14]. Внедрение средств автоматизации, вычислительной техники, приборный парк, создание уникальных и крупных установок - этими вопросами Николай Геннадиевич занимался непосредственно и в Институте, и в Академии, и в министерствах, которые, на уровне Совета Министров и отделов ЦК КПСС отвечали за выпуск научного оборудования. Видимо считая, что новые знания приходят из опыта, он много внимания уделял повышению точности физических измерений, а также постановке новых экспериментов и проектированию для этого специальных физических установок. Проводимые в лаборатории КРФ работы по квантовым стандартам частоты и лазерной локации Луны и спутников тоже вели к многократному увеличению точности измерений.

При активной поддержке, а иногда и по инициативе Басова в ФИАН строились ускорители, крупные плазменные установки, мощные лазеры. Несколько лабораторий и отделов участвовали в разработке программ и аппаратуры для космических исследований со спутников и наземных станций, впервые в мире была создана технология массового производства мишеней для лазерного термоядерного синтеза, разрабатывались соответствующие технологические установки, а на Троицкой площадке ФИАН было налажено их мелкосерийное производство для отечественных и зарубежных лабораторий.

В 60-е годы под непосредственным руководством Басова в г. Троицке было создано Особое конструкторское бюро (ОКБ), выполнявшее производственные заказы для быстро развивающихся исследований ФИАН и других научных учреждений страны (см. раздел 4.3). Одновременно в том же Троицке была завершена организация Института спектроскопии РАН (ИСАН), основной костяк коллектива которого составили сотрудники Лаборатории спектроскопии и Лаборатории квантовой радиофизики ФИАН, что в значительной мере способствовало развитию лазерной тематики и определило лицо современного ИСАНа. В 1980 г., на основании совместной инициативы Н.Г. Басова и руководства Куйбышевской области и согласно постановлению Президиума АН СССР, был образован Самарский (Куйбышевский до 1991 г.) филиал ФИАН, благодаря которому развитый индустриальный регион получил новые перспективы и стимулы развития как фундаментальной, так и широкого спектра прикладной науки (см. раздел 4.4).

Активной и результативной работе Института на этом этапе была подчинена и кадровая политика. При деятельном участии Николая Геннадиевича, партийной и профсоюзной организаций в ФИАН был разработан порядок аттестации и утверждения в должностях учёных, инженеров, рабочих и обслуживающего персонала. По сути, речь шла об адаптации трудового законодательства к задачам Института. За словами м.н.с., с.н.с., зав. сектором, начальник установки, к.ф.-м.н., д.ф.-м.н. и др. кроме зарплаты появились смысл и обязанности.

Неподдельную радость и гордость вызывали у Николая Геннадиевича успехи и достижения руководимого им ФИАН, особенно полученные в рамках исследований по лазерной тематике. Их заслуженно оценило Правительство СССР, наградив Институт в 1967 г. орденом Ленина, а в 1984 г. – орденом Октябрьской революции (Рис. 1.37).

Рис. 1.37. Награждение ФИАН орденом Октябрьской революции в Колонном зале Дома Союзов. Вручает орден заместитель Председателя Совета Министров СССР, председатель Государственного комитета СССР по науке и технике Марчук Г.И. (крайний слева). Принимают награду директор ФИАН Басов Н.Г. (со знаменем) и секретарь парткома Головашкин А.И. (крайний справа). Май 1984 г.

Радовался Николай Геннадиевич и успехам сотрудников. Это проявлялось, например, при их награждении государственными наградами, при защите ими диссертаций и на праздновании их юбилеев (Рис. 1.38). Обычно Н.Г. Басов присутствовал и выступал на торжествах и банкетах, устраиваемых по такому поводу, вполне понимая, что своим присутствием он безусловно одаривает виновника торжества. Тёплые слова его поздравления никогда не были дежурными, банальными.

Рис. 1.38. На международной конференции, посвящённой 80-летию лауреата Нобелевской премии, академика П.А. Черенкова (в центре, рядом с Н.Г. Басовым). Лаборатория фотомезонных процессов ФИАН, г. Троицк, 1984 г.

В общении с сотрудниками и аспирантами Николай Геннадиевич был приветлив и прост. Наиболее легко донести ему свою идею, заботу, просьбу или предложение можно было вечером, после окончания рабочего дня, дождавшись ухода последнего его гостя или посетителя. Редко, когда Эн Гэ (в среде сотрудников) покидал лабораторию раньше 10 часов вечера.

Феноменальная интуиция Николая Геннадиевича позволяла ему быстро вникать в любую новую проблему и находить пути её решения. Это касалось не только теоретической работы, но и экспериментальной, ведь свой первый молекулярный генератор (МГ) он запустил собственными руками (при помощи лишь одного радиотехника Никитина В.В.). В качестве примера можно привести помощь Н.Г. Басова молодому специалисту А.З. Грасюку в регулировке аппаратуры, которая позволила бы стабилизировать по МГ частоту задающего генератора передатчика [11, ч. 6, с. 193-195]. В том далёком 1961 г. Николай Геннадиевич не только помог ему выйти на нужный режим, но и стабилизировать его («Успех надо развить и закрепить!»), продемонстрировав такие замечательные качества как отзывчивость и доведение работы до конечного результата. И если по каким-либо причинам Н.Г. Басов не смог бы сам исполнить просьбу подчинённого, то в его стиле было быстро найти других людей, способных это сделать.

В 2000 г. по просьбе И.Н. Компанца – заведующего лабораторией оптоэлектронных процессоров Отделения КРФ и председателя программного комитета международной конференции по передовым дисплейным технологиям (ADT-2000) Н.Г. Басов договорился с космонавтом В.Н. Терешковой, в то время руководящей Российским центром международного научного и культурного сотрудничества при Правительстве РФ (Росзарубежцентр), о предоставлении помещений Дома дружбы с народами зарубежных стран на ул. Воздвиженка для проведения указанной конференции международного дисплейного общества (SID). Он же и открыл саму конференцию (Рис. 1.39).

Рис. 1.39. Н.Г. Басов открывает международную конференцию по передовым дисплейным технологиям ADT-2000. Правее: зам. председателя Российского отделения дисплейного общества (SID) И.Н. Компанец, представитель отделения в SID В.В. Беляев и создатель системы отображения информации в Центре управления полётами В.К. Самсонов

Николай Геннадиевич помогал сотрудникам не только в научных, но и в житейских делах. Наиболее значимыми из таких дел явились «пробивание» многих квартир для нуждающихся сотрудников в Москве, Самаре, Троицке, Долгопрудном, Пущино и строительство в 1977 г. 16-ти этажного жилого дома по ул. Зюзинской в Москве. Квартиры в нём получили не только сотрудники Отделения КРФ, участвовавшего в выполнении важного правительственного постановления, обеспечившего финансирование стройки, но и многие сотрудники других подразделений ФИАН. Помог Н.Г. Басов и в выделении в 1988 г. земли под строительство автостоянки около построенного дома, на которой и поныне размещаются 240 металлических гаражных боксов.

Будучи в 1962 г. избран в Академию наук СССР, Н.Г. Басов в 1967-90 гг. являлся членом Президиума АН СССР (РАН). Был также избран членом ряда зарубежных академий и научных обществ, имел их награды. С 1959 по 1991 г. состоял членом Комитета по Ленинским и Государственным премиям СССР в области науки и техники при СМ СССР, где с 1975 г. возглавлял секцию физики. В 1967-1978 гг. был Председателем комиссии ЦК ВЛКСМ по премиям Ленинского комсомола в области науки. С 1975 г. являлся членом Пленума ВАК при СМ СССР.

В 1971 г. Н.Г. Басов организовал издание сборника статей «Квантовая электроника», ставшего в 1974 г. научным журналом с тем же названием (издаются русская и английская версия, публикуемая под названием Quantum Electronics издательством «IOP Publishing Limited», Bristol, UK), и в течение 30 лет был его

главным редактором. В 1980 г. основал журнал «Journal of Soviet Laser Research», который затем стал называться «Journal of Russian Laser Research» (публикуется издательством Springer). В 1967-1990 гг. являлся главным редактором научно-популярного журнала «Природа».

Одновременно с научно-организационной деятельностью Н.Г. Басов занимал ответственные государственные посты и участвовал в общественной жизни страны. С 1961 по 1963 г. являлся депутатом Московского городского Совета. В 1965 г. был избран членом Советского Комитета защиты мира и членом Всемирного Совета Мира (Рис. 1.40). С 1974 по 1989 г. избирался депутатом Верховного Совета СССР (от Москвы) и был членом его Президиума. С 1977 г. являлся заместителем председателя, а в 1978-1990 гг. возглавлял Всесоюзное просветительское общество «Знание».

Рис.1.40. Беседа Н.Г. Басова с Лайнусом К. Полингом, лауреатом двух Нобелевских премий - по химии (1954) и мира (1962), а также международной Ленинской премии «За укрепление мира между народами» (1970). ФИАН, 1978 г.

Заслуги Н.Г. Басова перед отечественной и мировой наукой получили всеобщее признание СССР. Нобелевский лауреат был дважды удостоен звания Героя Социалистического Труда (в 1969 г. и 1982 г.), являлся лауреатом Ленинской (1959 г.) и Государственной (1989 г.) премий, награжден золотой медалью им. М.В. Ломоносова АН СССР и многими орденами и медалями страны.

### 1.4.3 МИФИ и подготовка кадров

Особое место в жизни Н.Г. Басова занимают МИФИ и подготовка кадров. Зимой 1946 г. был дополнительный набор студентов на только что организованный инженерно-физический факультет Московского механического института – ММИ (с 1953 г. – МИФИ), который размещался тогда в помещениях дома 21 по ул. Кирова (теперь снова Мясницкой). – Рис. 1.41. Для поступившего сюда Николая

Геннадиевича Институт стал родным домом [8], тем более что здесь в первый же год среди однокурсников он встретил свою будущую жену Ксению Тихоновну Назарову (по бабушке Басову!). Студенческие годы были очень тяжёлыми: жили в общежитии, которым служил огромный цех бывшего завода, спали на цементных фундаментах снятых станков. В таком общежитии было холоднее, чем на улице, а поэтому прямо тут же разжигали костры и грелись. Стипендии не хватало, и для подработки студенты ходили разгружать вагоны.

Рис. 1.41. Здание ММИ-МИФИ (бывший дом И.И. Юшкова),
в котором учился Н.Г. Басов

Все трудности скрашивала учёба. В те годы в институте преподавали мировые светила отечественной физики: Игорь Евгеньевич Тамм, Лев Андреевич Арцимович, Исаак Константинович Кикоин, Михаил Александрович Леонтович, Михаил Дмитриевич Миллионщиков и Евгений Львович Фейнберг, вскоре все ставшие академиками. Николай Геннадиевич вспоминал [8]: «Мы, студенты тех лет, с огромнейшим интересом следили за выдающимися открытиями и достижениями современной физики. Меня увлекала и восхищала эта наука. От законов Ньютона и Максвелла, открытия Рентгена и теорий Эйнштейна до современных теорий расщепления атомного ядра».

Военная служба и студенческая жизнь закалили Н.Г. Басова, а тяга к знаниям, учебные занятия, природный ум и нестандартное научное мышление способствовали его быстрому творческому росту. Всего лишь через 6 лет после окончания МИФИ в июне 1956 г. он уже защитил на заседании Учёного совета ФИАН докторскую диссертацию на тему «Молекулярный генератор», результаты которой стали отправной точкой развития квантовой радиофизики [9].

Подготавливая и реализуя с 1958 г. первую в СССР научную программу по исследованию возможности генерации и усиления электромагнитного излучения в ИК и оптической области спектра (лазерную программу), Н.Г. Басов понимал, что для её выполнения потребуются, причём в большом количестве,

квалифицированные кадры. Он способствовал постановке в ведущих физических вузах Москвы (физфак МГУ, МФТИ, МИФИ) учебных программ соответствующего профиля. Благодаря этому постепенно с середины шестидесятых годов дефицит кадров в области оптики, физики твёрдого тела и плазмы (с лазерным уклоном) начал снижаться и в семидесятые годы – годы наиболее бурного развития лазеров этот дефицит уже не ощущался так остро.

В 1963 г. Н.Г. Басов стал профессором МИФИ, часто бывал в альма-матер и организовал семинар по квантовой радиофизике для преподавателей и студентов старших курсов. На нём с докладами по актуальным темам периодически выступали ведущие сотрудники ЛКРФ ФИАН (Крохин О.Н., Ораевский А.Н., Попов Ю.М., Розанов В.Б. и др.) и кафедры №25 МИФИ (заведующий Быковский Ю.А., Проценко Е.Д., Жиряков Б.М., Ананьин О.Б. и др.), а также молодые исследователи факультета экспериментальной и теоретической физики МИФИ, специализирующиеся в области лазеров и их применений.

В МИФИ у Н.Г. Басова родилась идея, как эффективнее готовить научно - инженерные кадры для крупных научных и промышленных центров СССР и тем самым расширять географию лазерных исследований и применений, с одной стороны, а с другой стороны, как одновременно повысить качество подготовки специалистов с тем, чтобы их компетенции позволили бы им стать лидерами в своих исследованиях и разработках. Для решения такой задачи необходимо было объединение в единое целое трех составляющих: современной научной базы, мощной учебно-методической базы и способной, легко обучаемой молодежи [16]. Научной базой мог стать ФИАН, в научных лабораториях которого рождались и быстро развивались самые разнообразные идеи лазерной науки, а мощную учебно-методическую базу представлял МИФИ (с 1993 г. технический, с 2001 – государственный университет, с 2008 г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»). – Рис. 1.42.

Рис. 1.42. Главный корпус МИФИ (построен в 1962 г.)

В результате по инициативе академика Н.Г. Басова и ректора МИФИ профессора В.Г. Кириллова-Угрюмова 20 мая 1971 г. Приказом министра высшего и специального образования СССР В.П. Елютина и распоряжением президента Академии наук СССР академика М.В. Келдыша был создан Специальный факультет физики МИФИ, позднее переименованный в Высшую школу физиков (ВШФ) – Рис. 1.43. Основной задачей факультета являлась индивидуальная подготовка высококвалифицированных специалистов, способных успешно работать в новейших областях физики, развивать научный поиск и внедрять достижения в практику в вузах, НИИ и НПО. Специальный факультет физики имел двойное подчинение: по научной работе он входил в структуру ФИАН, а по учебной работе – в структуру МИФИ. Первым деканом спецфакультета был назначен профессор Быковский Ю.А.

Рис. 1.43. Логотип ВШФ

На спецфакультет зачислялись в порядке перевода одарённые студенты, имеющие образование в объеме двух с половиной курсов физических и физико-технических факультетов, проявившие склонность и способность к научно-исследовательской работе. Это выявлялось при собеседовании с ними представителей МИФИ и/или ФИАН, специально командируемых в первые годы для выявления таких студентов в областных и республиканских центрах. Учебная и научно-исследовательская работа студентов затем проходит в научных лабораториях МИФИ и ведущих институтов и центров РАН: ФИАН, а также Курчатовского центра и ОИЯИ (г. Дубна). Срок обучения составляет три года и включает пять учебных семестров, 21 неделю производственной практики и 15 недель дипломного проектирования. После окончания факультета выпускники получают диплом НИЯУ МИФИ государственного образца о высшем образовании. Формально они трудоустраиваются тем университетом, который их откомандировывал в МИФИ, но в большинстве случаев поступают в аспирантуру МИФИ или по месту выполнения дипломного проектирования.

ВШФ – это форма образования, ориентированная на использование всех преимуществ индивидуальной целевой подготовки (группы состояли из 8-10 человек) при тесном взаимодействии преподавателя и студента, научного руководителя и стажёра. Кроме сотрудников МИФИ, преподавателями в разные годы были сотрудники ОКРФ ФИАН Крохин О.Н., Ораевский А.Н., Попов Ю.М., Полуэктов И.А., Алексеев В.А., Величанский В.Л., Зубарев И.Г., Канавин А.П., Семенов А.С., Завестовская И.Н., Обучение велось по двум основным специальностям: «Физика конденсированного состояния вещества» и «Физика атомного ядра и частиц» с присвоением квалификации инженер-физик. В последние годы было открыто обучение и по другим специальностям, например, по специальности «Прикладная математика и информатика». В интересах Госкорпорации «Росатом» была также организована подготовка студентов по специальности «Безопасность и нераспространение ядерных материалов».

За 50 лет через систему ВШФ прошло более 1300 человек – представителей более 70 вузов России и стран СНГ. Около 70% из них имеют теперь ученые степени кандидата и доктора физико-математических наук, причём трое стали академиками и двое членами-корреспондентами РАН. Возраст выпускников ВШФ, защищающих диссертации, в среднем на 10 лет меньше, чем по России в целом. Выпускники ВШФ составляют ядро многих региональных научных и образовательных физических центров, к которым, например, относятся Самарский филиал ФИАН, научные школы Владивостока, Иркутска, Рязани. По единодушному мнению выпускников, работающих за рубежом в странах СНГ, система подготовки кадров в ВШФ МИФИ существенно лучше, чем в американских университетах. Высокий уровень подготовки, индивидуальное шефство крупнейших ученых позволили выпускникам ВШФ стать высококлассными специалистами в избранной области и в короткие сроки занять ведущее положение в своей области знаний.

Создание и реализация проекта «Высшая школа физиков НИЯУ МИФИ» отмечены премией Президента РФ в области образования за 2001 год. Высшей школе физиков присвоено имя ее основателя и научного руководителя академика Н.Г. Басова. Деятельность ВШФ получила высокую оценку Коллегии Минобразования и поддержку в рамках федеральной целевой программы «Интеграция». В настоящее время научное руководство Высшей школой физиков осуществляет академик РАН О.Н. Крохин, а руководит выпускница ВШФ д.ф.-м.н., профессор И.Н. Завестовская.

Идеи, заложенные Н.Г. Басовым в основу ВШФ - интеграция науки и образования, использование передовых научных достижений в образовательном процессе, привлечение ведущих ученых к чтению лекций и научному руководству – легли в основу концепции организованных в НИЯУ МИФИ в 2016 году Стратегических академических единиц, на базе которых ведется современная подготовка специалистов.

Н.Г. Басов был также инициатором создания в 1977 г. кафедры «Квантовая электроника» МИФИ (ныне «Лазерная физика») и оставался ее заведующим на протяжении 24 лет. Учитывая заслуги Н.Г. Басова в подготовке и воспитании научных кадров, Ученый совет МИФИ присвоил ему звание Почётного профессора.

В МИФИ чтут память своего знаменитого выпускника. В главном здании установлен бронзовый бюст Н.Г. Басова, а перед зданием сооружён бронзовый памятник работы скульптора А.А. Миронова (Рис. 1.44). Он представляет собой композицию, где Н.Г. Басов сидит на скамье, поддерживая модель созданного им первого мазера, и на этой же скамье оставлено свободное место для студента (студентки), желающего сфотографироваться вместе с Нобелевским лауреатом.

Рис. 1.44. Памятник «Выпускник МИФИ академик Н.Г. Басов
с моделью первого молекулярного генератора».

Институт магистратуры и Высшая школа физиков им. Н.Г. Басова НИЯУ МИФИ при поддержке Отделения КРФ ФИАН ежегодно проводят молодёжный конкурс научных работ им. Н.Г. Басова по оптике и лазерной физике. Победители конкурса участвуют с докладами в ежегодных «Басовских чтениях», организуемых в день рождения Н.Г. Басова 14 декабря в Отделении КРФ. Здесь же победителям вручаются Дипломы конкурса.

О роли Н.Г. Басова в привлечении талантов и научных кадров высочайшей квалификации могут сказать такие «говорящие» цифры: по работам, проводившимся в руководимом им коллективе лаборатории (отделения) квантовой радиофизики защищено 90 докторских диссертаций и более 50 сотрудников

удостоены звания лауреата самых престижных премий – Ленинской, Государственной СССР и РФ или премий Правительства РФ, а также именных премий и медалей РАН.

Жизнь и деятельность Николая Геннадиевича Басова – великого учёного и замечательного человека служит примером молодому поколению, побуждает его к осмыслению своей жизни и призывает к творческой деятельности.

### 1.4.4. Несколько штрихов к портрету гения

Уже прошло более двадцати лет, как Николай Геннадиевич 01 июля 2001 г. ушёл из жизни и был с почестями похоронен на Новодевичьем кладбище, однако, его личность и деятельность продолжают осмысливаться, учитывая его роль в развитии советской и российской физики и влияние сделанного им на жизнь современников и потомков.

Всего на полгода переживший Н.Г Басова его соратник А.М. Прохоров на траурном митинге в ФИАН рассказывал о Басове-студенте, пришедшем на практику в его группу [14]: «...и вдруг он начал ходить и говорить, что молекула - это устройство, как радиосхема. Она может усиливать, ещё что-то... Мы решили, что у него, понимаете, крыша поехала…». Впоследствии примерно о том же, но в других выражениях, говорила для телевидения сотрудница той же группы Н.А. Ирисова. Она хорошо знала обоих нобелевских лауреатов и утверждала, что «В паре Басов – Прохоров идеологическим лидером всегда был Николай Басов», а также называла его гением. Другой сотрудник Лаборатории колебаний (впоследствии ИОФРАН) д.ф.-м.н. В.В. Аполлонов статью о Н.Г. Басове так и озаглавил – «Гений, живший рядом» [17].

Сменивший Н.Г. Басова на посту директора ФИАН физик-теоретик академик Л.В. Келдыш тоже считал его мышление совершенно необычным (быть может, неожиданным) и высоко ценил это [14]. Сменивший Л.В. Келдыша на посту директора ФИАН физик-теоретик академик О.Н. Крохин, соратник и соавтор многих совместных с Н.Г. Басовым проектов и научных работ, попытался раскрыть «особенную логику мышления, которая идет не… от основ физики, изложенных в учебниках, к более сложным комплексным построениям, …а по противоположному пути - от конца». «По-видимому, Николаю Геннадиевичу свойственно по-своему строить модель явления, причем его видение зачастую бывает иным, чем у его коллег, и, вероятно, более сложным. С этим, можно полагать, связано то, что при обсуждении того или иного вопроса нам, его ученикам, иногда нелегко было сразу понять Николая Геннадиевича, поскольку, по-видимому, он считал, что слушатели уже мысленно прошли ту часть пути, которую он прошел сам» [18].

О.Н. Крохин также рассказывал [18, 19], что «Николай Геннадиевич был исключительно креативной личностью. Просто из него все идеи как из фонтана типа питерского Самсона выходили». «Главной чертой его натуры были пытливость и творческий подход к делу. Его ум постоянно рождал вопросы-загадки,

ответы на которые порождали новые идеи и открывали новые пути исследований или реализации новых задач». «Я уверен, что именно это качество профессионального характера Николая Геннадиевича является главной причиной появления необычайно ярких идей, которые наполняют его творческую биографию. Считают, что если из 10 идей или предложений реализуется хотя бы одна – это уже большой успех. У Н.Г. Басова коэффициент реализуемости гораздо выше».

От коллег О.Н. Крохина, работавших с Николаем Геннадиевичем в середине 50-х годов, пришла история, связанная с вопросом о ширине линии излучения мазера. «Николай Геннадиевич считал, что ширина линии при индуцированном усилении за счет регенерации в резонаторе может быть уже, чем естественная ширина линии перехода. ... Л.Д. Ландау, к которому Николай Геннадьевич ходил консультироваться, первоначально такую возможность отвергал. Это, казалось бы, напрямую вытекает из соотношения неопределенности. Однако впоследствии это явление нашло закономерное объяснение с привлечением принципа неразличимости молекул, влетающих в резонатор и покидающих его в определенном квантовом состоянии». [18].

Именно необычайные способности и упорство Н.Г. Басова позволили ему после почти пятилетнего военного отлучения от занятий физикой и математикой успешно пройти учебный курс МИФИ и уже через два с половиной года (осенью 1952 г.) подготовить вместе с А.М. Прохоровым доклад, в котором были впервые сформулированы основные положения теории молекулярного квантового генератора на молекулах аммиака, легшие в основу его докторской диссертации и заложившие фундамент отмеченных Нобелевской премией работ «в области квантовой электроники, которые привели к созданию на лазерно-мазерном принципе генераторов и усилителей излучения».

О.Н. Крохин, отмечая 95-летие Н.Г. Басова, вспоминал: «Когда только появились лазеры, Николай Геннадиевич предсказывал чуть ли не новую научно-техническую революцию, связанную с этим открытием. Многим тогда это казалось слишком большим преувеличением. Однако время доказало его правоту. Именно сейчас происходит интенсивное проникновение лазеров в современную технологию - от использования их в эндоскопических и глазных операциях до создания трансконтинентальных линий связи и интернета, от сверхточных измерений до компакт-дисков, лазерных принтеров и обработки материалов в машиностроении.» [19].

Лазеры, прочно вошедшие в нашу повседневную практику, являются главным осязаемым свидетельством значимости деяний Н.Г. Басова. Благодарные ученики и потомки чтут память гения. С 2001 г. Отделение КРФ ФИАН носит имя Н.Г. Басова. В 2001 году Высшей школе физиков НИЯУ МИФИ присвоено имя ее основателя и научного руководителя академика Н.Г. Басова. В Отделении КРФ и в ФИАН ежегодно проводится конкурс научных работ на премию им. Н.Г. Басова. В 2004 году в ФИАН установлен бронзовый бюст Н. Г. Басова работы скульптора Л.

М. Баранова (Рис. 1.45), являющийся уменьшенной копией памятника в г. Усмань - на родине учёного. С 2010 г. за выдающиеся работы в области физики Российской академией наук присуждается Золотая медаль имени Н.Г. Басова. В честь Н.Г. Басова 1 сентября 1993 года в каталоге астероидов под номером 3599 зарегистрирована малая планета *Basov*. Борт Airbus A320-214 VP-BLL авиакомпании «Аэрофлот» носит имя Н. Басова. В 2018 г. пересечение улиц Вавилова и Дмитрия Ульянова в Москве названо Площадью Академика Басова. В честь 100-летия уже выпущена памятная именная марка (Рис. 1.46). Специальным Указом Президента РФ о праздновании 100-летия со дня рождения выдающегося учёного учреждены (начиная с 2023 г.) пять персональных стипендий имени Н.Г. Басова для аспирантов ФИАН [20].

Рис. 1.45. Бронзовый бюст Н. Г. Басова работы скульптора Л. М. Баранова, установленный в ФИАН

Рис. 1.46. Почтовая марка России 2022 года, посвящённая 100-летию со дня рождения Н. Г. Басова

# Глава 2. РАЗВИТИЕ И ДОСТИЖЕНИЯ ЛАБОРАТОРИИ (ОТДЕЛЕНИЯ) КРФ В 70–90 ГОДЫ

## 2.1 Введение

В связи с бурным развитием работ по квантовой радиофизике и ростом числа сотрудников в лабораториях колебаний и КРФ руководство Института в 1976 г. приняло решение о реформировании единого ФИАН в федерацию трёх отделений:
– Отделение «А», в который вошли подразделения ЛК (его возглавил избранный в 1966 г. академиком АН СССР А.М. Прохоров, на правах зам. директора ФИАН);
– Отделение «Б», в который вошли подразделения ЛКРФ (его возглавил избранный в 1966 г. академиком АН СССР Н.Г. Басов – зам директора ФИАН с 1958 по 1972 гг. и директор Института с 1973 г. по 1989 гг.);
– Отделение «В», в который вошли остальные лаборатории ФИАН (на правах зам. директора ФИАН его возглавил крупный учёный в области ядерной физики и астрофизики профессор С.И. Никольский, лауреат Ленинской премии 1982 г. и член-корреспондент АН СССР с 1984 г.).

В последующем, после выхода в 1982 г. из состава ФИАН отделения «А» (на его основе был организован Институт общей физики, возглавляемый А.М. Прохоровым) и преобразования (группирования) других лабораторий в отделения ФИАН, Отделение «Б» с 1989 г. стало называться Отделением квантовой радиофизики (ОКРФ).

Развитые в ЛКРФ научные направления позволили создать научные группы, сектора и лаборатории, вошедшие в состав Отделения КРФ. Структурно Отделение стало состоять из трёх научных отделов: квантовой радиофизики, лазерного термоядерного синтеза и оптоэлектроники. Во вспомогательных подразделениях конструкторская и радиоэлектронная группы были преобразованы в отделы – конструкторский и радиоэлектроники.

Успешное развитие квантово-электронной тематики в отделении КРФ в 70–80-х годах позволило беспрецедентно увеличить, с одной стороны, объём решаемых научных задач, а с др. стороны, объём привлекаемых в ОКРФ и ФИАН финансовых средств и число штатных единиц. Они выделялись для ФИАН на основе подготавливаемых Н.Г. Басовым (вместе с ведущими сотрудниками) и выпускаемых Правительством СССР постановлений. Так, численность ОКРФ в эти лучшие для Отделения годы возросла до 600 человек и включала около 400 научных сотрудников, в том числе 32 доктора и около 100 кандидатов наук. Был построен и передан в 1977 г. в эксплуатацию жилой дом на ул. Зюзинской в Москве, в который въехали семьи сотрудников не только ОКРФ, но и др. отделений ФИАН. Много квартир было также предоставлено в г. Троицке проживающим там сотрудникам ФИАН, работающим на московской и троицкой площадках.

В 1971 г. четырёхэтажный корпус ЛКРФ (корпус №1) был надстроен до пятиэтажного, и одновременно к нему вдоль ул. Вавилова было пристроено новое 5-этажное строение, включающее, в основном, лабораторные помещения примерно в таком же количестве, как и в корпусе №1. Общая площадь помещений составила почти 8 тысяч кв. метров. На 5-ом этаже разместились отделы радиоэлектроники и конструкторский, а также редакция журнала «Квантовая электроника». Дополнительно к этому строению со стороны, обращённой внутрь ФИАН, было построено отдельное специализированное помещение в виде большого куба с целью размещения в нём экспериментальной установки для исследований по лазерному термоядерному синтезу. В 1986 г. к корпусу №1 ЛКРФ со стороны ул. Ляпунова (вдоль неё) было пристроено семиэтажное здание, где на площади 6 тысяч кв. метров разместились дополнительные лабораторные и офисные помещения для работы сотрудников ОКРФ и частично других подразделений ФИАН.

Ниже излагаются основные достижения отделов и лабораторий ОКРФ в 70 – 90-х годах прошлого столетия. Достижения сгруппированы по трём главным научным направлениям, устоявшимся в течение всей 60-летней истории ОКРФ: по лазерной физике (квантовой радиофизике в прежней терминологии); по физике лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и по оптоэлектронике (ОЭ). Соответственно, по мере развития лаборатории КРФ и далее Отделения КРФ их структурными подразделениями становились секторы КРФ, лазерной плазмы и оптоэлектроники, состоящие из научных групп, затем лаборатории КРФ, лазерной плазмы и оптоэлектроники, состоящие из секторов и групп, и далее отделы КРФ, ЛТС и ОЭ, состоящие из лабораторий и секторов. Опять же, по мере развития ОКРФ и требований времени руководством принимались решения о формировании в рамках научных направлений новых подразделений и/или объединении их, об изменении тематики и названия. Например, в разные годы в отделе КРФ появились сектор теоретической радиофизики и лаборатории газовых лазеров, химических лазеров, применения лазеров, стандартов частоты, нелинейных оптических явлений, фотохимических процессов, фотоники молекул, лазерной хирургии, рентгеновской оптики, Крымская научная станция (на правах лаборатории); в отделе ЛТС – секторы теории лазерной плазмы, теории взаимодействия излучения с веществом, лазерно-плазменной физики высоких энергий и лаборатории диагностики плазмы, лазеров для ЛТС; в отделе ОЭ – лаборатории инжекционных лазеров, полупроводниковых лазеров с электронной накачкой, оптоэлектронных процессоров, сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации.

В данном разделе достижения ОКРФ приводятся по подразделениям – отделам, лабораториям, секторам в рамках структуры, существовавшей в 2000 г. Информация о деятельности ОКРФ, главным образом, основывается на отчётах лабораторий, которые ежегодно собирал ученый секретарь лаборатории (затем отделения) КРФ В.А. Сауткин,

## 2.2 Лазерные исследования в Отделе КРФ

Формально отдел образован в 1985 году, но основы научных направлений были заложены еще в годы образования и становления лаборатории КРФ (раздел 1.3). Заведующим отделом КРФ являлся лауреат Нобелевской, Ленинской, Государственной премий академик Н.Г. Басов. Исследования выполнялись в девяти лабораториях и в секторе теоретической радиофизики.

В отделе в период 70 – 90-х гг. разрабатывались мощные лазеры, включая лазеры, предназначенные для технологий, медицины, фотолитографии, лазерной микроскопии, а также лазеры ультракоротких импульсов для изучения взаимодействия излучения с веществом и протекания сверхбыстрых процессов в сложных молекулах. Велись активные исследования нелинейно - оптических процессов, включая предложенный и развитый в отделе метод обращения волнового фронта света, с целью разработки сумматоров и компрессоров лазерного излучения для увеличения плотности энергии и яркости. Разрабатывались принципы наведения и самонаведения лазерного луча на мишень.

### 2.2.1 Сектор теоретической радиофизики (СТФ)

Сектором с 1982 г. заведовал лауреат Ленинской премии, д.ф.-м.н., профессор А. Н. Ораевский (1934–2003 гг.) – Рис. 2.1 и 2.2. В нём исследовались: динамика нелинейных систем и фотохимических реакций, физика газовых, газодинамических и эксимерных лазеров, квантовая и рентгеновская оптика.

Рис. 2.1. Н.Г. Басов и А.Н. Ораевский (выступает на собрании в ОКРФ)

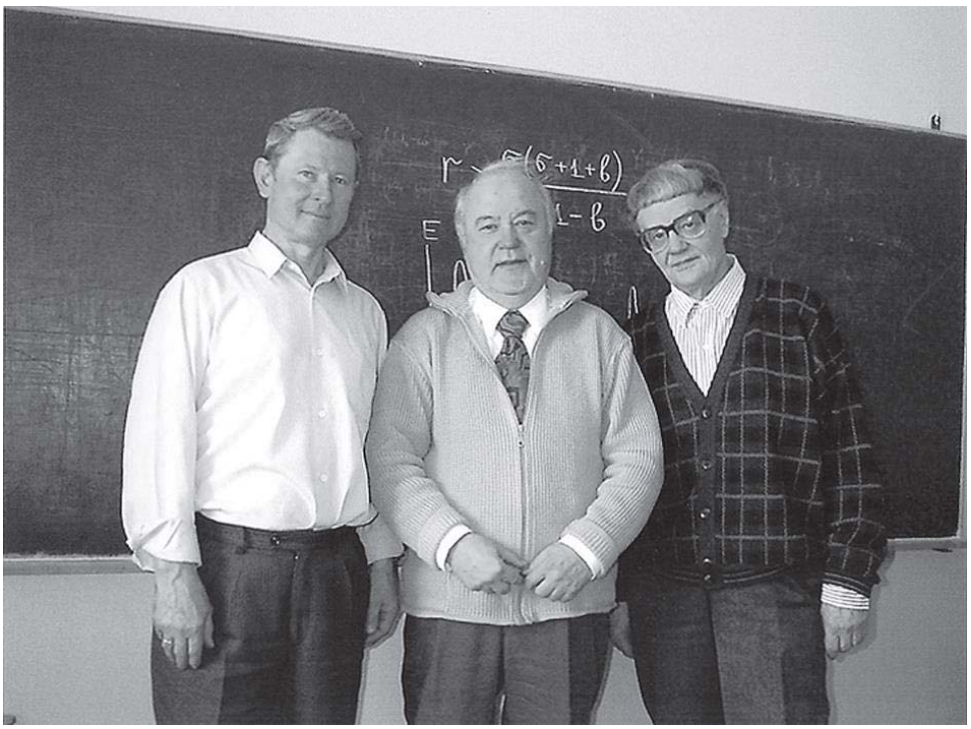


Рис. 2.2. И.Г. Зубарев, А.Н. Ораевский, А.З. Грасюк (слева направо)

В 70–80-х годах в секторе развит фотохимический метод возбуждения активных газовых сред, который привел к созданию нового класса молекулярных лазеров, перекрывающих своим излучением ближний ИК, видимый и УФ диапазоны спектра. Была развита теория газодинамических лазеров и предложен вариант газодинамического лазера с наиболее высоким КПД, основанный на смешении горячего и холодного потоков, показана возможность применения молекулы CO и ряда других компонент в газодинамических лазерах.

Был впервые детально измерен спектр генерации лазера на цепной реакции в смеси молекулярных водорода и фтора и показано, что эта реакция имеет развитую хемолазерную цепь. Была продемонстрирована возможность эффективного инициирования реакции путем фотолиза молекул фтора ультрафиолетовым излучением импульсных ламп. Важной вехой на пути создания мощных химических лазеров импульсного действия явилась работа 1972 года, в которой впервые удалось осуществить генерацию в смеси $D_2$+$F_2$+CO с большим удельным энергосъемом при высоком (атмосферном) давлении.

Работы по химическим лазерам были удостоены в 1984 г. Ленинской премии, и лауреатами стали Ораевский А.Н. и Маркин Е.П. (Рис. 2.3).

В 80-х годах в секторе был также выполнен большой объем исследований, направленных на достижение предельно малой расходимости излучения лазеров за счет использования обращения волнового фронта (Рис. 2.4). Совместно с лабораторией нелинейно-оптических явлений предложена, обоснована и реализована новая схема обращения волнового фронта: ОВФ-генератор – ОВФ-усилитель. На основе модельного эксперимента с девятью пучками показано, что

она является перспективной для использования в многоканальных лазерных системах. Показано, что динамический диапазон отражения сигнальной волны при ОВФ методом четырехволнового взаимодействия на длине волны 10,6 мкм составляет не менее $10^7$ Вт. Экспериментально обнаружены эффект поворота обращенной волны при квазивырожденном четырехволновом взаимодействии и эффект поперечного вынужденного рассеяния света в активной среде. За эти работы в 1983 г. сотрудник сектора Зельдович Б.Я. в составе авторского коллектива (см. раздел 2.2.3) был удостоен Государственной премии СССР.

Рис. 2.3. Е.П. Маркин настраивает кольцевой лазер – прообраз лазерного гироскопа

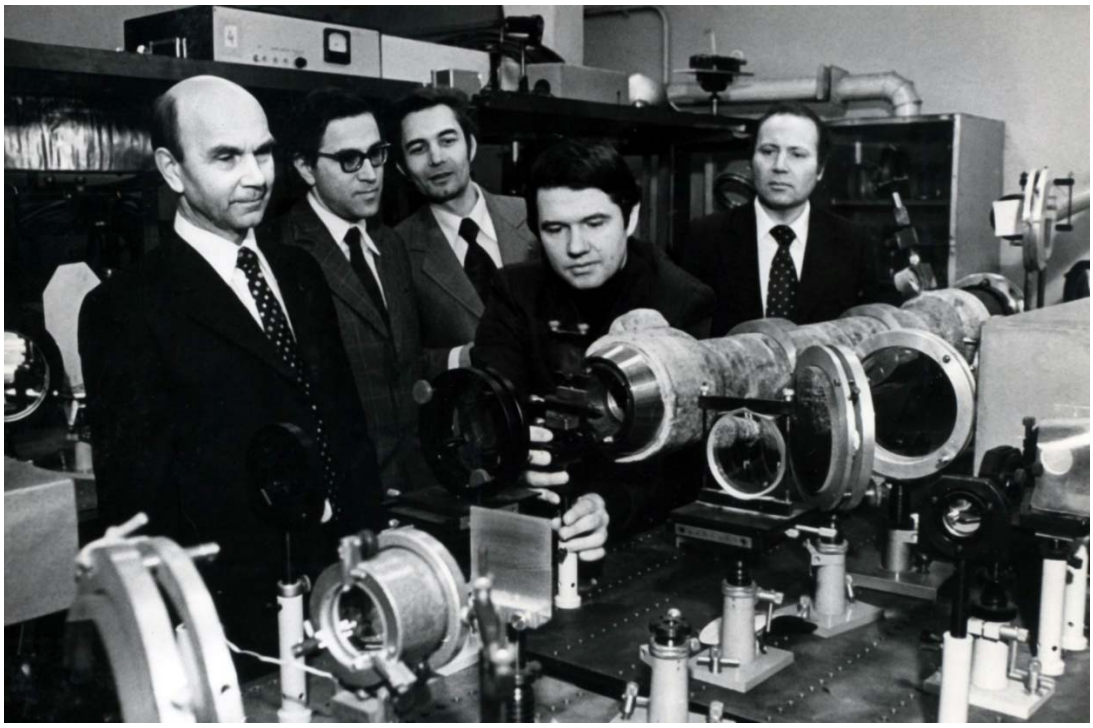


Рис. 2.4. Участники работы по обращению волнового фронта (слева направо): Ф.С. Файзуллов, Б.Я. Зельдович, В.В. Рагульский, О.Ю. Носач, В.И. Поповичев

Показана возможность создания лазера с высоким КПД на водородосодержащих молекулах и предложена схема его реализации. Развита теория резонансного взаимодействия лазерного излучения с молекулами с учётом нелинейного взаимодействия колебательных мод. Разработана теория взаимодействия лазерного излучения (поток $10^7$ – $10^9$ Вт/см$^2$) с металлическими мишенями, а также показана перспективность использования лазерного излучения с потоками в $10^6$ Вт/см$^2$ и более в медицинской практике, например, для удаления малых участков биологических тканей без теплового поражения смежных участков.

Развита теория усиления поверхностных электромагнитных волн на основе структур МДПДПДМ с целью создания когерентных излучателей в широком диапазоне длин волн (Беленов Э.М., Усков А.В.) – Рис. 2.5. Установлено, что при воздействии на металлическую нейтральную проводящую мишень пространственно когерентным лазерным пучком с УВЧ- модулированной интенсивностью возникают УВЧ- токи с частотой модуляции лазерного пучка.

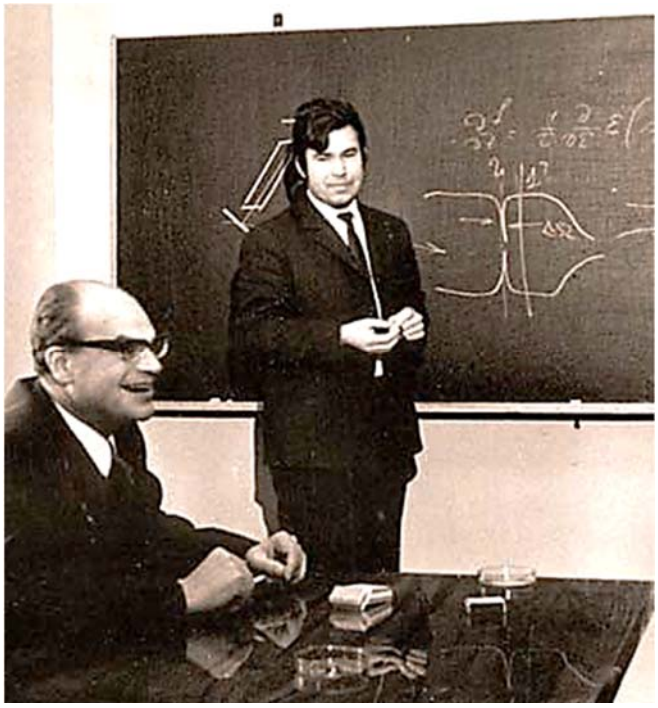


Рис. 2.5. Н.Г. Басов и Э.М. Беленов

Предложен, теоретически обоснован и экспериментально осуществлен новый тип лазеров на растворах сложных органических соединений, работающих в режиме волны обесцвечивания, когда зона возбуждения и генерации перемещается по оптически толстому слою активного вещества из-за превращения поглощающих молекул в прозрачный для света накачки продукт. С возбуждаемого объёма 50 см$^3$ за 15 мкс получена энергия генерации 2,5 Дж в спектральном диапазоне 517±3 нм. Для создания высокостабильных стандартов частоты и спектроскопии высокого

разрешения предложено несколько новых методов получения потоков холодных атомов и молекул. В их основе лежит использование процессов: резонансной фотодиссоциации ван-дер-ваальсовских (ВдВ) комплексов (с энергией связи ≤ 0,1 эВ на молекулу), резонансной фотодесорбции и акустодесорбции адсорбированных молекул, связанных с криоповерхностью слабой ВдВ связью.

На рубеже 80-х и 90-х годов Беленовым Э.М. (Рис. 2.5) теоретически исследованы процессы распространения электромагнитных импульсов в сверхпроводящих джозефсоновских планарных структурах. Прослежена аналогия с распространением импульсов света в двухуровневой среде. Расчеты показали возможность реализации на основе джозефсоновских структур генераторов ультракоротких импульсов перестраиваемой частоты. На основе аналогии между явлением сверхпроводимости и лазерной генерацией излучения разработан подход к исследованию нелинейной динамики сверхпроводника и получена система уравнений, на основе которой можно исследовать существенно нестационарные процессы в сверхпроводниках и прогнозировать новые динамические режимы. Для описания слоистых сверхпроводниковых структур предложена модель с комплексным коэффициентом связи между слоями. Показано, что параметр порядка в таких структурах может заметно превышать параметр порядка однородного сверхпроводника. В сверхпроводниках с волокнистой структурой можно ожидать увеличения параметра порядка примерно вдвое по сравнению со слоистыми сверхпроводниками.

Молчановым А.Г. (Рис. 2.6) проведено теоретическое исследование усиления цугов пикосекундных импульсов в активной среде широкоапертурного KrF-лазера с учетом эффектов усиленного спонтанного излучения.

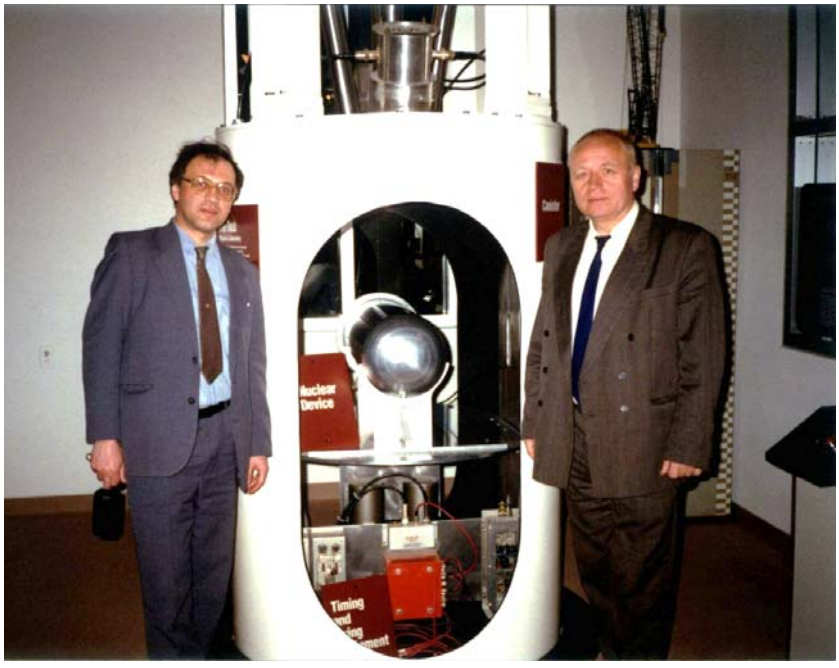



Рис. 2.6. С.Ю. Гуськов (слева) и А.Г. Молчанов. США, 1995 г.

Показано, что для интервалов между импульсами в цуге короче 2 нс эффективность извлечения энергии из среды достигает 50 %, т. е. такой же величины, что и в KrF-лазерах микросекундной длительности. Это обстоятельство открывает возможность использования таких лазеров для генерации отдельных импульсов с энергией килоджоульного масштаба, с длительностью от 0,1 до I нс и КПД свыше 5 %.

В секторе предложен и разработан новый способ выращивания алмаза из графита в камере высокого давления (~20 ГПа), при котором лазерное излучение нагревает скин-слой графита до температур, достаточных для его превращения в алмаз. Вследствие больших градиентов температуры в скин-слое и высокой теплопроводности алмаза происходит быстрое охлаждение слоя и превращение его в прозрачный для лазерного излучения алмаз. Следующий лазерный импульс нагревает следующий слой непрозрачного графита и превращает его в прозрачный алмаз и т.д. На предложенный метод выращивания алмаза автором изобретений – Молчановым А.Г. получены патенты в США и Франции.

В 90-х годах в секторе экспериментально исследована фотолюминесценция квантовой ямы Al/GaAs, легированной атомами элементов переходной группы: титана, ванадия, хрома. Обнаружен нелинейный характер зависимости люминесценции квантовой ямы от интенсивности возбуждающего излучения. Показано, что легирование квантовой ямы атомами переходной группы улучшает однородность люминесцентных характеристик квантовой ямы (по площади образца), что представляет интерес для создания на основе квантовых ям различного типа излучателей (Ораевский А.Н., Стародубцев Н.Ф., Казарян С.А.). Развита динамическая модель полупроводникового лазера и найдено фундаментальное ограничение на усиление в нём субпикосекундных импульсов, обусловленное разогревом носителей и спектральным выгоранием.

Отдельно следует сказать об инициированных Н.Г. Басовым и имеющих долгосрочную перспективу работах сектора в области создания рентгеновской оптики и рентгеновских лазеров. Исследования начались в середине 70-х годов под руководством д.ф.-м.н. Собельмана И.И. Были определены две главные проблемы: активная среда, которая требовала небывало высокого темпа вложения энергии, и резонаторы, требовавшие материалов, оптические свойства которых не существовали даже в теории. В 1977 г. Виноградов А.В. и Зельдович Б.Я. опубликовали статью, открывшую принципиальную осуществимость создания многослойных рентгеновских зеркал в ВУФ и рентгеновском диапазонах длин волн (до этого имелось лишь предположение о такой возможности, высказанное американцем Э. Шпиллером в сообщении на Международной конференции по космическим исследованиям в 1972 г.).

В 80-х гг. благодаря работам группы Виноградова А.В. (Рис. 2.7), были созданы покрытия, содержащие большое число слоев нанометровой толщины, что позволило совершить качественный переход от рентгеновской отражательной оптики скользящего падения к зеркалам и изображающим системам нормального

падения. В результате существенно возросло пространственное и спектральное разрешение и открылись новые сферы применения мягкого рентгеновского излучения в физике, материаловедении, микроскопии, астрономии, диагностике плазмы и технологии. На этой основе созданы широкоапертурный рентгеновский микроскоп субмикронного разрешения и коммерческий образец миниатюрного рентгеновского спектрометра. Они использованы для обнаружения дефектов пропускающих дифракционных решеток и трековых полимерных мембран. Выполнены контракты на поставку рентгеновских микроскопов в лаборатории Швеции, США, Англии и Японии. Совместно с Отделением ФТТ ФИАН разработан оригинальный двухволновой рефлектометр для контроля полупроводниковых пластин и дисков памяти, защищённый патентами в России и за рубежом.

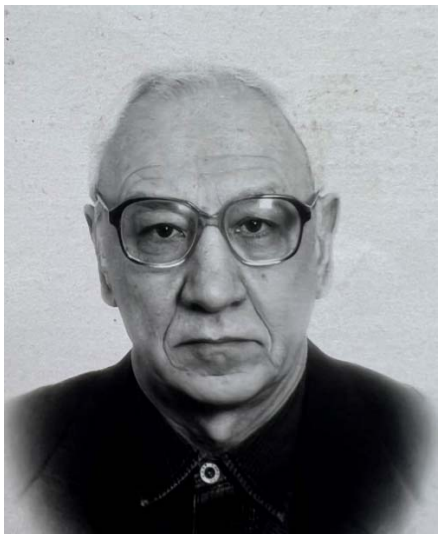


Рис. 2.7. А.В. Виноградов

Были предложены новые схемы резонансной фотонакачки рентгеновских лазеров, которая является наиболее перспективным методом накачки лазеров на плазме 2-пинчей и имеет следующие преимущества: универсальный механизм накачки, наименьшую электронную плотность в активной среде (для устранения проблем рефракции) и квазистационарную инверсию. Исследованы свойства многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) с нетрадиционным составом и структурой: предложены новые комбинации материалов для изготовления короткопериодных МРЗ с коэффициентами отражения до 90%; рассмотрены двухпериодные МРЗ, позволяющие одновременно отразить две произвольные длины волны; рассчитаны параметры зеркал с высокой тепловой и радиационной стойкостью, пары материалов для которых выбираются, исходя из принципа термодинамического равновесия на границах раздела сред. Совместно с Харьковским политехническим институтом реализован эффект Брэгга на искусственных структурах с периодом 6 ангстрем. Полученные результаты предсказывали коэффициент отражения 15-20% при нормальном падении на длине волны 11-12 ангстрем.

В конце 90-х годов выполнен цикл фундаментальных работ (Виноградов А.В., Успенский Ю.А.) по исследованию оптических свойств переходных 3d – металлов в области энергий фотонов 15 -50 эВ. Найдены и освоены материалы многослойных покрытий для зеркал в ультрамягкой области спектра (35 – 50 нм). Разработаны и испытаны эффективные многослойные зеркала на основе Sc/Si для ультрамягкого рентгеновского диапазона (длина волны 46,9 нм) с коэффициентом отражения > 50%. С использованием этих зеркал создана и испытана рентгенооптическая система для фокусировки излучения компактного частотного рентгеновского лазера, позволившая получить плотность потока порядка $10^{11}$ Вт/см$^2$. Совместно с Университетом штата Колорадо (США) проведены эксперименты по интерферометрии плазмы, рентгеновской рефлектометрии полупроводниковых материалов и определению оптических констант материалов на длине волны 46,9 нм. Используя результаты этих работ, впервые созданы и испытаны высокоотражающие зеркала для управления когерентными пучками, получаемыми в разрядных лазерах мягкого рентгеновского диапазона (25 эВ) и при генерации высоких гармоник (33 эВ) мощными ультракороткими импульсами лазеров видимого диапазона. Работы по использованию зеркал, созданию новых методов и приборов в области материаловедения и по дальнейшему продвижению лазеров в коротковолновый диапазон велись совместно с университетами Швеции и США.

В обеспечение работ по рентгеновской оптике были развиты исследования сверхгладких поверхностей и тонких пленок на нанометровом уровне. Сравнение с современными микрозондовыми методами (AFM, WYKO) показало, что метод рентгеновского рассеяния гарантирует необходимую точность (около 0,1 нм по высоте шероховатости) и поле зрения около 5 см$^2$. Это позволяет контролировать непосредственно оптические элементы, а не специально приготовленные образцы.

В рентгеновской спектроскопии предложено использовать новые дифракционные решетки, изготавливаемые путем среза многослойных структур. Такие решетки обладают уникальным набором параметров - дисперсия, дифракционная эффективность, переменный период - открывающих возможность создания малогабаритных приборов для лабораторных и космических применений. Испытания показали, что регулярность периода многослойника и качество среза позволяют обеспечить высокое спектральное разрешение. Спектрометры с подобными решетками используются в ФИАНе и в Институте физических проблем РАН. Создан коммерческий образец миниатюрного рентгеновского спектрометра. Создана и испытана 2-х зеркальная рентгенооптическая система на основе многослойного отражающего покрытия Sc/Si для фокусировки излучения компактного частотного рентгеновского лазера на длине волны 469 А.

С помощью рентгеновского микроскопа с рабочей длиной волны 20 нм получены рентгеновские изображения трековых мембран. При этом высокое пространственное разрешение созданной рентгенооптической системы позволило увидеть фильтрационные каналы размером менее 0,2 мкм. Разработана теория

взаимодействия рентгеновского излучения с шероховатой многослойной структурой и методика исследования шероховатостей тонких пленок толщиной несколько нанометров.

Многие найденные в ОКРФ решения проблем рентгеновской оптики: лазерная плазма, как активная среда, и многослойные отражатели, как элементы резонаторов и фокусаторов лазерных пучков, использовались затем во всех странах в течение многих десятилетий. а многослойная рентгеновская оптика начала производиться коммерчески для научных и промышленных применений. В настоящее время она является важным элементом технологии компьютерных чипов последнего поколения.

Виноградов А.В. за создание многослойной оптики мягкого и ультрамягкого рентгеновского диапазона длин волн был удостоен в 1991 г. Государственной премии СССР.

Параллельно с работами по рентгеновской оптике по инициативе Н.Г. Басова в ОКРФ были развёрнуты исследования по рентгенолитографии, которым он придавал важное практическое значение. Эксперименты по использованию излучения лазерной плазмы в рентгенолитографии уже проводились с 1979 г. в МИФИ под руководством его соратника – декана Специального факультета физики Ю.А. Быковского. С 1982 г работы по этой тематике стали выполняться специально организованной группой Автономова В.П. в лаборатории лазерной плазмы. В 1987 г. Н.Г. Басов представил в ДАН статью Виноградова А.В. и Зорева Н.Н. с предложением использовать проекционную рентгеновскую литографию на основе многослойной оптики для кардинального повышения степени интеграции (числа элементов) серийных интегральных схем.

В конце 80-х – начале 90-х годов в нашей стране и за рубежом к этому направлению подключилась промышленность. В ОКРФ работы велись под руководством Артюкова И.А. совместно с заводом «Ангстрем», г. Зеленоград. Однако, несмотря на очевидное преимущество коротковолнового излучения в производстве чипов с минимальными размерами элементов, промышленное освоение рентгеновских технологий долгое время оставалось неактуальным, так как производство, основанное на использовании коротковолнового излучения (вначале УФ линий в разряде ртути, а с 1984 г. излучения эксимерных лазеров на основе KrF и затем ArF), совершенствовалось без существенных изменений в оптических технологиях. Новая технология с использованием рентгеновского излучения, определяющая современный уровень микроэлектроники, требовала новых материалов, оборудования, физико-химических процессов и больших финансовых вложений и была освоена промышленностью только в 2012 – 2015 гг.

Сказанное подтверждает удивительную прозорливость Н.Г. Басова, стоявшего у истоков работ по физике лазерной плазмы, эксимерных лазеров и по многослойной рентгеновской оптике, нашедших впоследствии широкое применение в рентгеновской литографии (EUVL). Заметим, что аббревиатура EUV

означает экстремальный ультрафиолет, и введена в 1993 г. во избежание связанных со словом «рентген» ассоциаций.

Из сотрудников сектора теоретической физики, кроме упомянутых Ораевского А.Н., Зельдовича Б.Я. и Виноградова А.В., высоких правительственных наград за свою работу были также удостоены д.ф.-м.н. Беленов Э.М. (Государственная премия СССР в 1978 г. в составе коллектива, создавшего электроионизационные лазеры – см. Рис. 1.21) и д.ф.м.н. Алексеев В.А. (Государственная премия Российской Федерации в 1998 г. за теоретические работы в области оптических стандартов частоты – Рис. 2.8).

### 2.2.2 Лаборатория газовых лазеров (ЛГЛ)

ЛГЛ по существу выросла из Лаборатории мощных газовых лазеров (ЛМГЛ), созданной в 1983 г. на базе научной группы, а потом и сектора, возглавляемого лауреатом Государственной премии СССР д.ф.-м.н., профессором В.А. Данилычевым (Рис. 1.21), который и стал заведующим ЛМГЛ. В 1987 году ЛМГЛ была преобразована в Лабораторию газовых лазеров, которой со времени ее образования руководил лауреат Государственной премии СССР д.ф.-м.н., Сучков А.Ф. (1939-1996 гг.) – Рис. 1.21 и 2.9).

Рис. 2.8. В.А. Алексеев

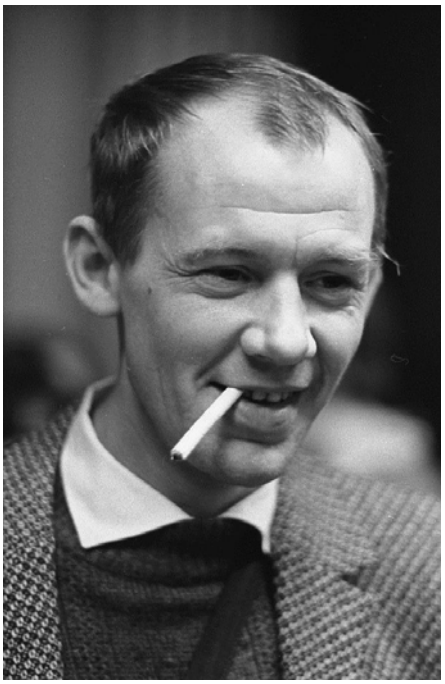


Рис. 2.9. А.Ф. Сучков

В 1996 г. заведующим ЛГЛ стал д.ф.-м.н., профессор А.А. Ионин. Основными направлениями исследований в обозреваемый период времени являлись разработка, исследование и применение мощных газовых лазеров – молекулярных, атомарных и эксимерных (и лазерных систем на их основе) с накачкой электронным пучком, самостоятельным и электроионизационным

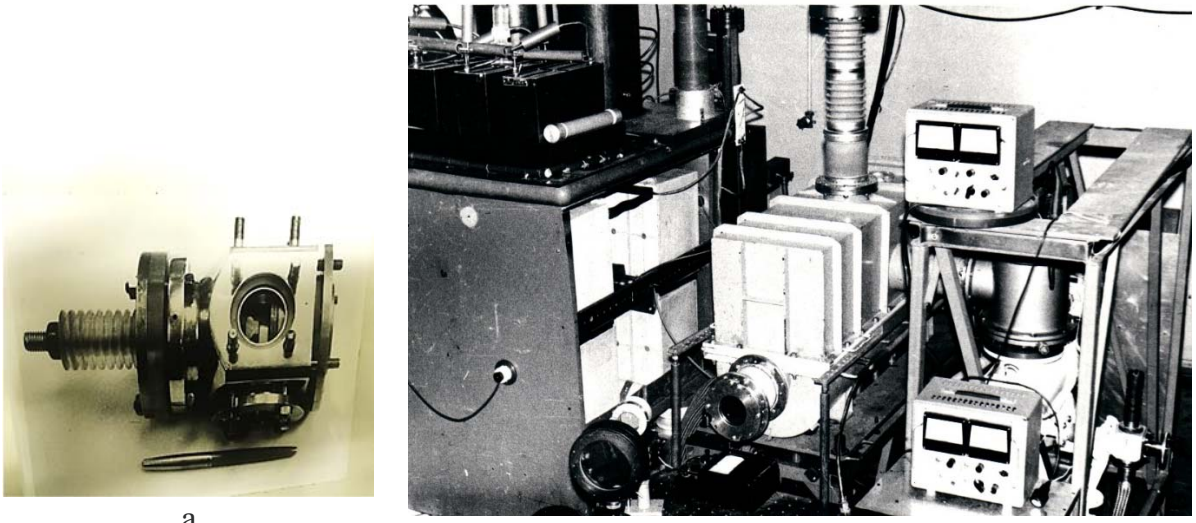
разрядом, с оптической накачкой, генерирующих мощное когерентное излучение в средней ИК- ($CO_2$, CO, $N_2O$, $NH_3$-лазеры), в видимой и ближней ИК- (лазеры на инертных газах), и в УФ- ($Xe_2$, KrF-лазеры) областях спектра.

Основное внимание уделялось лазерам, в которых для их накачки в той или иной степени применялся электронный пучок. Исторически такое развитие исследований можно объяснить наличием экспериментальной базы в научной группе Данилычева В.А., ранее занимавшейся полупроводниковыми лазерами с накачкой электронным пучком, и, конечно, новыми идеями его и коллег. Еще до возникновения ЛГЛ в этой группе в 1970 г. был запущен первый эксимерный лазер. Для его накачки применялся электронный пучок. Лазер, активной средой которого являлся димер $Xe_2$, образующийся под воздействием пучка в жидком ксеноне, генерировал в спектральной области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) на длине волны $\lambda$=175 нм. По утверждению Молчанова А.Г. (КЭ, 2003г.) «можно с уверенностью сказать, что наблюдавшаяся в 1970 г. в лаборатории Н.Г.Басова генерация проходила сразу на нескольких типах эксимеров, включая эксимеры $Xe_2$* в газе». Однако на этот факт в 1970 г. не обратили внимание и приоритет был отдан США, где эксимерный лазер на сжатом ксеноне заработал двумя годами позже.

В 1971 г. Н.Г. Басов предложил совместно с Беленовым Э.М., Данилычевым В.А. и Сучковым А.Ф. (Рис. 1.21 и 2.9) новый тип мощного электроразрядного лазера на углекислом газе, получивший в дальнейшем название в русскоязычной научной литературе электроионизационного (ЭИ). Накачка этого лазера была комбинированной: количество электронов в разряде контролируется электронным пучком, а энергия для возбуждения молекул вкладывается за счет ускорения электронов во внешнем электрическом поле. Несамостоятельный электрический разряд, возникающий в этом случае, свободен от обычных для самостоятельных разрядов ограничений по объему и давлению газа. Это обстоятельство позволило однородно возбуждать большие объемы газа при высоких давлениях. В ЭИ лазерах достигаются предельно высокие значения удельного энергосъема и КПД, и появляется возможность перестройки частоты за счет широкой полосы усиления, обусловленной высокой плотностью газа.

Следует отметить, что активный объем первого ЭИ лазера (Рис. 2.10а) составлял всего 6 $см^3$, объем камеры - ~10x10x10 $см^3$, а рабочее давление могло достигать ~100 атм (опубликовано 60 атм). Уже через два года в Отделении КРФ был создан импульсный 10-литровый $CO_2$ лазер с энергией импульса излучения 1 кДж (Рис. 2.10б). Создателям ЭИ и электронно-пучковых лазеров Беленову Э.М., Данилычеву В.А., Ковшу И.Б., Попову Ю.М., Сучкову А.Ф. в 1978 г. была присуждена Государственная премия СССР. В этих работах также активное участие принимали Керимов О.М., Ионин А.А., Соболев В.А. (Рис. 1.22) и Долгих В.А. выдвинутые на премию Ленинского комсомола. Экспериментально была продемонстрирована возможность использования плазменного зеркала ЭИ $CO_2$-лазера в качестве источника мягкого рентгеновского излучения для

рентгенолитографии. В качестве альтернативы $CO_2$ лазеру был предложен и реализован электроионизационный $N_2O$ лазер (λ~10,9 мкм) с энергией 100 Дж. Показано, что замена азота на окись углерода в газовых рабочих смесях этого лазера более чем на порядок увеличивает энергию генерации и КПД.



а б

Рис. 2.10. Первый электроионизационный $CO_2$ – лазер (1971 г.) (а) и электроионизационный $CO_2$ и CO лазер с энергией излучения в импульсе до 1 кДж (1974 -1976 гг.) (б)

Под руководством лауреата премии Ленинского комсомола Васильева Б.И. $CO_2$ лазер был эффективно использован для оптической накачки $NH_3$ лазера. Этот лазер действовал в спектральном диапазоне ~11–14 мкм, соответствующем полосам поглощения многих вредоносных фреонов. Разработана конструкция двухчастотного лидара, использующего излучение частотно-селективного $CO_2$ лазера в качестве опорного луча и перестраиваемое по частоте излучение $NH_3$ лазера в качестве зондирующего луча. Было продемонстрировано, что лидар, действующий в диапазоне длин волн ~9–14 мкм, может быть использован для дистанционного обнаружения источников выбросов фреонов и других загрязнителей атмосферы с концентрацией ~1 ppt. Обсуждался мобильный вариант такого лидара с весогабаритными характеристиками 300 кГ и 2,5x1,7x1,3 $м^3$, расположенного в минивэне.

Наряду с ЭИ $CO_2$ и $N_2O$ лазерами в ОКРФ интенсивно развивались исследования ЭИ лазеров на окиси углерода - CO лазеров. Была продемонстрирована работа криогенного CO лазера при плотности лазерной смеси до 10 Амага. |На основе детального исследования спектрально-временных характеристик усиления и генерации в импульсном ЭИ CO- лазере удалось существенно усовершенствовать теоретическую модель такого лазера и впервые обеспечить удовлетворительное согласие теории и эксперимента по ряду его параметров. Получило развитие новое направление в физике мощных лазеров – создание и исследование мощных и высокоэффективных многокаскадных

лазерных систем на окиси углерода и был внесен фундаментальный вклад в понимание особенностей усиления многочастотного излучения CO лазера в многоуровневой активной среде с каскадными переходами. В криогенном CO-лазере на основных колебательных переходах (диапазон длин волн ~5–6 мкм) в режиме свободной генерации первоначально была достигнута энергия импульса излучения 400 Дж (лазер на Рис. 2-10), а позднее 800 Дж (лазер на Рис. 3.5). и в лазере на обертонных переходах (2,5 – 4,2 мкм) – около 50 Дж (Рис. 3.5). Получены субмикросекундные импульсы CO-лазера с КПД около 5%. Сложности криогенного охлаждения при помощи жидкого азота были преодолены переходом к сверхзвуковому охлаждению, в результате чего в ОКРФ был создан CO-лазер с пиковой мощностью 100 кВт (длительность излучения ~1 мс).

Исследования импульсных ЭИ $CO_2$ - и CO- лазеров явились научным фундаментом для разработки в 70 - 80-х годах $CO_2$- и CO-лазеров, действующих в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. В ряде отраслевых организаций (в СНИТИ, г. Свердловск - в настоящее время УралНИТИ, г. Екатеринбург, на Калужском турбинном заводе) под научным руководством Басова Н.Г. и Данилычева В.А. были разработаны технологические ЭИ $CO_2$-лазеры с мощностью генерации до ~30 кВт, а в СНИТИ при участии сотрудников ОКРФ был запущен непрерывный 10 кВт CO лазер. На Калужском турбинном заводе в $CO_2$ лазере с мощностью 10 кВт с применением нестандартной газовой смеси был получен КПД 15 % при непрерывной работе в течение рабочей смены - восьми часов. Сотрудники ОКРФ также принимали участие в создании бортового варианта ЭИ $CO_2$ лазера в Конструкторском бюро автоматических систем (г. Куйбышев), в разработке $CO_2$ и CO лазеров с возбуждением в активной зоне ядерного реактора для космических систем (Институт ядерной физики КазССР, г. Алма-Ата).

Н.Г.Басов инициировал создание импульсно-периодической $CO_2$ лазерной установки на полигоне «Радуга» (Владимирская область). С участием сотрудников НПО «Астрофизика» и Отделения КРФ под научным руководством Данилычева В.А. был впервые создан $CO_2$ лазер со средней мощностью генерации ~1 МВт при расходимости излучения, близкой к дифракционной. Под научным руководством А.А. Ионина сотрудниками ЛГЛ совместно с НПО «Астрофизика» в конце 80-х годов на этом же полигоне впервые был создан импульсно-периодический CO-лазер высокого давления (плотность 0,4 - 1.1 Амага) с частотой повторения импульсов 120 Гц, КПД ~ 14 %, средней мощностью генерации, существенно превышающей 10 кВт, и удельной мощностью 2,8 кВт/литр.

С начала 90-х годов под научным руководством Ионина А.А. (Рис. 2.11) в области CO и $CO_2$ лазеров началось интенсивное и взаимовыгодное сотрудничество Лаборатории газовых лазеров с зарубежными партнерами. С 1992 по 1996 г. ЛГЛ участвовала вместе с УралНИТИ (г. Екатеринбург) в британо-франко-российском проекте “CO-Eurolaser” в рамках европейской научно-технической зонтичной программы «Эврика». Мощность импульсно-периодического ЭИ CO лазера в УралНИТИ была доведена до 14 кВт, выполнены

работы по резке и сварке различных материалов излучением этого лазера, были начаты работы по внутрирезонаторному обращению волнового фронта (ОВФ) ЭИ CO лазера. Исследования последнего эффекта вместе с ОВФ ЭИ $CO_2$ лазера были развиты совместно с сотрудниками White Sands Missile Range (штат Нью-Мексико, США) на лазерных установках, находящихся в ОКРФ. В Институте Технической физики (г. Штуттгарт, Германия) с участием ЛГЛ был введен в строй 1 кВт импульсно-периодический ЭИ CO лазер, действующий при комнатной температуре.

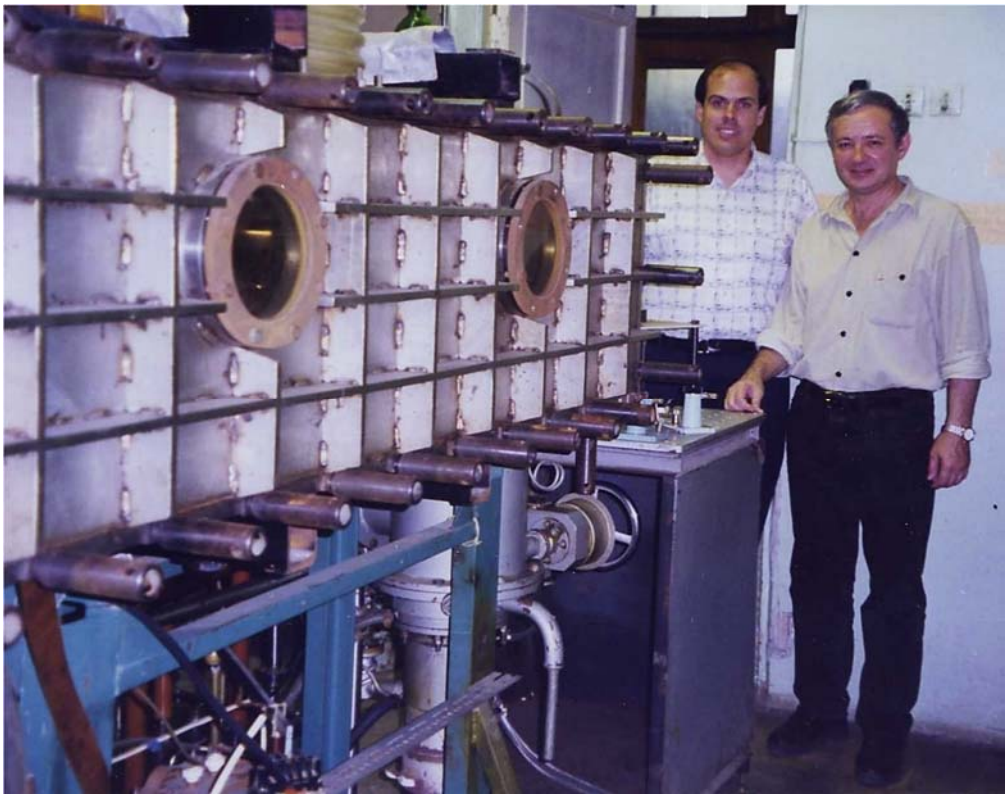


Рис. 2.11. А.А. Ионин (справа) с Д.О' Брайеном из Colorado School of Mines (США) в Лаборатории ГЛ у ЭИ CO лазера во время проведения совместных работ (1996 г.)

В середине 90-х компания DuPont (США) обратилась с просьбой исследовать возможность уничтожения блеска, характерного для синтетических тканей, на образцах нейлона и дакрона. Такая задача была решена в ЛГЛ при помощи ~6 мкм спектрально-селективных импульсов излучения CO- лазера микросекундной длительности, поглощаемых в приповерхностном слое синтетической ткани и создающих на поверхности периодические микроструктуры, обеспечивающие минимальный коэффициент отражения. В рамках решения задачи о лазерном бурении совместно с Colorado School of Mines (г. Гольден, штат Колорадо, США) и Горным институтом (г. Москва) были выполнены работы по изучению взаимодействия излучения CO и $CO_2$ лазеров с горными породами, характерными для нефтеносных полей.

В конце 90-х совместно с University of New Mexico и Air Force Research Laboratory (г. Альбукерк, США) при финансировании Международным научно-техническим центром (МНТЦ) в ЛГЛ были начаты совместные работы по исследованию различных режимов работы CO лазера. Было проведено экспериментально-теоретическое исследование неравновесной колебательной кинетики активной среды лазера на первом обертоне молекулы CO (длина волны 2.5 - 4.2 мкм) и впервые получен КПД обертонного CO лазера более 10%. Эти исследования привели к запуску (с участием сотрудников ЛГЛ) в Air Force Research Laboratory в начале нулевых годов 21 века сверхзвукового CO лазера с накачкой высокочастотным электрическим разрядом с мощностью генерации 2 кВт на основных переходах и 50 Вт на обертонных. Во многих из этих работ самое активное участие принимали научные сотрудники ЛГЛ Синицын Д.В., Котков А.А., Селезнев Л.В. и Климачев Ю.М.

В научной группе под руководством Керимова О.М. с активным участием Долгих В.А. и Миланича А.И. были проведены исследования кинетики образования и разрушения эксимерных молекул, поиск новых активных сред и методов возбуждения при электронно-пучковой накачке сжатых газов, главным образом, с целью выяснения возможности их использования в качестве активных сред лазеров высокого давления коротковолнового диапазона длин волн. Было показано, что при возбуждении сжатого ксенона электронным пучком КПД преобразования в энергию спонтанного излучения эксимера $Xe_2^*$ достигает 20 – 30%. Удельная мощность ВУФ генерации на длине волны 172,5 нм достигала 4 МВт/см$^3$ при КПД 6%. Впервые реализована генерация в $Ar/N_2$ лазере на 2-й положительной системе азота ($\lambda$=357,7 нм) с накачкой электронным пучком. Удельная мощность лазерного излучения достигала 70 кВт/см$^3$, КПД ~2%, энергия импульса 0,1 Дж, угловая расходимость $(5 \pm 2)10^{-4}$ рад. Получена генерация на эксимере XeO* в зеленой области спектра при возбуждении электронным пучком смеси Xe и $O_2$. Генерация при ЭИ накачке получена также на эксимерах KrF, XeF и XeCl. В XeCl лазере достигнута энергия излучения ~ 20 Дж. Впервые получена квазинепрерывная генерация на 3p-3s переходах неона ($\lambda$ = 585,3 нм; 703,2 нм; 724,5 нм) при удельной мощности возбуждения 10 – 100 Вт/см$^3$, что позволило реализовать длительность генерации до 200 мкс, ограниченную только длительностью импульса накачки.

Под руководством Холина И.В. в 80 - 90-х годах был выполнен цикл исследований лазеров на переходах атомов инертных газов с электронно-пучковой или ЭИ накачкой, выведший этот класс лазеров на качественно новый уровень и поставивший их в один ряд с наиболее мощными из известных лазерных систем. Применение электронного пучка обеспечивало создание населенностей на высокорасположенных метастабильных уровнях и приводило к инверсной населенности, а в случае ЭИ лазеров к этому приводило приложенное внешнее электрическое поле. Был исследован целый ряд лазеров: Ar-Xe лазер ($\lambda$=1,73 мкм), He-Ne лазер ($\lambda$=1,27 мкм), He-Kr лазер ($\lambda$= 2,52 мкм) и He-Kr-Ne лазер ($\lambda$=0,73

мкм). Была создана лазерная установка «Тандем», состоящая из двух лазеров - усилителей с активным объемом 10 л каждый (Рис. 3.4). Наибольшая энергия 100 Дж при КПД 5% была достигнута в ЭИ Ar-Xe лазере, который мог действовать на многих длинах волн, однако максимальная энергия была достигнута на длине волны 1,73 мкм, соответствующей лазерному переходу 5d–6p. Угловая расходимость излучения составляла $3x10^{-5}$ рад. В научных исследованиях лазеров этого типа активное участие принимали Льдов (Чугунов) А.Ю., Устиновский Н.Н. и Заярный Д.А. Поскольку поглощение в атмосфере на этой длине волны меньше, чем ~0,1 $км^{-1}$, на основе полученных результатов была разработана развернутая концепция и начаты работы по созданию импульсно-периодического лазера на аргон-ксеноновой смеси со средней мощностью излучения до 20 кВт для технологических применений, лазерной локации и связи. С распадом СССР финансирование этих работ прекратилось.

В начале 90-х годов под научным руководством Зворыкина В.Д. была создана мощная лазерная установка «ГАРПУН» с активным объёмом 18x16x100 $см^3$ и двусторонней поперечной накачкой сильноточным электронным пучком (Рис. 2.12). В режиме свободной генерации при возбуждении рабочей смеси на основе молекулярного фтора, криптона и аргона импульсами электронного тока длительностью 100 нс и плотностью тока 2x25 $А/см^2$ получена энергия излучения 100 Дж с наибольшей в стране пиковой мощностью 1 ГВт в УФ области спектра ($\lambda$=248 нм). Энергия накачки составляла ~2 кДж при удельной мощности накачки 0,8 $МВт/см^3$.

Рис.2.12. На установке «Гарпун» (слева направо):
М.А. Рогулёв, В.Д. Зворыкин, А.О. Левченко

На этой установке была выполнена серия экспериментов по взаимодействию импульсов лазерного излучения с плоскими мишенями. Для интенсивностей излучения на мишени $5 \cdot 10^{12}$ Вт/см$^2$ измерено абляционное давление 5 Мбар и обнаружен эффект сверхзвукового расталкивания конденсированного вещества конической ударной волной, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью 5–8 км/с. Впервые при лазерном облучении углеродосодержащих мишеней зарегистрирован прямой (мартенситный) переход графита в алмазную фазу. Была исследована гидродинамика плазменной короны и ее температура: скорость потока плазмы достигала ~50км/с, а ее электронная температура, измеренная при помощи поглощения мягкого рентгеновского излучения в бериллиевых фольгах, составила ~100 эВ. Спектральный состав излучения для различных материалов мишени находился в экстремальном УФ диапазоне 120–250 ангстрем. Для генерации гиперзвуковых ударных волн в газах с числом Маха 10 – 20 и компрессионных волн в жидкостях с амплитудой давления ~10 кбар была предложена конструкция компактной «лазерной ударной трубы», предназначенной для исследований гидродинамических неустойчивостей на границах раздела различных жидкостей и газов, обтекания гиперзвукового потока, эффекта рефракции ударной волны. Наряду с предложением нового подхода к реализации быстрого зажигания при использовании крупномасштабного электронно-пучкового KrF лазерного драйвера для задач лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), с применением «длинных» (5–100 нс) лазерных импульсов для имплозии мишеней и «коротких» (10 –100 пс) импульсов для быстрого нагрева сжатого горючего, был решен ряд технических задач, направленных в перспективе на создание прототипа мощного импульсно-периодического KrF драйвера для ЛТС: долговечность фольг, изолирующих вакуумный объем электронной пушки от лазерной камеры высокого давления, долговечность оптических окон, облучаемых рентгеновским излучением, и др.

### 2.2.3 Лаборатория нелинейных оптических явлений (ЛНОЯ)

Лаборатория, которой заведовал лауреат Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор И. Г. Зубарев (Рис. 1.20, 2.2 и 2.13), образована в 1986 г. вместе с образованием отдела КРФ в составе ОКРФ. До этого сотрудники ЛНОЯ выполняли исследования в секторах д.ф.-м.н. А.З. Грасюка (Рис. 2.14) «Селективное взаимодействие излучения с веществом» и к.ф.-м.н. Ф.С. Файзуллова «Оптические измерения».

В ЛНОЯ продолжены исследования по преобразованию лазерного излучения методами нелинейной оптики с целью повышения плотности энергии и направленности генерируемого излучения. Исследовались нелинейно-оптические процессы вынужденного рассеяния и обращения волнового фронта света. Разрабатывались принципы наведения и самонаведения лазерного излучения на мишень. Разрабатывалась линейная дисперсно-частотная методика обнаружения малых концентраций примесей в жидкостях и газах.

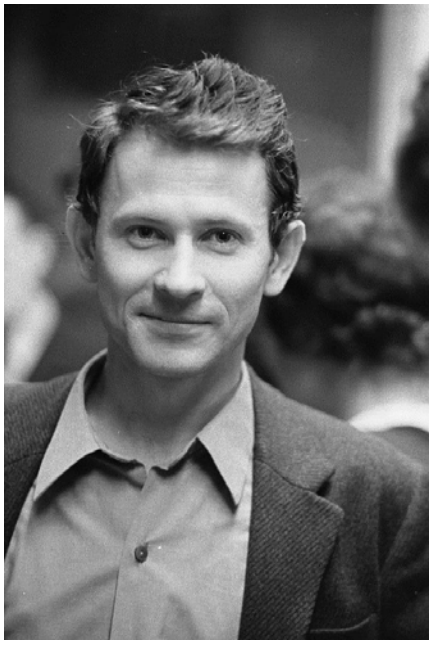


Рис. 2.13. И.Г. Зубарев (1965 г.)

Рис.2.14. А.З. Грасюк (1975 г.)

Развитие работ по преобразованию излучения с помощью вынужденного рассеяния привело в 1971 г. к экспериментальному обнаружению (Зельдович Б.Я., Поповичев В.И., Рагульский В.В., Файзуллов Ф.С.) явления обращения волнового фронта (ОВФ) при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) – Рис.2.4. Это открытие имеет важное практическое значение, так как позволяет компенсировать статические и динамические фазовые искажения расходящегося лазерного пучка, обусловленные его прохождением через активную среду и оптические элементы. Обращенная волна обладает уникальным свойством: при своем движении в обратном направлении в каждом поперечном сечении она точно воспроизводит (с обратным знаком) волновой фронт падающего излучения. То есть, если на выходе усилителя излучение отразить с обращением волнового фронта, то по мере обратного прохождения оно наберет энергию и, самое главное, выйдет из усилителя в обратном направлении со столь же хорошим волновым фронтом, какой имело на входе усилителя. Явление ОВФ позволяет также осуществить когерентное суммирование световых пучков, усиленных много-канальной системой усилителей, для чего необходимо их волновой фронт обратить в одной кювете зависимым образом.

Позднее, в период с 1978 по 1986 г. Зубаревым И.Г., Ефимковым В.Ф., Котовым А.В. и Михайловым С.И. была предложена и экспериментально реализована схема обращения волнового фронта излучения коротких имцульсов при ВРМБ, основанная на использовании специального комбинированного магнито-электрооптического затвора. На выходе трехкаскадного усилителя был получен световой импульс длительностью 2 нс и энергией 50 Дж с расходимостью $2 \cdot 10^{-5}$ рад, фактически определяемой дифракционным пределом. Был также отработан режим обращения волнового фронта для наносекундного неодимового

лазера с острой цилиндрической фокусировкой (около 50 мкм). Создан и исследован эффективный комбинационный лазер-усилитель на чисто вращательных переходах в сжатом водороде. В результате 50 световых пучков длительностью 3 нс от неодимового лазера были преобразованы в один пространственно-когерентный пучок первой стоксовой компоненты ВКР на длине волны 1,13 мкм с КПД по энергии 70% и увеличением яркости в 300 раз.

Проведены эксперименты по ОВФ излучения исходного сигнала расходимостью около $6 \cdot 10^{-6}$ рад с использованием ОВФ-системы, состоящей из широкоапертурного объектива (диаметром 44 см) и ОВФ-зеркала на гиперзвуке. Параметр обращения составил около 0,94 при точности обращения около $2 \cdot 10^{-6}$ рад. На основе анализа четырехволнового ОВФ- зеркала с поляризационной развязкой экспериментально реализован вариант зеркала с независимыми опорными волнами. Это позволило впервые получить режим абсолютной неустойчивости при нулевой частотной волновой расстройке. Максимально достигнутый коэффициент отражения составил около $5 \cdot 10^{6}$ при энергии входного сигнала порядка $10^{-10}$ Дж. Предложено и реализовано ОВФ при многокаскадном ВРМБ. В схеме с тремя ОВФ- зеркалами получено пять отражений с высоким параметром обращения (около 0,94) для каждого отражателя. Предложены перспективные схемы применения ОВФ при многокаскадном ВРМБ.

В середине 80-х годов была разработана методика фотографической регистрации излучения импульсного $CO_2$ лазера с порогом чувствительности 50 мДж/см$^2$, динамическим диапазоном около 20 и разрешением лучше 100 мм$^{-1}$ (Ковалев В.И., Лесин А.Р., Файзуллов Ф.С., Федоров В.Б.). С помощью этой методики впервые показано, что исходная дифракционная расходимость сигнальной волны (~ 2 мрад) при четырехволновом взаимодействии в $SF_6$ на длине волны 10,6 мкм воспроизводится с точностью около 100% при двойном проходе сигнальной волны через фазовые неоднородности, ухудшающие ее расходимость до 60 мрад.

В 1979 г. Виноградов Ан. В. и Ковалев В.И. (Рис. 2.15) были отмечены премией Ленинского Комсомола за цикл работ "Физические основы оптического пробоя стекол". В 1981 г. Ефимков В.Ф. и Грасюк А.З. (Рис.1.19, 2.2 и 2,14)) за работы по новой технике были удостоены Государственной премии СССР. В 1983г. Государственная премия СССР была присуждена сотрудникам ОКРФ Зельдовичу Б.Я., Зубареву И.Г., Носачу О.Ю., Рагульскому В.В. и Файзуллову Ф.С. за цикл работ «Самообращение волнового фронта света при вынужденном рассеянии на гиперзвуке». Носач О.Ю. (Рис. 2.16), Ефимков В.Ф. и Грасюк А.З. многократно участвовали в испытаниях лазерных систем на полигоне Сары-Шаган близ озера Балхаш.

В начале 90-х годов в лаборатории предложена и рассмотрена схема четырёхволнового смешения (ЧВС) с последовательной бриллюэновской связью волн (ПБСВ) и ненулевой волновой расстройкой, в которой частоты волн образуют непрерывную последовательность компонентов, смещённых на один

бриллюэновский сдвиг. Вариант ЧВС с ПБСВ со слабыми опорными волнами и лишь одной бриллюэновской нелинейностью позволил увеличить контраст отражённого импульса в $10^7$ раз по отношению к варианту нулевой расстройки.

Рис. 2.15. Лауреаты премии Ленинского комсомола (слева направо):
В.И. Ковалёв, А.С. Епифанов, Ан.В. Виноградов

Рис. 2.16. О.Ю. Носач проводит эксперимент

В дальнейшем в лаборатории были проведены детальные теоретические и экспериментальные исследования петлевых ВРМБ-генераторов, в которых для образования обратной связи достаточно самопересечения пучка излучения с одним из бликов паразитного отражения. Показано, что спектр ВРМБ может состоять из набора дискретных линий с расстоянием между ними порядка одной десятой от ширины спонтанной линии ВКР. Наличие петлевой обратной связи значительно снижает порог возникновения паразитной ВРМБ-генерации при усилении длинных монохроматических импульсов в неодимовых стержнях. Была исследована зависимость пространственной структуры излучения петлевого ВРМБ-лазера от его длины при накачке монохроматическими импульсами с гауссовым пространственным профилем и на этой основе создана и опробована методика прецизионных измерений бриллюэновских констант веществ с относительной погрешностью 0,3 %. Разработаны петлевые ВРМБ-лазеры с перестройкой частоты излучения в пределах ширины линии спонтанного рассеяния и созданы петлевые ВРМБ-лазеры, работающие в широком диапазоне накачек (от 100 мДж до 10 Дж) при сохранении эффекта ОВФ в излучении генерации.

Впервые предложен и реализован ВКР- лазер с параметрической обратной связью. Получен КПД преобразования по энергии на уровне 50 %. Показано, то параметрическое зеркало обладает свойством пространственного разделения лучка накачки и стоксова излучения. Исследования динамических и пространственных характеристик низкопорогового кольцевого генератора с параметрической обратной связью показали, что генерируемое им поле в общем случае не является комплексно-сопряженным (обращенным) к накачке. Для достижения режима ОВФ предложена и реализована схема запуска генератора с параметрической обратной связью внешним сигналом с обращенным по отношению к накачке волновым фронтом, В результате улучшены энергетические и пространственные характеристики генератора.

В струйном лазере на красителе были экспериментально реализованы двух- и трехмодовые режимы генерации при одинаковых частотных интервалах между соседними модами. При трехмодовом режиме генерации обнаружена на порядок большая частотная стабильность межмодовых биений по сравнению с двухмодовым режимом, что автоматически означает понижение предела обнаружения исследуемых примесей до уровня 1 пг/мл в спектроскопических приложениях (Пантелеев В.И., Завертяев М., Кожуховский В., Лобанов А.Н. Романов Е.Г., Яненко Е.).

Исследован широкий круг методов, схем и нелинейных сред для реализации ОВФ излучения импульсных $CO_2$ лазеров. Установлено, что при использовании в качестве нелинейной среды ОВФ зеркала для $CO_2$ лазерных систем с длительностью импульса до 50 мкс неоспоримым преимуществом обладает полупроводник InAs. Этот материал, вследствие короткого (~10 пс) времени релаксации нелинейного отклика, позволяет при четырехволновом взаимодействии (ЧВ) реализовать эффективность отражения до 600% для сигнала, генерируемого

лазером, независимым от лазера, являющегося источником опорных волн. При этом оптимальной схемой реализации InAs-ОВФ зеркала является нелинейная среда (InAs) в плотном резонаторе $CO_2$ лазера. При качестве ОВФ на уровне 100% эффективность отражения такого ОВФ зеркала не зависит от угла схождения пучков сигнала и опорных волн от 0 до $90^o$ (при угле зрения ОВФ зеркала не менее $90^o$) и от интенсивности сигнала в диапазоне от 1 мВт/см$^2$ до 1 МВт/см$^2$ (динамический диапазон ~$10^9$). Такое ОВФ зеркало способно работать как в моноимпульсном (при длительности импульса до ~50 мкс), так и в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов до ~100 Гц.

На базе ОВФ зеркала создан и экспериментально исследован макет лазерной локационной системы с усилением принимаемого сигнала в $10^8$ раз в импульсном двухпроходном $CO_2$- усилителе с ОВФ усиливаемого сигнала в полупроводнике InAs при независимом источнике подсветки цели. Такая система позволяет в том числе обнаруживать множественные цели, движущиеся со скоростями вплоть до 10 км/с на расстояниях до сотен километров (Ковалев В.И., Ан А.Н., Видавский А.Э., Ерохин А.И., Ильиных П.Н., Коваленко К.В., Михеев П.А., Раухман В.М., О.Л. Руськин, Суворов М.Б., Тасмуратов О.С., Шмелев А.К.).

Впервые при ВРМБ в оптическом волокне реализовано ОВФ непрерывного лазерного излучения. Показано, что в многомодовом волокне длиной 4,23 км при мощности накачки от 200 мВт до 600 мВт эффективность ВРМБ отражения и качество ОВФ достигают 70% и >90% соответственно. Создана и экспериментально исследована лазерная система – непрерывный задающий генератор-четырехпроходный Nd:YAG усилитель мощности с ОВФ зеркалом на основе ВРМБ в оптическом волокне, в которой путем компенсации фазовых и др. искажений в усилителе обеспечивается на выходе непрерывное линейно поляризованное излучение с дифракционной расходимостью. (Ковалев В.И.).

### 2.2.4 Лаборатория фотохимических процессов (ЛФХП)

Лаборатория ФХП образована в 1986 г. на основе одноимённого сектора д.ф.м.н. Зуева В.С. (1933-2014 гг.) – Рис.2.17, вместе с образованием отдела КРФ в составе ОКРФ. В 1990 г. Зуев В.С. передал руководство ЛФХП к.ф.-м.н. Михееву Л.Д. (1943– 2019 гг.).

Коллектив лаборатории традиционно занимался разработкой и исследованием новых физических принципов создания инверсной заселенности в системе электронных уровней атомов и молекул методами фотохимического возбуждения газов излучением импульсных ламп, открытого разряда и сильных ударных волн; исследованием фотопроцессов в плотных газах с целью получения базы спектро-кинетических данных для элементарных физико-химических процессов; разработкой источников оптической накачки открытого типа для фотохимических лазеров; исследованием фотодиссоционного йодного лазера, в частности, проблемой улучшения качества его излучения; новым научным

направлением - оптикой ближнего поля (неоднородные многосвязные оптические волноводы).

Рис. 2.17. В.Б. Розанов, В.С. Зуев, Н.Г. Басов

В начале 70-х годов сотрудники лаборатории, входившие тогда в сектор В.С. Зуева, под руководством Н.Г. Басова активно развивали работы по мощным фотодиссоционным йодным лазерам. В 1976 г. был создан йодный лазер, излучающий до 300 Дж в наносекундном импульсе. Полученные результаты послужили основой для разработки и создания во ВНИИЭФ (Арзамас-16) мощной лазерной установки "Искра", генерирующей при накачке открытым разрядом энергию 30 кДж за четверть наносекунды и относящейся в то время к числу наиболее мощных лазерных систем, предназначенных для исследований в области ЛТС.

Не менее значимы исследования фотохимических лазеров с использованием оптической накачки излучением сильной ударной волны, порождаемой взрывом ВВ, которые выполнялись совместно ФИАН и ВНИИЭФ, с подключением в дальнейшем более широкой кооперации отраслевых НИИ и промышленности (НПО "Астрофизика", ГОИ, ГИПХ и др.). Итогом стало создание не имеющих аналогов и самых мощных в мире йодных фотодиссоционных лазеров взрывного типа с энергией излучения в импульсе до 1 МДж и осевой энергетической силой излучения до $8.10^{12}$ Дж/страд в ИК области (на $\lambda$= 1,315 мкм) и до 1 кДж в УФ области (на $\lambda$=353 нм).

В 1980 г. за работы в области фотодиссоционных лазеров Зуеву В.С., Катулину В.А. (Рис. 1.18) и Собельману И.И. была присуждена Государственная премия СССР, а в 1981 г. такой же премии были удостоены сотрудники ОКРФ

Николаев Ф.А. и Розанов В.Б. (Рис. 2.17) за цикл работ "Физика сильноточных излучающих разрядов". За создание новых материалов в 1986 г. Государственной премии СССР был удостоен Сагитов С.И. В 1997 г. за создание мощных импульсных йодных лазерных систем "Искра-4" и "Искра-5" с выходной мощностью излучения до 100 ТВт Катулин В. А. был удостоен Государственной премии Российской Федерации. В 2003 г. цикл работ "Физические процессы в фотодиссоционных лазерах" Зуева В.С., Носача О.Ю. и Орлова Е.П. был отмечен Премией им. Л.И. Мандельштама.

В 80-х годах в рамках работ, направленных на создание новых перспективных лазерных систем, разработана оригинальная концепция усиления оптических импульсов длительностью 10-100 фс до петаваттного (1000 ТВт) уровня мощности (Михеев Л.Д., Ставровский Д.Б.). Здесь используются оптически возбуждаемая активная среда на переходе XeF (C-A), излучающем в сине-зеленой области спектра, и принципиально новая техника формирования плоского разряда субмикросекундной длительности в качестве источника оптической накачки. Отличие от известных твердотельных систем состоит в возможности прямого усиления импульсов без использования дорогостоящих устройств растяжения и сжатия (методом чирпирования) усиливаемых импульсов. Работы проводились в рамках проекта, поддержанного ИНТАС, совместно с Резерфордовской Лабораторией (Англия), Институтом Оптики и Квантовой Электроники Йенского университета (ФРГ), Марсельским университетом (Франция) и Новосибирским университетом.

В дальнейшем в селективных оптических квантовых усилителях реализована совокупность уникальных характеристик: низкие шумы, ограниченные только квантовым пределом; низкие внутренние потери – менее $10^4$ $см^{-1}$; узкая линия усиления $10^{-2}$ $см^{-1}$, управляемая магнитным полем; высокая оптическая однородность активной среды; высокий уровень усиления – более $10^6$ раз; работа в ждущем режиме с временем ожидания принимаемого сигнала несколько сот микросекунд. Эти усилители могут быть использованы как идеальные приемники слабых сигналов, позволяющие выделять, усиливать и достоверно регистрировать в условиях сильной засветки сигналы, состоящие из одного – двух фотонов, и усиливать яркость изображений слабоосвещенных объектов при сохранении дифракционного качества.

При лазерных исследованиях фотохимических процессов в парах ртути и йода в смеси с ксеноном Михеевым Л.Д. наблюдались непрерывные спектры, которые соответствуют вариациям интенсивности перекрытия волновых функций. В результате интерпретации спектров определены потенциальные функции $Hg_2$ и XeI. Создан отпаянный импульсно-периодический электроразрядный HgBr -лазер со средней мощностью 30 мВт и ресурсом $10^4$ импульсов. Показана возможность масштабирования XeO лазера с оптической накачкой до уровня энергии 50÷100 Дж в импульсе.

В 90-х годах в лаборатории Михеев Л.Д. и Ставровский Д.Б. впервые экспериментально наблюдали ВУФ люминесценцию газообразного ксенона при накачке излучением открытого разряда, что подтвердило гипотезу существования теплового механизма наведенной оптической прозрачности в области второго резонанса ударно сжатого ксенона, окружающего разряд, и открыло возможность генерации когерентного ВУФ излучения в ксеноне. Найден новый механизм подавления наведенного триплетного поглощения в ксеноне, основанный на трехтельном тушении триплетного состояния молекулярного ксенона водородом, что существенно облегчает условия достижения отрицательного поглощения.

В части исследований по оптике ближнего поля показано теоретически и установлено экспериментально явление концентрации электромагнитного излучения в оптическом и СВЧ диапазонах практически без потерь в биконическом рупоре на объекты размером порядка нанометра (В.С. Зуев). Показана возможность изготовления соответствующего устройства и продвижения методики в жесткий УФ и мягкий рентген. Возможное разрушение вершины биконуса не является препятствием, так как эффект концентрации не исчезает при переходе металла биконуса в состояние плазмы, а разлет плазмы будет сдерживаться давлением сжимаемого электромагнитного поля. Предсказано, что эффект концентрации поля очень большой напряженности можно будет наблюдать в полной мере при коротких (несколько фемтосекунд) импульсах.

### 2.2.5 Лаборатория химических лазеров (ЛХЛ)

Лаборатория образована на основе одноимённого сектора, которым до 1983 г. заведовал д.ф.-м.н. Ораевский А.Н., а затем стал руководить лауреат Государственной премии д.ф.-м.н. Крюков П.Г. (Рис. 1.17 и 2.18), работавший некоторое время до этого в институте спектроскопии АН СССР по программе лазерной химии и разделения изотопов. Государственная премия СССР была присуждена П.Г. Крюкову в 1974 г. «За разработку оптических квантовых генераторов на неодимовом стекле и освоение их серийного производства».

В ЛХЛ исследовались химические лазеры ближнего ИК и видимого диапазонов, в том числе на смеси $F_2$:$H_2$, на реакции окисления сероуглерода, кислород-йодный лазер с непрерывным и импульсным режимом работы. Разработан проект драйвера для целей ЛТС на основе импульсного химического кислород-йодного лазера. Изучена физика ультракоротких лазерных импульсов, в частности сверхбыстрые явления молекулярной динамики и процессов переноса заряда и энергии в фотосинтезирующих комплексах. Сверхмощные ультракороткие лазерные импульсы использованы в исследованиях эффектов нелинейной квантовой электродинамики. Разработан метод внутрирезонаторной спектроскопии ИК диапазона.

В первых работах с фтор-водородным лазером, упомянутых в разделе 1.3, нестабильность смеси не позволила достичь высокой энергии излучения, но при использовании схемы, предложенной Басовым Н.Г., Ораевским А.Н. и Щегловым

В.А., с передачей энергии возбуждения от молекулы DF к молекуле $CO_2$, была достигнута выходная энергия 15 Дж.

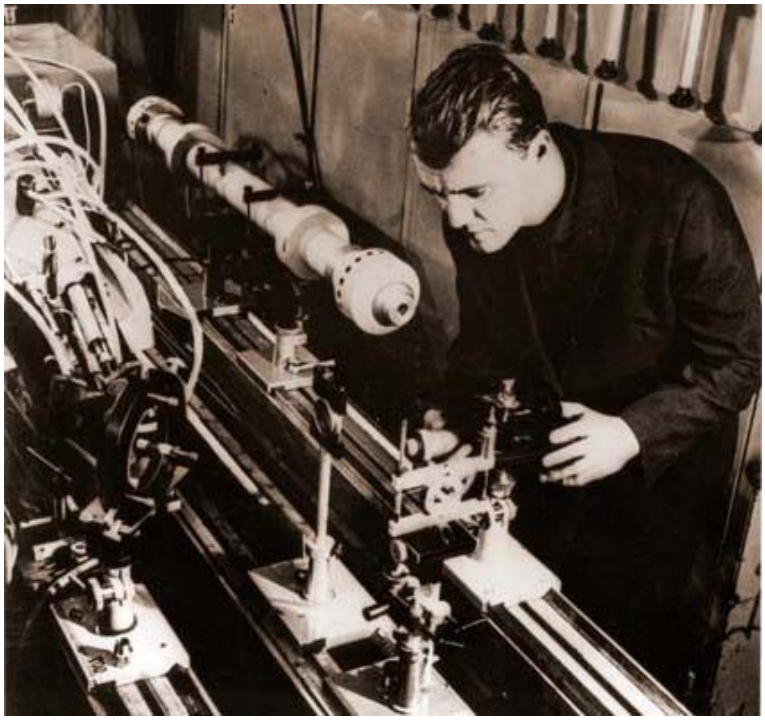


Рис. 2.18.. П.Г. Крюков настраивает установку

С начала 70-х годов работы по химическим лазерам были сосредоточены в группе А.С. Башкина сектора Ораевского А.Н. При исследовании возможности применения озона в качестве окислителя в химическом CO-лазере, основанном на реакции окисления сероуглерода, была обнаружена высокая эффективность $SF_6$, используемого в качестве разбавителя. Как было показано, такое поведение обусловлено инертностью $SF_6$ к тушению возбужденного состояния атома кислорода, образующегося при фотодиссоциации озона и являющегося дополнительным источником атомарного кислорода во вторичных реакциях. Получен энергосъём 4,5 мДж/см$^3$, что вдвое превышает значение, достигнутое на чистой смеси сероуглерода и кислорода в оптимальных условиях. На тот период времени химический CO-лазер по энергетическим характеристикам превосходил его электроразрядный аналог, работающий при комнатной температуре.

В середине 70-х годов группа А.С. Башкина была переведена из Москвы в Красную Пахру в корпус КРФ-1, где был создан исследовательский комплекс, позволяющий работать и с химическими веществами, и с ионизирующим излучением. Новым направлением стало исследование возможностей применения сильноточных электронных пучков для инициирования фтор-водородных лазеров. При цепной реакции в смеси $F_2$–$H_2$–$SF_6$ с добавлением для стабилизации смеси до 40% молекулярного кислорода (по отношению к фтору) выходная энергия лазера

составила 0,1 Дж при вложении электронного пучка 0,05 Дж, что соответствует КПД 200%.

Анализ результатов показал, что полученные значения не являются предельными. Действительно, вскоре при исследовании $H_2$:$F_2$ лазера, возбуждаемого электронным пучком при давлении активной среды до 3 атм., был достигнут удельный энергосъём 180 Дж/л и КПД 500 % по отношению к вложенной энергии пучка электронов. Увеличение инициирования, при замене гелия на гексафторид серы, позволило далее получить на смеси атмосферного давления удельный знергосъем 400 Дж/л при электрическом КПД около 140 % и химическом КПД 22 % (Башкин А.С., Ораевский А.Н., Томашов В.Н., Юрышев Н.Н.).

Электронный пучок не являлся единственно возможным для получения высоких степеней инициирования. Так, на рубеже 70–80-х годов О.Е. Породинков изучил потенциальные возможности $H_2 – F_2$ - лазера при накачке смеси в активном объеме 7,3 л импульсными лампами ИФП-20000. Полученное экспериментальное значение КПД 5500 % по вложенной энергии намного превышает все приводимые в литературе значения для $H_2$:$F_2$ -лазера с любым способом инициирования. Технический КПД лазера составил 30 % для смеси $H_2 : F_2 : 0_2 : He = 3 : 20 : 2 : 75$ при атмосферном давлении. Удельный энергосъём достиг около 26 Дж/л, а полная энергия излучения лазера порядка 200 Дж. В дальнейших исследованиях в указанном лазере удалось добиться не только очень привлекательных энергетических характеристик, но и высокого качества излучения.

Большие значения энергетических параметров, достигнутые в исследованиях химических лазеров с фото-инициированием, делали актуальной задачу отработки технических решений масштабирования подобных систем. К середине 80-х годов на площадке ФИАН в Троицке был сдан в эксплуатацию новый экспериментальный корпус КРФ-2. Часть этого корпуса была специально спроектирована и построена для работы с химическими лазерами различных типов, т. е. с учётом всех особенностей обеспечения безопасности работ с вредными веществами. К этому времени возникла новая актуальная задача – создание химического кислород - йодного лазера, имеющего узкую одиночную линию генерации в ближней инфракрасной области ($\lambda$ = 1.315 мкм) и обещающего перспективные применения. Такой лазер тоже заставлял работать с агрессивными и высокотоксичными веществами – газообразным хлором, высококонцентрированной перекисью водорода, концентрированными растворами щелочей.

Действие кислород - йодного лазера основано на эффекте быстрого обмена энергией возбуждения молекулы кислорода, находящей в синглетном состоянии, и атома йода в основном состоянии. Химический генератор синглетного кислорода был изготовлен даже раньше, чем остальные элементы конструкции непрерывного кислородно-иодного лазера, в частности, генератор потока йода, ловушки и т.д. В первых экспериментах уровень выходной мощности составлял 5 Вт, но

масштабирование генератора синглетного кислорода и увеличение рабочего давления позволили достичь мощности генерации 420 Вт в импульсно-периодическом режиме и 50 Вт в непрерывном. В термодинамически неравновесных активных средах генерирующих йодных лазеров был обнаружен и исследован эффект усиления ударных волн, что позволило существенно уточнить концепцию построения крупномасштабных йодных лазеров для плазменных исследований.

Позднее, в 90-х годах в ЛХЛ запущен и исследован импульсно-периодический химический кислород-йодный лазер с объемной генерацией атомов йода в электрическом разряде, обеспечивающий величину удельного энергосъёма 2 Дж/л, мощность излучения 300 кВт и электрический КПД порядка 100% при длительности импульса около 50 мкс. Импульсная мощность лазера на три порядка превышает мощность непрерывного режима при том же расходе реагентов. Показано, что длительность импульса генерации можно изменять в широких пределах (15 – 500 мкс) без потери выходной энергии путем изменения концентрации атомов йода в активной среде. Запущен импульсный лазер с генерацией атомов иода в поперечном электрическом разряде постоянного тока. При использовании акусто-оптического модулятора для получения цуга импульсов микросекундной длительности в кислородно-йодном лазере достигнута частота следования импульсов в цуге 50 кГц.

В 90-е годы, кроме работ по химическим кислород-йодным лазерам, стали активно развиваться работы по лазерам фемтосекундных импульсов. Была предложена схема генератора ультра-коротких импульсов (УКИ) на основе кристалла $Co:MgF_2$ и продемонстрирована высокая эффективность (60%) генерации $Co:MgF_2$ лазера с накачкой кислородно-йодным лазером. С помощью $Co:MgF_2$ лазера освоена новая спектральная область метода внутрирезонаторной спектроскопии (1,6-2,5 мкм). Достигнута чувствительность порядка $10^{-9}$ $см^{-1}$, что позволяет обнаруживать в атмосфере газовые примеси на уровне концентраций 1-100 нг/г.

Разработаны, исследованы и доведены до уровня научных приборов установки генераторов и усилителей фемтосекундных импульсов, а также устройств, обеспечивающих спектральные измерения со сверхвысоким временным разрешением по схеме «возбуждение – зондирование». При использовании лазерных элементов из сапфира, активированного ионами трехвалентного титана, изготовленных в Институте кристаллографии РАН, получены следующие характеристики генерации и усиления: минимальная длительность импульса 16 фс; после усиления энергия импульса достигает 1 мДж при длительности не более 50 фс и частоте повторения 1кГц. Разработан также источник фемтосекундных импульсов, перестраиваемых по длине волны в диапазоне 275 - 2500 нм. Эти результаты отвечали самому высокому уровню лазерных установок фемтосекундных импульсов того времени.

В 2003 г. за разработку новой техники премия Правительства Российской Федерации присуждена Юрышеву Н.Н. (Рис. 2.19).

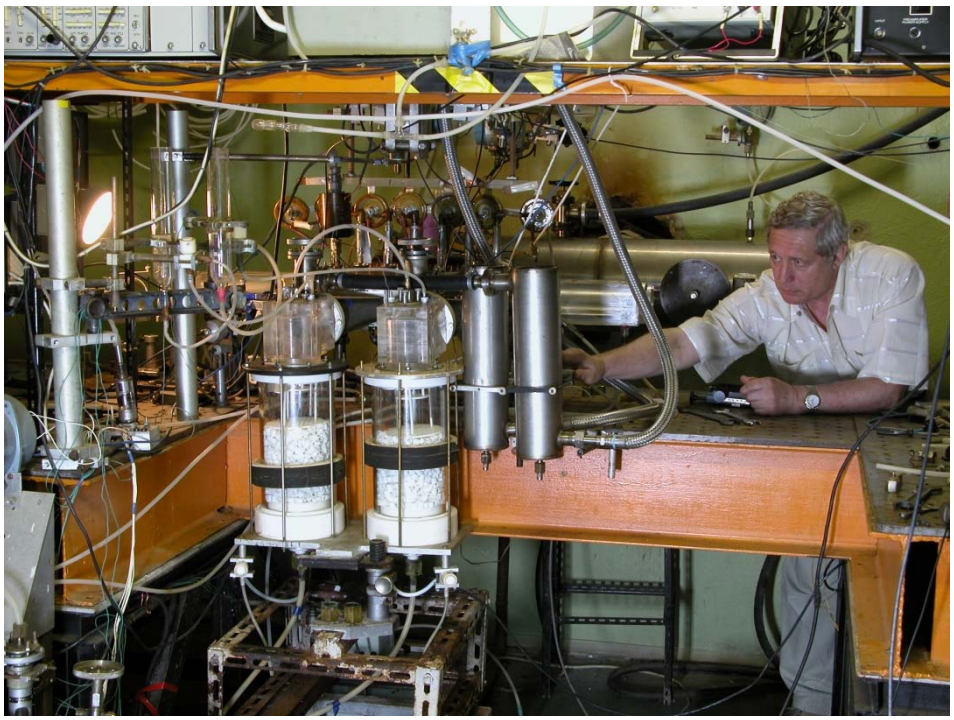


Рис. 2-19. Н.Н. Юрышев на установке химического кислородно-иодного лазера

### 2.2.6 Лаборатория применения лазеров (ЛПЛ)

Лабораторией в обозреваемые годы заведовал лауреат Государственной премии СССР д.ф.-м.н., профессор А.З. Грасюк (Рис. 2.2 и 2.15). В ней велись работы по созданию новых лазерных систем (эксимерные, химические лазеры), проводились исследования по нелинейной оптике (многоволновые комбинационно-параметрические процессы, ВКР пикосекундных импульсов в кристаллах, ВКР-компрессия, генерация гармоник), по физике плазмы (воздействие высококонтрастных субпикосекундных лазерных импульсов с интенсивностью выше $10^{16}$ Вт/см$^2$ на конденсированные мишени, двухимпульсные режимы взаимодействия) и по взаимодействию излучения с веществом (исследование процессов многофотонной ионизации газов, поглощения мощного УФ излучения в прозрачных диэлектриках).

В лаборатории использовались следующие лазерные системы: короткоимпульсный (0,8 пс) неодимовый лазер с ВКР-задающим генератором, обладающий контрастом выше $10^{12}$; мощный (150 мДж, 30 пс) Nd:YAG лазер с генераторами гармоник; импульсные (100 нс) ТЕА $CO_2$ лазеры с энергией в импульсе до 10 Дж.; длинноимпульсный (0,5 мкс) электроразрядный XeCl лазер с энергией до 200 мДж; эксимерный (ArF, KrF) лазер с накачкой электронным пучком с энергией в импульсе до 10 Дж; электроразрядные XeCl и KrF лазеры с энергией импульса излучения около 1Дж.

В 1971 г. Басовым Н.Г. с сотрудниками в работе "Фотохимическое действие инфракрасного излучения" впервые были представлены данные о стимулировании химических реакций лазерным излучением как в режиме длинных импульсов, когда лазерный импульс продолжительнее времени колебательно-поступательной релаксации, так и в режиме коротких импульсов, когда длительность импульса лазерного излучения короче времени колебательно-поступательной релаксации. Тем самым было экспериментально установлено явление фотохимического действия инфракрасного лазерного излучения, заключающегося в том, что при резонансном возбуждении отдельных степеней свободы молекул эти колебательно-возбужденные молекулы вступают в химическую реакцию, энергия активации которой значительно превышает энергию инфракрасного фотона.

Это открытие обусловило развитие нового направления – лазерохимии. Были представлены экспериментальные данные о возможности активации азота за счет возбуждения его колебаний вынужденным комбинационным рассеянием (ВКР) и получения окислов азота в прямой реакции без стадии получения аммиака. Впоследствии реакция окисления азота в лазерном поле двойной частоты при возбуждении азота за счет ВКР была использована Н.Г. Басовым с сотрудниками для разделения изотопов азота.

В 1972 г. Н.Г. Басовым с коллегами было предложено использовать для синтеза химических соединений разряд в сжатом газе, стимулированный электронным пучком, который ранее был успешно применен для возбуждения лазеров высокого давления (электроионизационных лазеров). Эта работа положила начало серии исследований по химии электроионизационного разряда. В экспериментах было продемонстрировано окисление азота в разряде такого типа, а также синтез ряда других азотсодержащих соединений — HCN, $P_3N_5$ и т.д. Результаты плазмохимических исследований привели к успешному использованию электроионизационного разряда для создания обладающих высокой химической и термической стойкостью покрытий на поверхности материалов.

Совместно с Новомосковским филиалом ГИАП разработана технология нанесения термохимически стойких покрытий из полифосфонитридов на поверхности деталей из специальных сталей, и проведены испытания этих изделий на предприятиях МАП. На базе производственного объединения "Рубин" по разработанной в лаборатории КРФ научно-технической документации создан комплекс технологической оснастки для нанесения оптических покрытий и их контроля.

Позднее, в 1989 г. за исследования неравновесной диссоциации и синтеза неорганических молекул в плазме электроионизационного и сверхвысокочастотного разрядов Басову Н.Г., Беленову Э.М. и Пантелееву В.И. была присуждена Государственная премия СССР.

В 80-х годах в ЛПЛ был выполнен большой объем экспериментальных и теоретических работ по эксимерным лазерам. Предложен и теоретически исследован новый тип разряда – электрофотоионизационный разряд для их

накачки. Созданы высокоэффективные импульсные и импульсно-периодические эксимерные лазеры видимого и ультрафиолетового диапазона. На КгF- лазере с накачкой электронным пучком достигнуты удельный энергосъём и КПД генерации, близкие к предельным. Проведены эксперименты по преобразованию ультрафиолетового излучения КгF лазера в видимую область спектра. Создан эксимерный XeF-лазер сине-зелёного диапазона с оптической накачкой с рекордной для видимого диапазона энергией генерации в импульсе 15 Дж и техническим КПД по мощности 1 %.

В середине 80-х годов в лаборатории **с**оздан лазер на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) с кольцевым резонатором и накачкой неодимовым лазером вращательных уровней в сжатом водороде, позволяющий подавлять конкурирующее ВКР на колебательных уровнях. В режиме однонаправленной генерации с поляризационным подавлением высших стоксовых компонент обеспечивалось преобразование в первую стоксову компоненту со следующими параметрами: длина волны I,13 мкм, длительность импульса 30 нс, КПД по мощности 60 %, КПД по энергии 25 %, энергия генерации около 1 Дж.

Далее была предложена и осуществлена ВКР-компрессия лазерного импульса без изменения частоты исходного излучения, что позволяет при необходимости вновь усиливать сжатый импульс и осуществлять его повторную компрессию. Процесс осуществляется в два этапа: 1-й этап - ВКР компрессия при встречном усилении стоксовой компоненты, 2-й этап - преобразование сжатого во времени стоксова импульса в его антистоксову компоненту, частота которой совпадает с исходной частотой накачки. По этой схеме на основе ВКР в сжатом метане осуществлено сокращение длительности импульса с 3 нс до 100 пс на длине волны $\lambda$=533 нм (вторая гармоника неодимового лазера). Кроме того, в лаборатории были созданы эффективные (с КПД 12% по энергии) антнстоксовы лазеры с расходимостью пучка, близкой к дифракционному пределу. Этого удалось добиться при преобразовании частоты лазерного излучения в коротковолновую область в результате комбинационно-параметрического процесса в плотных ВКР-активных средах в условиях фазового синхронизма. Таким образом расходимость ArF-лазера была уменьшена до $4 \cdot 10^{-4}$ рад при энергии 3 Дж в импульсе длительностью 70 нс.

На рубеже 80 – 90-х годов разработан лазер с накачкой двойным разрядом, впервые излучающий на электронно-колебательном переходе 1-5 эксимерной молекулы XeCl на длине волны около 308 нм. В режиме свободной генерации получены импульсы длительностью до 500 нс по полувысоте и до 700 нс по основанию е энергией генерации до 120 мДж. Лазер мог работать также в режиме активной синхронизации мод с длительностью импульса генерации 0,5 мкс и ультракороткого импульса 150 пс. Диапазон перестройки частоты XeCl лазера расширен до 202 $см^{-1}$. Длина волны генерации лазера плавно перестраивалась в диапазоне 307,00 - 308,93 нм. Созданы эксимерные лазеры с оптической накачкой: на KrCl с рекордно короткой длиной волны (223 нм), на $Xe_2F$ (получена энергия

генерации 40 Дж тоже в ультрафиолете на 353 нм) и на $Xe_2Cl$ (525 нм). Эксимерные лазеры, обладая высокой пиковой и средней мощностью, занимают одно из главных мест среди лазеров, перспективных для использования в ЛТС, микролитографии, лазерных технологиях, медицине.

В 90-е годы в ЛПЛ создан принципиально новый субпикосекундный (0,8 пс) неодимовый лазер с экстремально высоким значением контраста – порядка $10^{12}$. Такое значение достигнуто благодаря использованию двухкаскадного комбинационного лазера с накачкой излучением рубинового лазера в качестве задающего генератора. Проведены эксперименты по взаимодействию излучения этого лазера с конденсированными мишенями при интенсивностях около $10^{16}$ Вт/см$^2$. Показано, что низкая интенсивность предимпульса позволяет получить плазму с уникальными параметрами - твердотельной плотностью и электронной температурой около 1кэВ.

Развита теория мощных комбинационно-параметрических преобразователей лазерного излучения с бигармонической накачкой. Показано, что в оптимальных условиях возможна эффективная генерация широкополосного излучения с дискретным спектром, общая ширина которого равна частоте излучения накачки.

Экспериментально изучено поведение фтористых кристаллов кварца, сапфира, $MgF_2$, $CaF_2$, $BaF_2$ и LiF под действием ионизирующего и лазерного излучения УФ диапазона. Для них разработаны численные модели процессов наработки центров окраски под действием УФ лазерного излучения. Экспериментально установлено, что слои окиси гольмия и твёрдого раствора $CaF_3$ в $MgF_2$ обладают высокой фторостойкостью и могут быть использованы для защиты зеркал резонаторов эксимерного XeF-лазера.

Разработан и исследован новый тип источника ультрафиолетовой предыонизации для широкоапертурных эксимерных лазеров (ширина разряда 4 см, высота 5 см, длина до 100 см). Энергия генерации эксимерного XeCl лазера ($\lambda$ = 308 нм) с данным источником предионизации достигла 3 Дж при длительности импульса $\tau_и$~80 нс.

Совместно с лабораторией фотохимических процессов сконструирован и исследован HF химический лазер ($\lambda$ = 2,7 мкм) с нецепным механизмом реакции и накачкой открытым разрядом по поверхности диэлектрика. Получена энергия генерации 0,4 Дж в смеси $NF_3/H_2/Kr$ = 6/10/50 Тор. В схеме задающий генератор – усилитель получено усиление слабого сигнала от электроразрядного HF лазера с УФ предионизацией в активной среде химического HF усилителя с оптической накачкой поверхностным разрядом. Коэффициент усиления слабого сигнала составил 0,16 см$^{-1}$.

### 2.2.7 Лаборатория стандартов частоты (ЛСЧ)

Лаборатория образована в 1986 г. на основе сектора д.т.н. Никитина В.В. (1925–2020 гг.), вместе с образованием отдела КРФ в составе ОКРФ. Заведующим

ЛСЧ стал д.ф.-м.н., лауреат Государственной премии РФ Губин М.А. (Рис. 1.29). Лаборатория проводила прецизионные оптические измерения, исследовала возможности повышения точности квантовых стандартов частоты и вела разработку и создание высокостабильных по частоте лазеров.

В работах Н.Г. Басова, В.С. Летохова, Э.М. Беленова, М.А. Губина, В.В. Никитина и др., выполненных в 70-х гг., были предложены и реализованы новые способы повышения разрешения и чувствительности прецизионной лазерной спектроскопии, свободной от доплеровского уширения, и выделены узкие реперные линии с относительной шириной $10^{-9}$ – $10^{-10}$ в гелий-неоновых лазерах с внутрирезонаторной поглощающей метановой ячейкой (He-Ne/$CH_4$). На основе обнаруженных эффектов были реализованы малогабаритные лазерные системы, имеющие стабильность частоты не хуже $10^{-13}$ при воспроизводимости $10^{-12}$. В 1972 г. Беленов Э.М. и Губин М.А. за разработку методов получения сверхузких резонансов в оптическом диапазоне волн были отмечены премией Ленинского Комсомола. Никитин В.В. за работы по созданию и внедрению комплекса средств, повышающих на порядок уровень метрологического обеспечения частотно-временных измерений страны, в 1983 г. был удостоен Государственной премии СССР.

В 80-е годы в ЛСЧ был предложен и экспериментально осуществлен новый способ стабилизации частоты двухмодового лазера He-Ne/$CH_4$ с широкополосной обратной связью, обеспечивающий в лабораторных условиях получение долговременной стабилизации частоты $10^{14}$ при ширине спектра генерации несколько герц, что позволило в малогабаритном варианте двухмодового лазера разрешить сверхтонкую структуру метана. На этой основе разработана и создана прецизионная установка с телескопическим расширителем светового пучка, на которой проведены исследования стабильности и сдвигов частоты. Полученные рекордные результаты открыли реальную возможность создания оптических стандартов частоты с точностью $10^{-14}$. Разработан необходимый для Госстандарта транспортируемый репер частоты He-Ne/$CH_4$, не имеющий аналогов в метрологической практике. Исследовано влияние различных параметров на стабильность частоты. Достигнутая точность её воспроизведения $10^{-13}$ явилась лучшей для оптического диапазона спектра.

В указанных работах, выполненных совместно с МИФИ, развита идея стабилизации частоты He-Ne лазера не по резонансу насыщенного поглощения, а по резонансу насыщенной дисперсии. При таком методе измеряется не мощность излучения одночастотного лазера, как прежде, а частота биений двухмодового лазера. Частотные измерения обладают значительно лучшими шумовыми характеристиками и, в том числе, здесь естественным образом используется внутренний гетеродин, что позволило существенно подавить технические шумы. В результате в то время группе М.А. Губина удалось создать компактный, т. е. транспортируемый оптический стандарт частоты – ТОСЧ (Рис. 2.20) с габаритами 20x40x80 $см^3$ и с параметрами, как у стационарной установки. Делитель

оптической частоты стандарта помещался на обычном лабораторном столе и был реализован с помощью широкополосной гребёнки (комба) оптических частот, генерируемой непрерывным фемтосекундным генератором на титан-сапфире.

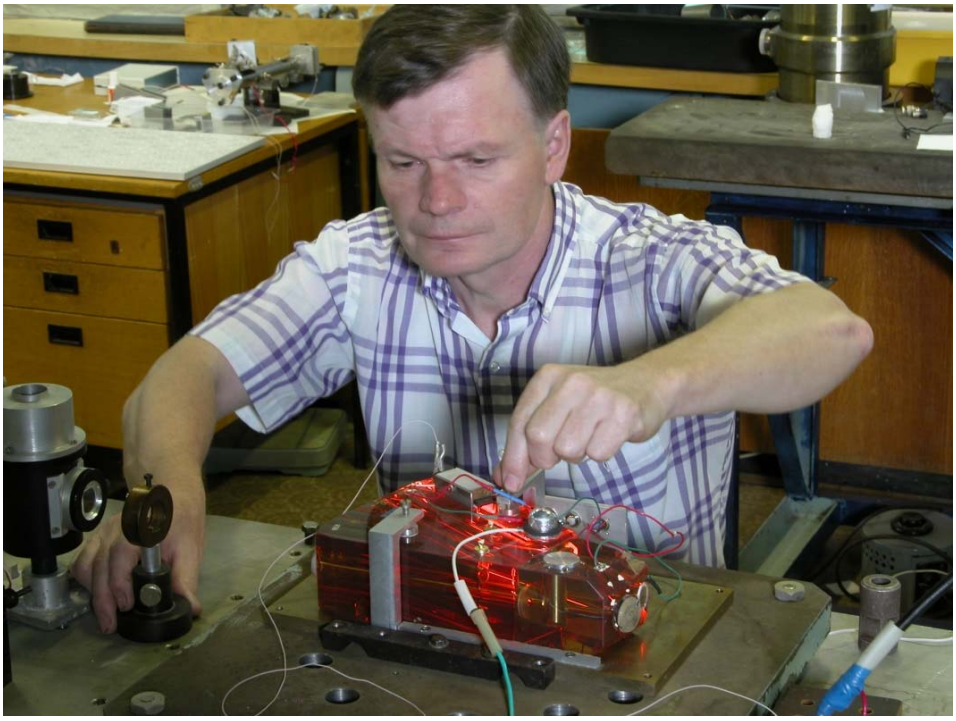


Рис. 2.20. Д.А. Тюриков настраивает моноблочный He-Ne/$CH_4$ оптический стандарт частоты

В 1986 г. совместно с ВНИИФТРИ Госстандарта СССР были проведены метрологические испытания созданного ТОСЧ, стабилизированного по вершине сверхузкой (кГц) спектральной линии метана (λ=3,39 мкм). ТОСЧ стал единственным средством калибровки по цезиевому эталону и сравнения шкал оптических частот различных метрологических центров с точностью до $3 \cdot 10^{-14}$. Это позволило начать совместные эксперименты с научными центрами США, Германии, Франции, занимающимися прецизионной спектроскопией и метрологией.

В 90-е годы выполнен комплекс абсолютных частотных измерений с новым вариантом транспортируемого He-Ne/$CH_4$ оптического стандарта частоты (ТОСЧ-60) на радиооптической цепи Физико-технического института Германии (PTB, Брауншвейг, Германия) и в Лаборатории первичных эталонов времени и частоты Франции (LPTF, Обсерватория Парижа) с использованием стационарных частотно-стабилизированных $CO_2/OsO_4$ - лазеров и системы умножения частот среднего ИК диапазона. Достигнуто 5-ти кратное улучшение стабильности частоты транспортируемого стандарта при временах усреднения τ=100 сек, а предельная стабильность частоты составила $6 \cdot 10^{-15}$ (τ=8000сек). Точность определения разности частот лазерных реперов ИК диапазона $CO_2/OsO_4$ (λ=10,6 мкм) и He-

$Ne/CH_4$ ($\lambda$=3,39 мкм), стабилизированных по узким резонансам насыщенного поглощения и дисперсии сферических молекул $OsO_4$ и $CH_4$, составила $1\cdot 10^{-13}$ .

Совместные эксперименты в Объединенном Институте Лабораторной Астрофизики (JILA, Боулдер, США) по сличению стандартов частоты различных диапазонов: Ti:сапфир/Rb (778 нм); $He\text{-}Ne/I_2$ (633 нм); $He\text{-}Ne/CH_4$ (3392 нм), – показали, что использование наиболее точного из перечисленных транспортируемого $He\text{-}Ne/CH_4$ стандарта частоты ФИАН, калиброванного по Cs-эталону частоты, позволяет уточнить примерно на порядок абсолютное значение частоты репера видимого диапазона ($He\text{-}Ne/I_2$). В Национальном институте стандартов и технологий США (NIST, г. Боулдер) проведены эксперименты по оптической накачке и детектированию СВЧ резонансов на пучке атомов цезия. Два других транспортируемых $He\text{-}Ne/CH_4$ стандарта частоты, изготовленных в 1997-1998 гг., были переданы в Международное Бюро мер и весов (BIPM, г. Севр, Франция) и в Национальную физическую лабораторию Великобритании (NPL, г. Теддингтон).

Полученные результаты по стабильности уже вплотную приблизились к тем значениям в $10^{15}$ – $10^{20}$, которые Н.Г. Басов озвучил 50 лет назад, гениально предвидя возможности оптических – лазерных стандартов (Рис.1.28). За создание ультрастабильных по частоте лазеров, средств измерения оптических частот и их применение в прецизионных измерениях Губин М.А. и Алексеев В.А. в 1998 г. были удостоены Государственной премии Российской Федерации.

Еще до формирования кафедры 37 в МИФИ, где Н.Г. Басов был заведующим, он поддерживал работы на кафедре 25 своими идеями и инициировал исследования спектральных и модуляционных характеристик диодных лазеров интерферометрическим методом. В результате в период 1969-1974 гг. сотрудники кафедры Ю.А. Быковский, В.А Маслов, И.Г. Гончаров, В.К. Егоров и В.Л Величанский выполнили ряд пионерских работ по стабилизации частоты диодного лазера, по спектроскопии резонансных линий Cs, оптической накачке и нелинейной внутридоплеровской спектроскопии атомов цезия. Ими была зарегистрирована сверхтонкая структура в селективном зеркальном отражении.

Начиная с 1975 г. работы по созданию высококогерентных перестраиваемых диодных лазеров с внешним резонатором проводились уже в Лаборатории стандартов частоты группой В.Л. Величанского. В частности, по инициативе В.А. Саутенкова, был проведен цикл работ по исследованию внутридоплеровских спектров селективного зеркального отражения. Фактически это открыло новое направление в лазерной спектроскопии.

В 1986 г. впервые осуществлена стабилизация частоты инжекционного лазера методом экстремального регулирования с высокочастотной модуляцией (методом гомодинирования боковых частот). Это позволило увеличить полосу обратной связи до 125 кГц и подавить влияние низкочастотного амплитудного шума. Благодаря высокой когерентности излучения лазера, широкополосности и помехозащищённости разработанной сервосистемы достигнута стабильность

частоты $10^{-13}$ относительно резонанса пропускания интерферометра за время усреднения 1-10 с. Стабилизация частоты высококогерентных инжекционных лазеров также осуществлялась по внутридоплеровским резонансам на $Д_2$- линии $^{133}Cs$. Стабильность измерялась по флуктуациям частоты сигнала биений излучения двух независимых лазеров.

Еще одной пионерской работой было исследование резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) на $D_1$ линии изотопов рубидия, тоже с применением двух высококогерентных инжекционных лазеров с внешним резонатором. Благодаря их высокой когерентности была зарегистрирована ширина резонансов в 70 кГц. Эта работа стимулировала развитие нового направления метрологии частоты и времени – создание малогабаритных стандартов частоты микроволнового диапазона на КПН эффекте.

Повышение мощности (до 10 мВт при корректированном волновом фронте) и стабильности частоты (до $10^{-12}$) в системе задающий лазер – усилитель позволило зарегистрировать резонанс на интеркомбинационной линии Са (657 нм) с шириной 0,5 кГц. Тем самым сделан важный шаг в создании стандарта частоты видимого диапазона на базе инжекционных лазеров (совместно с Физико-техническим институтом, г. Брауншвейг, Германия).

В 90-х годах совместно с МГУ исследованы свойства и создан рабочий макет малогабаритного инжекционного лазера с внешним сферическим кварцевым микрорезонатором. Стабилизация частоты и сужение линии генерации осуществляются через рэлеевское рассеяние назад в моде типа «шепчущей галереи» (добротность $10^8$ – $10^9$), к которой осуществлена частотная привязка генерации лазера. Устойчивая генерация наблюдается в практически неисследованной в то время области параметров, когда оптическая обратная связь реализуется одновременно с большой эффективностью (единицы процентов) и в узкой полосе (единицы мегагерц). Подавление частотных шумов реализовано методом оптической обратной связи. В качестве согласующего элемента был использован оптоволоконный коллиматор с радиальным градиентом оптической плотности.

В результате исследований созданы лазеры с уникальным для применений в метрологии и сенсорной технике сочетанием компактности (характерный размер порядка см) и когерентности (ширина линии порядка 1 кГц). На этой основе стало возможным создание в лаборатории миниатюрного стандарта частоты – атомных часов, востребованных как в гражданских системах, так и в системах специального назначения. Для уменьшения размеров устройства было предложено отказаться вообще от СВЧ – резонатора, а для стабилизации частоты на СВЧ-переходе использовать когерентное пленение населенности. Необходимые для этого два когерентных оптических поля создавались одним узкополосным диодным лазером с модуляцией тока накачки на частоте 4.6 ГГц при использовании в системе паров атомов цезия или 3.4 ГГц при использовании паров атомов рубидия. К успешным результатам работы группы можно также отнести создание облегченного

переносного квантового магнитометра с накачкой излучением узкополосного диодного лазера.

Совместно с Университетом Техаса (TAMU, США), и Национальным институтом стандартов и технологии (NIST, США), исследовано взаимодействие многочастотного лазерного поля с оптически плотными парами Rb. В результате использования эффектов когерентности атомных состояний, впервые: реализован непрерывный лазер «без инверсии»; измерено резонансное увеличение показателя преломления при когерентном пленении населенностей; обнаружена возможность подавления полевого уширения в оптически плотной среде. Результаты могут быть использованы при создании коротковолновых лазеров и в метрологии для регистрации узких резонансов без уменьшения отношения сигнал / шум.

В ЛСЧ предложена и обоснована схема принципиально нового геофизического прибора, позволяющего осуществлять высокочувствительное детектирование сейсмических волн (диапазон частот $10^{-3}$-$10^{2}$ Гц) на глубинах до 10 км. Прибор представляет собой 3-х компонентный скважинный деформометр, основанный на технике стабилизации частоты лазеров с узким спектром. По принципиальным параметрам (чувствительность, динамический и частотный диапазоны) предложенный прибор в среднем на два порядка превосходит известные устройства и открывает качественно новые возможности решения ряда задач геофизики и сейсмологии. В более позднее время демонстрационный вариант лазерного деформографа, реализованный в Японии в Национальном институте физики Земли и предсказания катастроф, был установлен в скважине на глубине 200 м, и начаты его полевые испытания.

### 2.2.8 Лаборатория фотоники молекул (ЛФМ)

Лабораторией со времени её образования в 1987 г. заведовал лауреат Ленинской премии (1980 г.), Герой Социалистического Труда (1978 г.). академик Н.А. Борисевич (1923–2015 г. г.) – Рис. 2.21.

Рис. 2.21. Академик Н.А. Борисевич

До этого, начиная с конца 70-х годов, исследования проводились в группе, руководимой д.ф.м.н. Ю.Ю. Стойловым (Рис. 2.22) и входившей в состав сектора д.ф.м.н. Зуева В.С. «Фотохимические процессы».

Рис. 2.22. Ю.Ю. Стойлов в лаборатории

Лаборатория проводила исследования тонкоструктурных спектров сложных молекул в сверхзвуковой струе, разработку методов расчета таких спектров и экспериментальных методов изучения сверхбыстрых релаксационных процессов в сложных молекулах. Велись работы по созданию перестраиваемых по частоте лазеров на красителях с использованием волн обесцвечивания активной среды, а также развивался способ генерации ультракоротких импульсов при быстрой задержанной отрицательной обратной связи.

В 80-х годах была осуществлена генерация лазерного излучения в парах красителя – кумарина, где достигнут КПД 23 % в зелёном диапазоне спектра. Открыт новый класс красителей – имитринов, способных эффективно в жидкой и газовой фазах генерировать лазерное излучение сине-зеленого диапазона длин волн. Исследованы спектрально-флюоресцентные генерационные характеристики активных сред класса имитринов в парах и растворах. Впервые в газовых лазерах на парах РОРОР и ТОРОТ достигнут КПД генерации 42%. КПД лазеров на растворах соединений класса имитринов в этаноле доведен до 40%, а на парах сцинтиляторов при излучении в ультрафиолетовом спектре получен КПД около 20%.

В общей сложности была исследована эффективность лазерной генерации 20-ти новых лазерных красителей. На один из них с КПД 62% оформлена заявка на авторское свидетельство. Исследован также режим пассивной синхронизации мод в лазере на перспективном материале - бериллате лантана с помощью раствора нового красителя № 15 в хлоруглеводородном растворителе. Получены цуги импульсов длительностью порядка 10 пс с частотой повторений 10 Гц, причём их ста-

бильность и контраст были лучшими, чем с широко используемым красителем №3274у.

В 90-е годы в лаборатории создан высокочувствительный автоматизированный комплекс, позволяющий измерять с разрешением 0,01 нм тонкоструктурные спектры возбуждения и флуоресценции ароматических и других сложных молекул, охлажденных в сверхзвуковой струе. На нем проведены спектроскопические исследования ряда слабосветящихся молекул. Осуществлена интерпретация спектров, и определены с точностью до 1 $см^{-1}$ частоты фундаментальных колебаний этих молекул в основном и в возбужденном электронных состояниях.

Впервые обнаружены свойства поверхностной активности у паров летучих неполярных фторуглеродных соединений типа $C_6F_{14}$, $C_8F_{18}$, $C_{10}F_{18}$. В новом явлении капиллярной неустойчивости наблюдаются постоянные колебательные и вращательные движения большого набора испаряющихся жидкостей (этанол, скипидар, эфир, диметилфталат, масло, глицерин, керосин, бензол, 2-пропанол и т.д.) с линейными скоростями 1–10 см/с из-за снижения их поверхностного натяжения на 10-30% при контакте с парами фторуглеродных соединений при комнатной температуре. На этом принципе созданы устройства – испаляторы (т. е. испарители + осцилляторы) для наблюдения колебаний и вращений жидкостей в открытых или герметичных кюветах при испарении.

Обнаружена и объяснена линейчатая (модовая) структура в широкополосном излучении лазеров с жидкими резонаторами, имеющими линейные размеры 5-10 мм (без введения в них дополнительных селективных элементов). Показана возможность соединения жидких лазерных резонаторов с испаляторами в нестабильных оптических системах нелинейного характера для использования их в качестве чувствительных датчиков.

Обнаружено (оформлено двумя патентами), что химически инертные фторуглеродные молекулы при малых давлениях (сотые доли атмосферы) позволяют менять поверхностное натяжение многих жидкостей, для которых поверхностно активные вещества (ПАВ) не известны или мало доступны, использовать фторуглеродные молекулы многократно и работать с ними вплоть до 400 С. По сути это новое направление в физике поверхностей, имеющее большие перспективы при использовании летучих ПАВ.

Предложен и реализован новый способ генерации ультракоротких импульсов в твердотельных лазерах – самосинхронизация мод в режиме быстрой сдвинутой во времени отрицательной обратной связи, позволяющий с помощью простого устройства получать цуги стабильных пикосекундных и субпикосекундных импульсов. Разработаны оригинальные оптоэлектронные схемы, которые применены для управления генерацией импульсных лазеров на ИАГ:Nd и фосфатно-неодимовом стекле. Схемы основаны на использовании быстрых высоковольтных кремниевых структур (напряжение 1-10 кВ, время отклика фототока около 0,5 нс). При добавлении насыщающегося поглотителя

получен режим гибридной синхронизации мод с повышенной стабильностью генерируемых импульсов. Для неодим-фосфатного стекла длительность импульса составила до 0,8 пс. Исследована возможность применения атермального фосфатного стекла КГСС2037 в лазере ультракоротких импульсов. Со стержнем диаметром 5 мм в режиме быстрой сдвинутой во времени отрицательной обратной связи достигнута частота генерации 5 Гц при длительности импульсов 1,5 пс и высокой стабильности энергии импульсов.

Создана численная модель и отлажена программа для расчета параметров генерации лазера с чисто оптической внешней отрицательной обратной связью. Определены параметры, при которых лазер генерирует стабильные ультракороткие импульсы, получены зависимости энергии и длительности импульсов от величины задержки в цепи внешней отрицательной обратной связи. Показано, что при накачке элемента последовательностью ультракоротких импульсов возможно более чем трехкратное сокращение их длительности на выходе.

### 2.2.9 Лаборатория лазерной хирургии (ЛЛХ)

Лаборатория оформилась в 1986 г. (вместе с образованием отдела КРФ в составе ОКРФ), на основе научной группы д.ф.-м.н. Амбарцумяна Р.В. (Рис. 2.23), который и стал заведующим ЛЛХ.

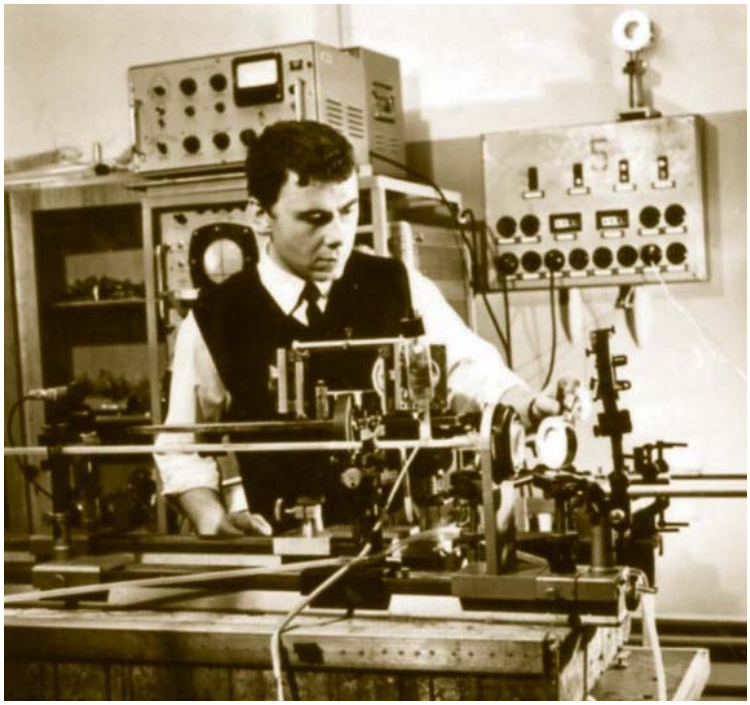


Рис. 2-23. Р.В. Амбарцумян проводит эксперимент.

Началу исследований по применению лазеров в медицине и биологии во многом способствовало полученное Н.Г. Басовым во время Великой Отечественной войны медицинское образование. Открытие в ЛКРФ направленного фотохимического действия инфракрасного излучения поставило вопрос о

возможном влиянии лазерного излучения на биохимические процессы. С другой стороны, лазер становился инструментом в разнообразных сферах деятельности человека, а значит, мог бы стать ему помощником и в медицине.

Придавая большое значение использованию лазеров в практической медицине, Н.Г. Басов уже в 1976 г. организовал проведение первых совместных работ сотрудников ФИАНа и Второго Московского мединститута, в которых участвовал Р.В. Амбарцумян. В ходе работ излучение лазера на парах меди было впервые успешно применено для остановки желудочных кровотечений, в том числе при операциях на труднодоступных участках желудочного тракта, когда использовалась система "лазер-эндоскоп". Учитывая перспективность нового направления, в структуре отделения КРФ была образована научная группа. В 1978–1981 гг. её сотрудники и сотрудники НИИ гастроэнтерологии провели успешные совместные эксперименты по удалению полипов желудка и лечению эрозий лазерным лучом. Эти работы создали почву для проведения 20 ноября 1980 г. по инициативе Н.Г. Басова совместной сессии Академии наук СССР и Академии медицинских наук СССР, на которой было принято решение о создании целого ряда межведомственных лабораторий для проведения в них совместных исследований в медицине.

Сотрудники ЛЛХ проводили широкие исследования взаимодействия лазерного излучения различных длин волн с биологическими тканями. Была развита модель фотохимических процессов, происходящих в живом организме под действием лазеров, используемых в терапевтических целях. В частности, было показано, что большинство процессов (если не все), приводящих к лечебному воздействию лазерного излучения, протекают вследствие образования кислорода в синглетном состоянии. Эта модель процессов позволила предсказать ряд новых эффектов в биологии, вызываемых лазерным излучением, а также предложить принципиально новый подход к лечению раковых заболеваний. В лаборатории велась разработка серии лазерных хирургических приборов, позволивших осуществить различные типы операций на сердце при тахикардии и ишемической болезни сердца. Разрабатывались приборы, использующие лазерную и волоконно-оптическую технику для диагностики, мониторинга состояния больных, лазерно-хирургических операций.

В 80-х годах в ЛЛХ совместно с Институтом морфологии человека установлено несомненное увеличение скорости регенерации органов (объект - личинки ксенопуса) под действием малых доз излучения лазера с длиной волны 0,63 мкм и 0,44 мкм. Экспериментально показано, что биостимуляционное воздействие лазерного излучения в области 0,63 микрона квадратично зависит от количества кислорода, растворенного в среде, что согласуется с предложенной моделью фотохимических биостимуляционных эффектов. Совместно с Московским медицинским стоматологическим институтом успешно проведены исследования по воздействию излучения $CO_2$-лазера (в импульсном и непрерывном

режимах) на твердые ткани зуба (эмаль, дентин), позволившие сформулировать предложения по использованию лазера в стоматологии.

Впервые совместно с Каунасской кардиологической клиникой и 51-й больницей Четвертого Главного Управления Минздрава СССР проведена операция на сердце человека по пресечению пучка Гисса, который управляет ритмом сердца. Опытный образец медицинского лазера на парах меди ЛПМ-15, разработанный совместно с ОКБ ФИАН, был передан в ЦНИИ гастроэнтерологии, где с его помощью успешно выполнен ряд внутриполостных операций на желудке человека. Совместно с МНТК «Микрохирургия глаза» создан лазерно-хирургический комплекс для корректировки зрения. Совместно с НПО «Лазерная техники» и онкологическим центром Минздрава Армянской ССР предложен и экспериментально опробован новый метод фототерапии раковых заболеваний с помощью лазерного излучения.

В 90-х годах в лаборатории совместно с НПО Исток-Лазер (г. Фрязино) и Научным центром сердечно сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева был разработан и внедрен в производство, а затем и в медицинскую практику лазер для операций по трансмиокардиальной реваскуляризации сердца (метод лечения ИБС, принятый во всем мире). Выпущены первые промышленные образцы, по техническим и эксплуатационным характеристикам превосходящие американский аналог фирмы PLC.

В ЛЛХ исследованы оптические свойства производного гематопорфирина, используемого в фотодинамической терапии рака. Методом селективного возбуждения люминесценции определена локализация гематопорфирина в биологической мембране, что имеет важное значение для изучения механизма разрушения раковых образований. Предложена теория миграции энергии между оптическими центрами в неупорядоченных системах. Получены выражения, связывающие частоту локализации экситонов с радиусом Ферстера и концентрацией оптических центров. Модель хорошо описывает параметры миграции энергии в тонких пленках полипарафенилена. Электрофоретическим методом исследовано изменение заряда альбумина после лазерного облучения с малой энергией кванта. Результаты сравнивались с изменением связывающих свойств молекулы. Сделан вывод, что зарядовая волна не является единственным механизмом изменения связывающих свойств альбумина в объёме.

### 2.2.10 Крымская научная станция (КНС) ФИАН

На КНС ФИАН в Кацивели, входившей на правах лаборатории в состав Отдела КРФ до 1997 года, под руководством д.ф.м.н., профессора Ю.Л. Кокурина (1926–2013 г.г.) проводились работы по лазерной локации Луны и искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Работы по локации Луны осуществлялись в рамках программы подготовки и доставки на Луну самоходных аппаратов "Луноход-1" и "Луноход-2" [20]. КНС ФИАН в сотрудничестве с французскими специалистами участвовала в создании и

установке на оба лунохода уголковых светоотражателей. Был создан и исследован ряд моделей лазерных локаторов, последний из которых обладал точностью измерения расстояний до Луны порядка 10-20 см и до начала 1980-х годов использовался для регулярных наблюдений светоотражателей как на советских аппаратах Луноход-1, - 2, так и на американских Аполлон-11, - 14, - 15. В конце 70-х на КНС была закончена разработка проекта телескопа ТГЛ-1, включающего в себя проекты собственного телескопа с диаметром главного зеркала I м, башни и купола.

В начале 1980-х годов деятельность КНС ФИАН направляется на проведение исследований в области лазерной локации ИСЗ. В 1983 г. создана первая стационарная лазерно-локационная станция ССЛ-1 с диаметром телескопа I м, и сеанс локации геодезического ИСЗ "Лагеос" показал точность определения дистанции 20 см. Данные измерений были переданы для использования в Координационный центр по международной программе "МЕРИТ".

В конце 80-х годов в сотрудничестве с рядом научных и промышленных организаций была смонтирована и введена в действие сеть "Крым" из пяти станций ССЛ-1, причём станция в п. Кацивели была базовой. Это положило начато проведению в 90-х годах регулярных наблюдений ИСЗ с целью решения научных и прикладных задач космической геодинамики.

В 1999 году КНС ФИАН была переименована в Крымскую лазерную обсерваторию Главной астрономической обсерватории НАН Украины.

### 2.3 Исследования по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) в Отделе ЛТС

Отдел ЛТС был образован в 1990 г. на базе сектора ЛКРФ, а затем лаборатории лазерной плазмы Отделения КРФ, которыми руководил лауреат Ленинской премии, д.ф.-м.н., профессор Склизков Г.В. (Рис. 2.24). К руководству отделом Н.Г. Басов привлёк Л. П. Феоктистова (1928–2002 г. г.), лауреата Ленинской (1958 г.) и Государственной (1978 г.) премий, Героя Социалистического Труда (1966 г.), член-корреспондента АН СССР (1966 г.), избранного в 2000 г. академиком РАН (Рис. 2.25).

Тематика работы отдела традиционно включала разработку мощных лазеров для термоядерных исследований, разработку и создание методов диагностики высокотемпературной лазерной плазмы, теоретический анализ и математическое моделирование физики взаимодействия лазерного излучения с веществом и процессов в лазерной плазме, сжатия и горения термоядерных мишеней, вопросы термоядерной и ядерной энергетики, анализ возможностей создания безопасных реакторов. В более позднее время тематика расширилась исследованиями проблемы гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания, которые при сжатии мишени ограничивают возможности кумуляции энергии; исследованиями физики «фемтосекундной» плазмы, возникающей при лазерном облучении мишеней сверхинтенсивными короткими импульсами; разработками и

применениями нейрокомпьютерных технологий к различным физическим и информационным задачам; различными (в том числе технологическими) применениями лазерной плазмы.

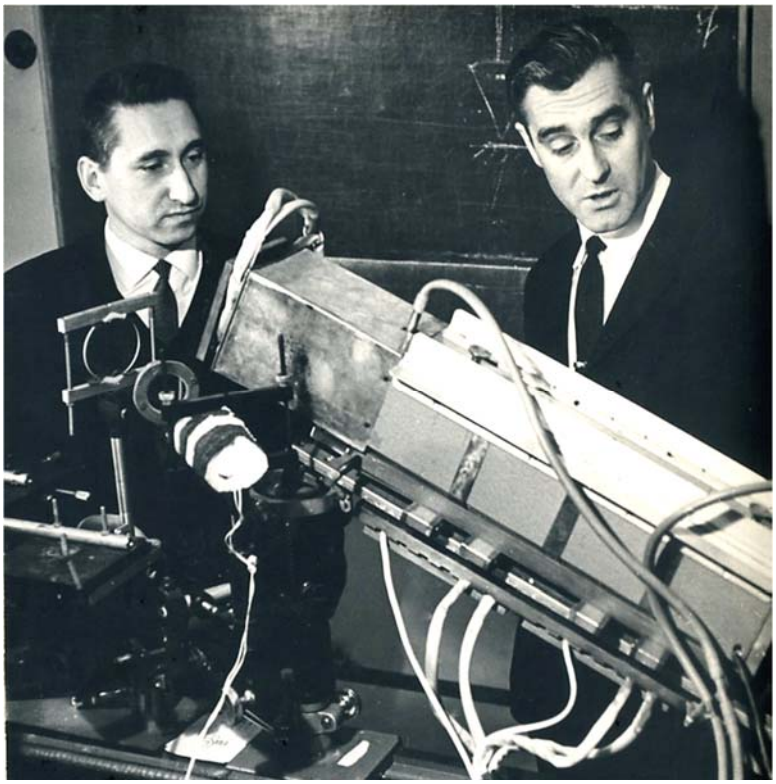


Рис. 2.24. Г.В. Склизков (слева) и О.Н. Крохин у модуля усиления излучения

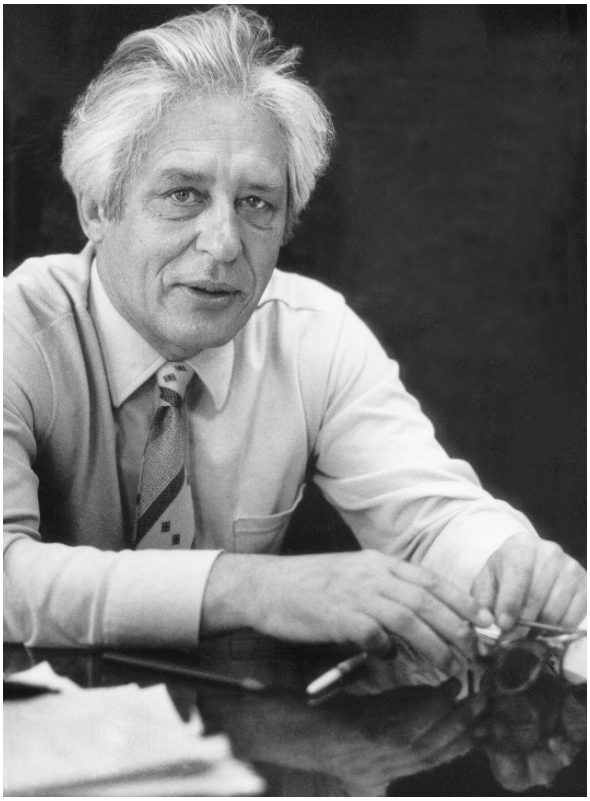


Рис. 2.25. Академик Л.П. Феоктистов

Наряду с фундаментальными исследованиями физических процессов, Н.Г. Басов совместно с группой ученых отдела также поставил впервые вопрос о разработках в нашей стране масштабных инженерно-технологических установок – лазерного термоядерного реактора (типа камеры для использования энергии микровзрыва) и, несколько позднее, различных типов ректоров: чисто термоядерного; гибридного, с использованием делящихся материалов, в частности, реактора – наработчика ядерного топлива; а также реактора – производителя химического топлива (свободного водорода).

При образовании отдела ЛТС в том же 1990 г. из его состава вышла лаборатория лазерной плазмы под руководством Г.В. Склизкова, которая структурно вошла в отдел КРФ, сосредоточив основные усилия на исследованиях взаимодействия излучения с веществом на одноканальном лазере на неодимовом стекле «Пико».

### 2.3.1 Лаборатория лазерной плазмы (ЛЛП)

С начала 60-х годов в лаборатории, руководимой лауреатом Ленинской премии, д.ф.м.н., профессором Г.В. Склизковым, по инициативе Н.Г. Басова и при его непосредственном участии было начато широкое и планомерное изучение физики электрических разрядов как источников излучения и интенсивных ударных и тепловых волн, а также связанных с этой проблемой разнообразных физических и технических вопросов. В результате, помимо решения важных прикладных задач, был создан и развит новый перспективный раздел науки – физика плотной излучающей плазмы.

В начале 70-х годов в лабораторном павильоне (отдельное двухэтажное здание рядом с главным корпусом ФИАН) в группе под руководством Бойко В.А. на одноканальном неодимовом лазере проводились исследования линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы, и были разработаны спектроскопические методы диагностики важнейших плазменных параметров – электронной и ионной температуры, электронной и ионной плотности, ионизационного состояния и скорости разлета плазмы, которые в дальнейшем нашли широкое применение во многих плазменных исследованиях.

Работы лаборатории в 70–80-х годах были связаны с разработкой метода сферического облучения и сжатия термоядерного горючего. В 1968 г. в корпусе ОКРФ было начато строительство 9-канальной лазерной установки на неодимовом стекле для исследований по лазерному термоядерному синтезу с целью много-пучкового облучения сферических мишеней. Создание установки было завершено в 1971 г. и на тот момент она стала первой и единственной в мире многоканальной лазерной установкой для исследований по проблеме ЛТС. Эта установка, впоследствии получившая название "Кальмар" (Рис. 2.26), обладала выходной энергией лазерного излучения 200 Дж при длительности импульса 2 нс, что позволяло при угловой расходимости излучения $2.10^{-4}$ рад. формировать на поверхности мишени плотности потока до $5.10^{14}$ Вт/см$^2$. Основной вклад в

разработку и создание установки внесли сотрудники  лаборатории Федотов С.И. и Круглов Б.В., хотя над ее созданием трудился весь большой коллектив лаборатории под руководством Склизкова Г.В., а также сотрудники отдела радиоэлектроники и конструкторского отдела ОКРФ (Рис. 2.27 и 2.28).

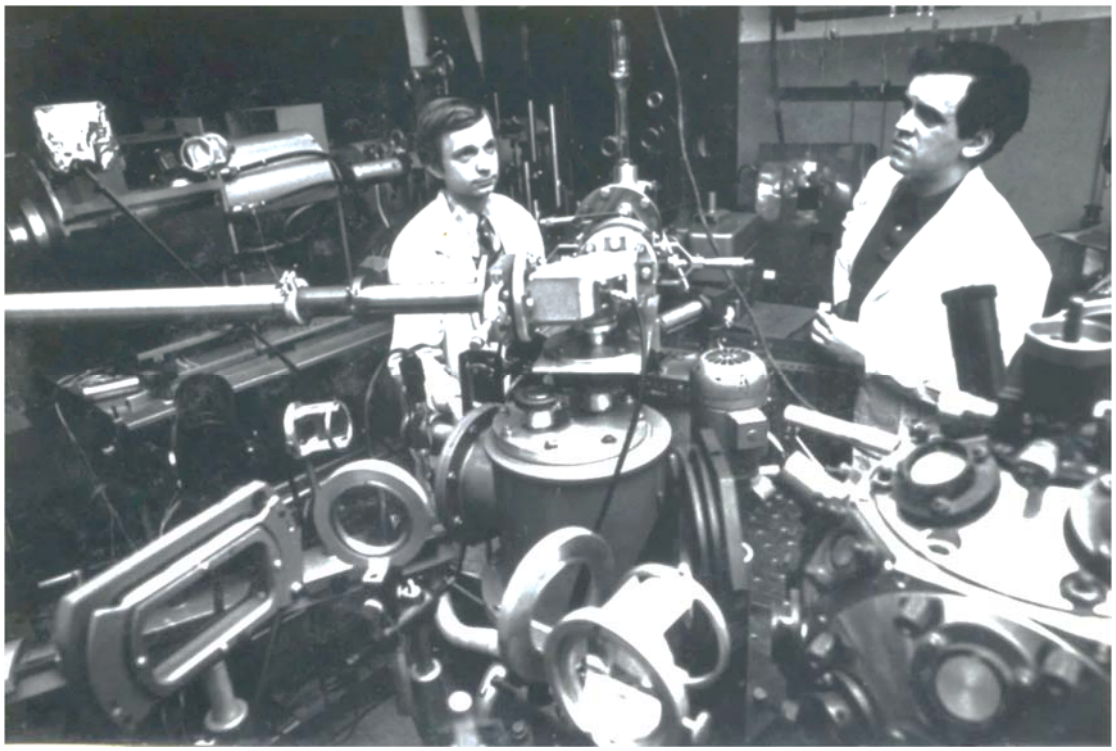


Рис. 2.26.  Ю.А. Захаренков (слева) и А.С. Шиканов на установке «Кальмар

Рис. 2.27.  Г.В. Склизков (в центре) с ведущими сотрудниками лаборатории на установке «Дельфин» (слева направ): А.Е. Данилов, С.И. Федотов, Ю.А. Михайлов, Б.В. Круглов

Рис. 2.28. В кабинете заведующего отделом ЛТС Склизкова Г.В. (слева направо): Ю.В. Сенатский, Б.В. Круглов, А.С. Шиканов, С.И. Федотов, Г.В. Склизков, В.Б. Розанов

На созданной установке были проведены эксперименты по исследованию эффективности нагрева оболочечных мишеней с аспектным отношением 30-50 из различных материалов (полистирол, стекло, медь). Методами рентгеновской диагностики обнаружено явление филаментации в плазменной короне оболочечной мишени при плотности потока лазерного излучения $5.10^{13}$ Вт/см$^2$. Впервые на установке «Кальмар» осуществлено сжатие двухкаскадных оболочечных мишеней (полистирол-вакуум-стекло-вакуум). Проведены расчеты спектра рентгеновского излучения мишеней и обскурограмм сжатия, в том числе двумерных, для условий несимметричного облучения, моделирующих эксперименты на установке "Кальмар". В последующих работах на этой установке были получены термоядерные ДД-нейтроны при сферическом облучении мощным лазерным излучением мишеней из дейтерированного полиэтилена (Шиканов А.С., Рупасов А.А., Михайлов Ю.А., Зорев Н.Н., Кологривов А.А.).

Завершено (совместно с Институтом физики плазмы и лазерного микросинтеза, ПНР) создание уникального, многоцелевого масс-спектрометрического комплекса, позволяющего проводить широкий круг исследований зарядового и энергетического состава плазмы термоядерных мишеней. Разработан и использован в эксперименте новый метод определения испаренной массы мишени по начальной стадии движения ударной волны в окружающем мишень газе, а также метод определения лазерного энерговклада в плазму по скорости движение ударной волны в остаточном газе внутри вакуумной камеры в ее заключительной стадии. Показана возможность достижения гидродинамического КПД в 8-10% для случая облучения мишени на длине волны I мкм (Шиканов А.С., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н.).

Параллельно с запуском 9-канальной установки "Кальмар" для сферического облучения мишеней в 1972 г. была создана одноканальная лазерная установка на неодимовом стекле (30 Дж, 2 нс) для облучения плоских мишеней при плотностях потока $10^{13} – 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см$^2$, которая успешно функционировала далее в течение 5 лет. Во многом благодаря результатам, полученным на этой установке, началось плодотворное сотрудничество Лаборатории лазерной плазмы с Сектором теории плазменных явлений ФИАН, возглавляемым профессором В.П. Силиным (1926-2019), ставшим в 1991 г. член-корреспондентом РАН. Инициатором такого сотрудничества, с присущей ему прозорливостью, был академик Н.Г. Басов.

Уже в 70-х годах специалистам в области взаимодействия мощных электромагнитных полей с плазмой стало ясно, что работы по ЛТС неизбежно столкнутся с необходимостью разобраться с проблемой нелинейного лазерно-плазменного взаимодействия в короне термоядерной мишени и прежде всего с преодолением возможных негативных проявлений так называемых параметрических неустойчивостей, препятствующих эффективному вложению лазерной энергии. Именно в секторе теории плазменных явлений работали в то время ведущие специалисты по параметрическим неустойчивостям, открытие которых было связано с именем В.П. Силина. Басов Н.Г. серьезно отнесся к проблеме и всецело поддержал развитие соответствующих работ на одноканальной установке, удачно вписывавшейся в подходящий для этого инструментарий. Можно отметить, что даже сейчас, спустя пять десятилетий, все еще продолжаются поиски путей эффективного подавления таких паразитных эффектов параметрических неустойчивостей, как нелинейное рассеяние и генерация горячих электронов. Тогда же, в 70-х, одновременно с возможными паразитными эффектами лазерно-плазменного взаимодействия в короне начала отрабатываться идея, что изучение последнего может иметь полезный потенциал для диагностики лазерной плазмы.

На одноканальной установке была получена (впервые в стране) генерация в плазме второй гармоники лазерного излучения и генерация полуторной гармоники (Шиканов А.С., Рупасов А.А., Захаренков Ю.А.). Эти гармоники возникали за счет развития в плазме параметрических неустойчивостей в областях критической и четверть критической плотности. Экспериментальные результаты были теоретически интерпретированы сотрудниками сектора - Пустоваловым В.В., Тихончуком В.Т. и Быченковым В.Ю., что позволило обосновать новые методы диагностики параметров плазмы в областях критической и четверть критической плотности по излучениям генерируемых гармоник. Была объяснена сложная спектральная структура излучения гармоник и ее эволюция при увеличении плотности потока греющего лазерного пучка. Так, у второй гармоники наряду с узким пиком, возникающим за счет линейной трансформации греющей волны в плазменные волны, при превышении определенного порога лазерной интенсивности возникал смещенный широкий пьедестал за счет развития ионно-звуковой неустойчивости. Полуторная же гармоника имела двух-пичковую

структуру спектра и возникала за счет развития двух-плазмонной распадной неустойчивости.

На установке было получено много важных результатов по взаимодействию лазерного излучения с плазмой: коэффициента поглощения, направленности и временной динамики отраженного излучения, генерации рентгеновского и корпускулярного излучений плазмы, процессов вынужденного рассеяния. Высокая скорострельность такой установки умеренных масштабов позволила в указанный период времени проводить разнообразные по постановке эксперименты по лазерному воздействию на твердые мишени, что сыграло важную роль в понимании физики протекающих в плазме процессов. Выполненные исследования внесли существенный вклад в подтверждение справедливости теоретических основ параметрических неустойчивостей, и в 1981 г. Быченков В.Ю., Стародуб А.Н. и Тихончук В.Т. (Рис. 2.29) были удостоены премии Ленинского комсомола в области естественных наук за работу «Физические эффекты в плазменных параметрических процессах».

Рис. 2.29. Лауреаты премии Ленинского комсомола 1981 г. (слева направо): В.Ю. Быченков, А.Н. Стародуб, В.Т. Тихончук

В 70 – 80-х годах в Лаборатории лазерной плазмы (сектор В.Б. Розанова) проведен теоретический анализ и численные расчеты излучения лазерной плазмы мишеней, разработана математическая программа. Разработана стационарная модель короны с учетом быстрых электронов. Предложены и рассчитаны новые типы сложных мишеней для экспериментов по ПТС, позволяющие по сравнению с простыми однослойными мишенями увеличить в 2÷3 раза концентрацию энергии

при гидродинамической кумуляции, а, следовательно, и температуру сжимаемого термоядерного горючего в случае облучения мишени наносекундным лазерным импульсом с умеренными потоками энергии порядка $10^{14}$ Вт/см$^2$, что соответствует увеличению нейтронного выхода более чем на порядок (совместно с ИПМ АН, НФЛ ФИАН).

В 1980 г. был введен в эксплуатацию усилительный модуль установки «Дельфин», продемонстрировавший работоспособность многоканального лазера на неодимовом стекле и широкие возможности выбора условий нагрева плазмы и облучения мишеней, и в следующем году был осуществлен запуск лазерной термоядерной установки «Дельфин». В каждой из 2-х секций установки (Рис. 2.30) пучок Ø40-45мм, сформированный в отдельном лазерном канале, вначале разделялся (в вертикальной плоскости) на 2, усиливался в 2-х усилителях, и затем полученные 2 пучка разделялись, каждый на 3 (и в вертикальной плоскости). В системе деления пучков на установке «Дельфин» использовались коллиматоры-расширители пучка на цилиндрической оптике и система поворотных призм.

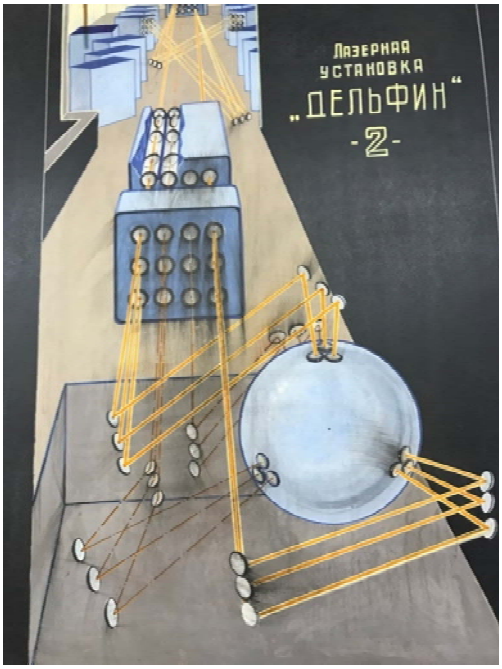



Рис. 2.30. Презентация проекта установки «Дельфин-2 для ЛТС.

Полученные после деления 6 пучков усиливались в 6 осветителях ГОС-1001, размещенных по вертикали в кассете предусилителя. Затем, каждый из 6 полученных пучков делился на 3 в горизонтальной плоскости и усиливался в 18 осветителях ГОС-1001предусилителя. Получалась, таким образом, матрица из 18 пучков: 3 по горизонтали и 6 по вертикали. Каждый из этих 18 пучков опять делился на 3 в горизонтальной плоскости. Полученные 54 пучка усиливались в выходных каскадах. Каждая из 3-х кассет выходного каскада содержала по 18 осветителей ГОС-1001 (по 3 осветителя в 6 слоях). Таким образом, в каждой секции установки 3-мя кассетами выходного каскада усилителя формировалось 54

пучка по схеме (1-2-6-18-54), а в 2-х секциях всего 108 пучков Ø40мм. Выходные 18 пучков с каждой кассеты подавались на отдельное многоэлементное зеркало с 18 поворотными призмами (позднее замененными на диэлектрические зеркала). Шесть составных пучков направлялись в шесть фокусирующих систем, которые концентрировали лазерное излучение на сферическую мишень в вакуумной камере.

В создании установки «Дельфин» принимал участие большой коллектив учёных и инженеров (Склизков Г.В., Федотов С.И., Круглов Б.В., Михайлов Ю.А., Сенатский Ю.В. и многие-многие другие), о чём свидетельствует фотография на Рис. 2.31.

В экспериментах по нагреву и сжатию высокоаспектных термоядерных мишеней на установке «Дельфин-1» продемонстрировано устойчивое сжатие термоядерных мишеней с аспектным отношением 100÷150. Максимальное объемное сжатие составило $3{,}5 \cdot 10^3$, скорость схлопывания оболочек 250 км/сек, энергия излучения на выходе лазера 2 кДж а на поверхности мишени 1,5 кДж, плотность потока $10^{14}$ Вт/см$^2$, поглощенная в мишени энергия 0,3÷0,5 кДж. При нагреве оболочечных мишеней, заполненных дейтерием, получен нейтронный выход около $10^6$ нейтронов за вспышку, коррелированный со сжатием мишени. Построена модель стационарной короны мишеней реакторного масштаба с учетом распределенного выделения энергии в плазме большой оптической толщины. Для целей диагностики по программе Монте-Карло рассчитаны выходы и спектры термоядерных частиц из лазерной плазмы двухкаскадных мишеней. Предложен метод диагностики сжатого ядра мишени по закалке ионизационного состояния (Федотов С.И., Михайлов Ю.А., Рупасов А.А., Захаренков Ю.А., Данилов А.Е., Кологривов А.А.).

В этот период проведены эксперименты по нагреву оболочечных мишеней различной конструкции, изготавливаемых в лаборатории термоядерных мишеней (зав. Меркульев Ю.А.) нейтронно-физического отдела ФИАН: измерена эффективность поглощения излучения (40÷50%); исследована возможность сжатия сверхтонких оболочек, перспективных для мишеней реакторного масштаба; измерены скорости движения оболочки к центру при сжатии (250 км/с).

Совместно с АН ГДР на основе проведенных исследований для лазерной термоядерной установки «Дельфин» была разработана и создана уникальная система наведения лазерных пучков на мишень, обеспечивающая концентрацию излучения на сферической мишени диаметром 350 мкм. Протестирована система питания установки «Дельфин» с подсистемой автоматизации. Проведены исследования 6-пучковой системы юстировки в динамическом режиме. Для экспериментов с 6-ю составными пучками создана и отлажена многоканальная рентгеноспектральная аппаратура для диагностики плазмы. Осуществлен запуск всех 6 каналов установки «Дельфин-1», при этом энергия лазерного излучения на выходе составила 1,5 кДж при длительности импульса 2 нсек и расходимости $3{,}6 \cdot 10^{-4}$ рад. (Федотов С.И., Михайлов Ю.А., Круглов Б.В., Данилов А.Е.).

Рис. 2.31. Сотрудники отдела ЛТС около установки «Дельфин».

В конце 80-х годов в ЛЛП теоретически и экспериментально разработан принципиально новый метод диагностики параметра ρR сжатой микросферы по характеристикам нейтральной компоненты разлетающейся плазмы для экспериментов на установке «Дельфин». В результате измерений спектра нейтральных атомов было установлено, что при увеличении толщины оболочки уменьшается доля быстрых атомов (со скоростями около $3 \cdot 10^7$ см/с) и возрастает число атомов, соответствующих разлету сжатого вещества оболочки (со скоростями около $10^7$ см/с). Тем самым продемонстрирована возможность контроля режима абляционного сжатия, когда к моменту сжатия остается не менее 20 % начальной массы оболочки (начальная толщина должна превышать 2 мкм).

Разработана и отлажена система 7-кадровой интерферометрии лазерной плазмы на длинах волн 0,53 мкм и 0,35 мкм с временным разрешением 70 пс. Для исследования протяженной плазмы (размером 1-5 см) с электронной плотностью $10^{17} – 10^{19}$ $см^{-3}$ разработана и испытана схема голографического интерферометра, использующая принципы построения сдвиговых интерферометров со встречным ходом лучей. Оптическая схема позволяла работать как в видимом, так и в ультрафиолетовом диапазоне, что являлось важным при двух-длинноволновом зондировании плазмы.

К разноплановым исследованиям лаборатории привлекались сотрудники Института физики плазмы и лазерного микросинтеза им. С. Калиского (ПНР), Центрального института оптики и спектроскопии АН ГДР, а также Университета Эссекса (Англия).

Достижения в исследованиях и инженерно-технологических разработках были отмечены двумя Государственными премиями СССР: в 1983 г. за разработку и применение фотографических материалов для астрономии, спектроскопии и диагностики термоядерной лазерной плазмы премии удостоены Михайлов Ю.А., Федотов С.И. и Шиканов А.С., а в 1986 г. за цикл работ "Создание методов лазерной диагностики и исследование высокотемпературной плазмы в физическом эксперименте" её получили Захаренков Ю.А., Рупасов А.А. и Грибков В.А.

Параллельно с созданием лазерных установок на неодимовом стекле для нагрева плазмы в лаборатории проводились исследования физических процессов в активной среде лазера, механизмов ограничения энергии и мощности, методов формирования коротких импульсов, требуемых пространственно-угловых характеристик лазерных пучков. Проведен анализ динамики сброса инверсии при усилении наносекундных импульсов в неодимовом стекле с учетом штарковской структуры и неоднородного уширения уровней лазерного перехода $^4F_{3/2}–^4I_{11/2}$ . Показано, что быстрая ($<10^{-11}$с) тепловая релаксация ионов $Nd^{3+}$ по штарковским компонентам рабочего перехода, как и их релаксация на основной уровень ($\leq 10^{-9}$с), способствует эффективному съему инверсии и усилению наносекундных импульсов в неодимовом стекле. Исследовано влияние безызлучательных переходов в активной среде на кинетику генерации в неодимовом лазере. Проведенный анализ позволил объяснить результаты экспериментов по генерации

и усилению наносекундных импульсов различной длительности в неодимовом стекле (Иванов В.В., Сенатский Ю.В.).

Обнаружены и исследованы нелинейные эффекты в лазерном стекле, возникающие при распространении мощных импульсов в оптическом тракте лазерной установки. Установлено влияние выбросов интенсивности на профиле лазерного пучка при его дифракции на диафрагмах и локальных неоднородностях в лазерной установке, на возникновение и развитие мелко-масштабной самофокусировки (ММС) лазерного пучка и характерных кольцевых разрушений в активной среде и в оптических элементах лазерной установки. В неодимовом стекле КНФС при плотности мощности ≥3 ГВт/см$^2$ в лазерном импульсе на длине волны $\lambda \approx 1{,}064$ мкм была зарегистрирована (впервые в лазерном стекле) линия ВКР $\lambda \approx 1{,}217$ мкм при конверсии в ВКР 5-10%. При плотностях мощности излучения 3-5 ГВт/см$^2$ в образцах фосфатных и силикатных неодимовых стекол обнаружен скачок поглощения (на длинах волн $\lambda_1 \approx 0{,}66$ мкм и $\lambda_2 \approx 1{,}06$ мкм) с уровня $^4I_{11/2}$ ионов неодима, возникавший при прохождении через образцы 0,5 нс лазерного импульса. Поглощение (до 0,15 см$^{-1}$) обусловлено быстрым (≤ 0,5 нс) заселением уровня $^4I_{11/2}$ при выделении энергии в канале ММС в стекле. (Быковский Н.Е., Иванов В.В., Сенатский Ю.В.).

При распространении пучка с интенсивностью $10^9$-$10^{10}$ Вт/см$^2$ в структуре дисков из неодимового стекла впервые наблюдались разрушения в дисках, обусловленные нелинейным эффектом формирования «горячих» изображений от локальных неоднородностей в среде. Для предотвращения опасных выбросов на профиле лазерного пучка, связанных с дифракцией, предложено «сглаживать» профиль пучка «мягкими» диафрагмами и разработано несколько типов «мягких» диафрагм, стойких к лазерному излучению. (Быковский Н.Е., Сенатский Ю.В.).

В 90-х годах важным направлением исследований руководимой Г.В. Склизковым Лаборатории лазерной плазмы (уже работавшей в структуре Отдела КРФ), являлось взаимодействие лазерного излучения сверхвысокой яркости (потоки $10^{14} \div 10^{18}$ Вт/см$^2$) с твердотельными мишенями и релятивистскими электронными пучками. Для этой цели была создана установка "Пико" (Рис. 2.32), состоящая из наносекундного лазера, пикосекундного лазера, мишенной вакуумной камеры и диагностического комплекса. Исследования проводились по следующим направлениям: изучение процессов усиления сверхкоротких импульсов в твердотельных системах; разработка эффективных усилителей и развязывающих устройств на большие плотности потока; исследование когерентных свойств усиливаемого излучения и их влияния на предельную яркость излучения; разработка системы синхронизации лазерных пучков; исследование взаимодействия лазерного излучения с мишенями различных типов.

В экспериментах на установке «Пико» (Михайлов Ю.А., Чекмарев А.М., Куценко А.В., Иванов В.А., Мацвейко А.А.) были обнаружены быстрые электроны с максимальной энергией до 380 кэВ и зафиксирована энергия макроскопических электромагнитных полей в плазме на уровне до 10% от поглощенной лазерной

энергии, что делает необходимым учёт этой энергии при рассмотрении уравнений состояния лазерной термоядерной плазмы. При характерном поперечном размере нагретой области плазмы около 150 мкм плотность электронного тока из плазмы составила 1 МА/см$^2$, что соответствует величине заряда на мишени порядка $10^{-5}$ К.

Рис.2.32. Установка “ПИКО” с мощным Nd- лазером

Экспериментально обнаружен эффект аномально большого проникновения лазерного излучения через фольги значительной толщины. Анализ этого явления с помощью одномерных и двумерных численных расчетов позволил предложить механизм «микропродавливания» плазмы вследствие сложной структуры лазерного пучка, состоящего из локальных пятен с различной интенсивностью «спеклов», характерной для экспериментов по ЛТС. На основе проведенных исследований предложен метод подавления эффекта для уменьшения вероятности развития неустойчивостей в лазерной термоядерной плазме.

### 2.3.2 Лаборатория диагностики плазмы (ЛДП)

Лабораторией диагностики плазмы, созданной в 1990 г., заведовал вплоть до 2016 г лауреат Государственной премии, д.ф.м.н., профессор А.С. Шиканов. ЛДП разрабатывала новые методы диагностики рентгеновского, оптического и корпускулярного излучения высокотемпературной сверхплотной плазмы с пространственным, временным и спектральным разрешением для исследований

плазмы, создаваемой на лазерных и пинчевых установках как в России, так и за рубежом.

В 90-х годах в лаборатории разработан и применен (Рупасов А.А., Саркисов Г.С.) на ряде лазерно-плазменных и пинчевых установок комплексный метод диагностики магнитных полей в плазме, основанный на эффекте Фарадея – вращении плоскости поляризации зондирующего плазму лазерного излучения. Создан ряд схем трехканальных поляроинтерферометров, позволяющих получить три изображения плазмы в зондирующем излучении- поляризационное, интерферометрическое и теневое, необходимые для корректных измерений магнитных полей в плазме.

Разработан рентгеновский спектрограф высокого разрешения на основе специально созданных пропускающих дифракционных решеток. С помощью такого спектрографа исследованы излучательные характеристики лазерной плазмы на ряде лазерных установок, плазмы пинча каскадированного газового лайнера и плазменного фокуса. Разработанные пропускающие дифракционные решетки обладают рядом важных преимуществ по сравнению с решетками отражательного типа со скользящим падением излучения – постоянным и не зависящим от длины волны коэффициентом эффективности, линейной спектральной дисперсией в широком диапазоне длин волн от единиц до сотен ангстрем, простотой юстировки при нормальном падении на решетку исследуемого излучения, компактностью, отсутствием астигматизма и возможностью обеспечения пространственного разрешения по исследуемому объекту (Рупасов А.А. – Рис. 2.33).

Разработан метод абсолютных измерений спектральной чувствительности детекторов мягкого рентгеновского излучения, основанный на использовании пучка синхротронного излучения и пропускающей дифракционной решетки. Работы проводились на ускорителе электронов С-60 – источнике синхротронного излучения в ЛЭВЭ ФИАН. Исследованы спектральные чувствительности микроканальных детекторов, ПЗС-детекторов и отечественных и зарубежных фотопленок в диапазоне длин волн 1,5 – 15 нм. Исследованы также поляризационные свойства высокоселективных многослойных рентгеновских зеркал и отражательные характеристики рентгеновских вогнутых зеркал “шепчущей моды” с широким спектральным диапазоном отражаемого излучения (Рупасов А.А., Кошевой М.О.).

Разработана диагностическая методика и проведены эксперименты по измерению спектров скоростей нейтральных атомов и ионов плазмы, создаваемой при взаимодействии лазерного излучения с плоскими мишенями из материалов с различными массовыми числами. Разработан точечный монохроматический рентгеновский источник на основе вакуумного диода с катодом, облучаемым лазером, и с энергией квантов около 5 кэВ, испускаемых титановым анодом. (Захаренков Ю.А.).

Совместно с Отделением оптики ФИАН проведено экспериментальное исследование взаимодействия мощного лазерного излучения с пористым

веществом малой плотности, которое рассматривается в качестве компонента в схемах лазерных термоядерных мишеней. Исследованы процессы формирования плазменного канала в таких мишенях, продольный и поперечный транспорт энергии, процессы вынужденного рассеяния и самофокусировки лазерного излучения в плазме малоплотного вещества (Рупасов А.А., Кошевой М.О., Касьянов Ю.С.).

Рис. 2.33. А.А. Рупасов

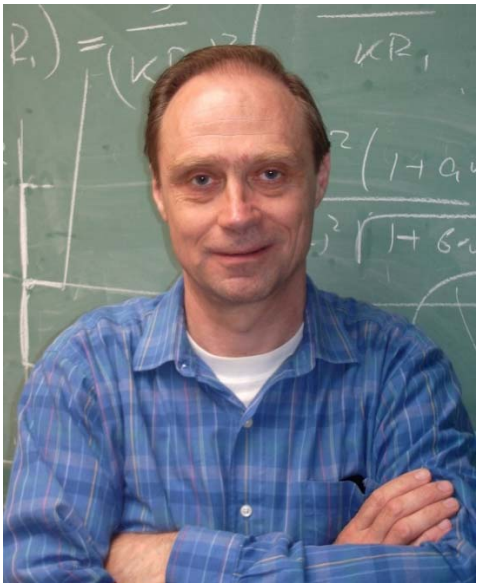


Рис. 2.34. В.Ю. Быченков

В 1995 году потенциал лаборатории вырос благодаря внутри-ФИАНовскому переходу в ее состав д.ф.-м.н. Быченкова В.Ю. (Рис. 2.34), и формированию в лаборатории группы теоретиков, занимающихся вопросами лазер-плазменного взаимодействия и кинетическими процессами в короне лазерной плазмы в условиях ЛТС. К этому времени, благодаря методу усиления чирпированных импульсов (Ж. Муру и Д. Стрикленд, Нобелевская премия 2018 г.), в мире уже лавинообразно шло развитие работ по взаимодействию сверхмощных ультракоротких лазерных импульсов с веществом. Группа одной из первых в России занялась этой тематикой, благодаря чему Отделение квантовой радиофизики заняло лидирующие позиции в данной области.

### 2.3.3 Лаборатория лазеров для термоядерного синтеза (ЛЛТС)

Лабораторией, которая была создана в 1990 г., заведовал (вплоть до 2016 г.) к.ф.-м.н. Ю.В. Сенатский (Рис. 1.17 и 2.28). ЛЛТС решала научно-исследовательские задачи, связанные с разработкой мощных лазеров по программе ЛТС.

Основным инструментом для проведения экспериментов по нагреву плазмы в 70-90-х гг. являлся лазер на неодимовом стекле с длиной волны излучения 1,06 мкм и короткими (наносекундными) импульсами. Исследовались физические процессы в оптической среде мощного неодимового лазера, включая ее накачку и съем

инверсии, методы формирования коротких и ультракоротких (пикосекундных) импульсов, дифракция и самофокусировка излучения при распространении лазерных пучков по оптическому тракту, изучались механизмы ограничения энергии и мощности лазерного излучения (вынужденные рассеяния, самофокусировка, разрушения в среде лазера). Были разработаны новые подходы к архитектуре лазерных систем для ЛТС и методы формирования мощных импульсов, применяемые для облучения мишеней на многих лазерных установках, а именно: формирование на выходе установки составных лазерных пучков (кластеров) и преобразование лазерного излучения в высшие гармоники.

В начале 80-х годов был сделан вывод, что основная проблема для лазерного синтеза заключается в создании импульсного лазера, способного работать в режиме, необходимом для реактора. Были определены параметры такого лазера: энергия 3-5 МДж и КПД 5-10 % при длительности импульса 10-20 нс. При этом необходимо фокусировать излучение на мишень размером порядка 4 см с расстояния 30-50 м, работать с частотой повторения 1–10 Гц и иметь достаточно низкую стоимость лазерной установки. Указанные требования и возможные лазеры, такие как $CO_2$, CO, химический (на смеси $H_2 + F_2$), эксимерный (KrF), на стекле с неодимом и йодный неоднократно обсуждались Н.Г. Басовым с коллегами. Были также предложены схемы мощных лазерных каналов на комбинированной (твердотельной и газовой) активной среде. Совместно с ФЭИ и ВНЦ ГОИ рассмотрена схема и проведены оценки параметров гибридной ядерно-термоядерной энергоустановки с подкритическим бланкетом и лазерным поджигом.

В начале 90-х годов на установке «Дельфин» была проведена работа по перестройке оптической схемы с использованием части усилительных модулей. Была испытана схема деления лазерных пучков в усилителе на прочных диэлектрических зеркалах разработки ЛОМО. Схема деления (1-2-6-18) позволила сформировать на выходе усилителей 6 кластеров по 6 пучков Ø40 мм с эффективным диаметром каждого кластера 150 мм и с общей энергией в 36 пучках около 1 кДж в импульсе длительностью 3 нс (Данилов А.Е., Круглов Б.В., Сенатский Ю.В., Федотов С.И.).

В 90-х гг. в связи с отсутствием финансирования работы на установке «Дельфин» были остановлены. В дальнейшем исследования в оптическом зале ОКРФ проводились на одноканальной лазерной установке на неодимовом стекле. По заданию ФИАН в НИИКИ ОЭП (г. Сосновый Бор) была разработана оптическая схема исследовательского лазерного канала – усилителя наносекундных импульсов на стержнях из неодимового стекла с выходной апертурой до ∅100 мм. Для практической реализации лазерного канала в оптическом зале ОКРФ была выбрана разработанная С.И. Федотовым схема задающего генератора и усилителя на стержнях из неодимового стекла для пучков излучения с ограниченной когерентностью. Для питания ламп накачки лазерного канала была разработана и смонтирована (совместно с МЭИ) энергоустановка на основе конденсаторов с

напряжением заряда до 20 кВ и запасаемой энергией 1 МДж. Эта энергоустановка используется и в настоящее время для питания лазерного канала на неодимовом стекле с выходной энергией до 100 Дж и длительностью импульса 2-3 нс (Круглов Б.В., Цыганков А.А.).

По результатам сравнительного анализа характеристик ряда твердотельных сред, активированных редкоземельными ионами и ионами металлов переходной группы, установлена перспективность разработки для целей ЛТС лазера-драйвера на кристаллах и керамике с иттербием, излучающих на длине волны около 1,03 мкм. Совместно с лабораторией нелинейных оптических явлений ОКРФ и сотрудниками ТРИНИТИ (г. Троицк) проведены модельные эксперименты по накачке образцов кристалла граната с иттербием. Достигнутый уровень инверсии (1-2 Дж/см$^3$), широкий спектр генерации (3 нм) и высокая теплопроводность Yb:YAG указывали на возможности применения этого кристалла (впоследствии Yb:YAG керамики) в лазере-драйвере с импульсно-периодическим режимом работы для получения мощных наносекундных и пикосекундных импульсов (Бурцев А.В., Быковский Н.Е., Зубарев И.Г., Ефимков В.Ф., Михайлов С.И., Сенатский Ю.В.).

В совместных с ВНИИЭФ (г. Саров) работах были предложены и защищены авторскими свидетельствами новые виды мягких диафрагм - аподизаторов пучков для мощных неодимовой и иодной лазерных установок. Сглаженный профиль пропускания диафрагм первого типа формируется за счет диссипации энергии пучка на оптических неоднородностях малого размера, вносимых в апертуру диафрагмы. Мягкие диафрагмы второго типа были выполнены на базе кювет с профилированным слоем поглощающей жидкости. При заполнении их раствором просветляющегося красителя кювета-мягкая диафрагма одновременно выполняла и функцию пассивного затвора. Такой затвор-аподизатор может использоваться для модуляции добротности и селекции мод в лазере - генераторе, а также в качестве межкаскадной развязки в оптическом тракте усилителя лазерной установки. (Быковский Н.Е., Зубарев И.Г., Пятахин М.В., Сенатский Ю.В., Шелоболин А.В.).

### 2.3.4 Сектор теории лазерной плазмы (СТЛП)

СТЛП был образован в 1974 году. Его руководителем вплоть до 2016 г. был лауреат Ленинской и Государственной премий, д.ф.-м.н., профессор В.Б. Розанов (1932–2019 гг.) – см. Рис. 1.34, 2.17 и 2.28.

Сектор является мировым лидером в области теории взаимодействия лазерного излучения с веществом, плотной высокотемпературной плазмы и лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Направления исследований относятся к физике взаимодействия тераваттного и петаваттного лазерного излучения с веществом, включая генерацию мощных лазерно-индуцированных ударных волн, потоков быстрых заряженных частиц и рентгеновского излучения, к физике мишеней лазерного термоядерного синтеза, включая сжатие и горение термоядерной плазмы, развитие гидродинамических неустойчивостей и

турбулентного перемешивания, а также к физике лазерно-индуцированных электродинамических явлений, в том числе применительно к лабораторной астрофизике.

Основным достижением 70-х годов стало создание концепции лазерного термоядерного синтеза (Басов Н.Г., Крохин О.Н., Розанов В.Б., Афанасьев Ю.В., Гамалий Е.Г. – Рис. 1.34), основанной на использовании термоядерной мишени в виде полой тонкостенной оболочки, содержащей слой дейтерий-тритиевого (ДТ) льда, и наносекундного лазерного импульса простой формы. Развитие этих работ проходило в условиях острой конкуренции с учёными США, которые развивали подход, основанный на использовании сплошной сферической мишени и сложного, остропрофилированного по времени лазерного импульса. Сегодня концепция оболочечной мишени является неотъемлемой частью всех известных на сегодняшний день подходов к зажиганию термоядерной реакции в плазме с инерциальным удержанием, которые развиваются в крупнейших лабораториях мира.

В 70–80-е годы была создана теория низкоэнтропийного сжатия многослойной оболочечной мишени и термоядерного горения неоднородной плазмы, создаваемой в результате сжатия мишени. К наиболее важным достижениям того времени относятся:

- теория обратного тормозного поглощения лазерного излучения в плазме и обоснование высокого поглощения энергии импульса коротковолнового лазерного излучения наносекундной длительности в сферических мишенях ЛТС–60-80% (Афанасьев Ю.В., Демченко Н.Н., Крохин О.Н., Розанов В.Б.);

- теория формирования давления в испаряемой под действием лазерного импульса части сферической мишени (Афанасьев Ю.В., Гамалий Е.Г., Крохин О.Н., Розанов В.Б);

- законы подобия для конечной скорости и степени сжатия мишени в зависимости от её начальных параметров и параметров лазерного импульса, которые доказали преимущество использования коротковолнового лазерного излучения для увеличения абляционного давления и достижения скорости полёта оболочки к центру 300-400 км/с, необходимой для нагрева сжимаемой ДТ-плазмы до термоядерных температур (Гамалий Е.Г., Гуськов С.Ю. – Рис. 2.6 и 2.35);

- теория гидродинамической неустойчивости при сжатии сферической мишени под действием лазерного излучения на линейной и нелинейной стадиях развития и установление допустимых пределов начальных возмущений для различных режимов сжатия (Гамалий Е.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б.);

- теория самоподдерживающейся волны термоядерного горения в неоднородной плазме сферических мишеней инерциального синтеза, включая автомодельные решения при различных механизмах переноса энергии (ударная волна, $\alpha$-частицы, электронная теплопроводность), и требования к характеристикам сжатия, обеспечивающих зажигание (Гуськов С.Ю., Крохин О.Н. и Розанов В.Б.).

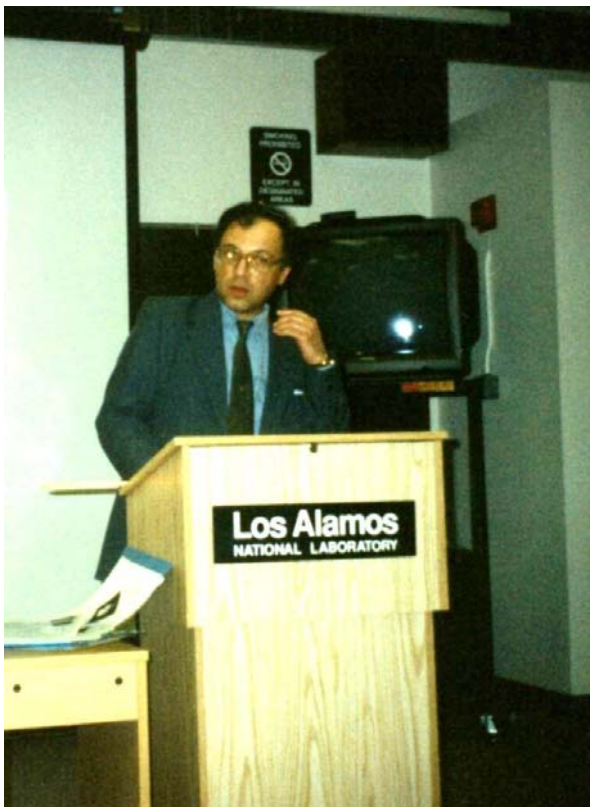



Рис. 2.35. Выступление С.Ю. Гуськова в «логове конкурентов» (1995 г.).

Эти и другие результаты стали теоретическим обоснованием возможности достижения высоких коэффициентов термоядерного усиления 10 -100 при энергии лазерного импульса на уровне 1-2 МДж.

В те же годы были разработаны мощные математические программы, предназначенные для численного моделирования взаимодействия лазерного излучения с мишенями различного типа в различных условиях облучения, а именно, программа РАПИД (Демченко Н.Н.) для решения одномерных уравнений гидродинамики и уравнений Максвелла с учетом параметров фокусирующей оптики и программа РАДИАН (Вергунова Г.А.) для решение одномерных уравнений гидродинамики при многогрупповом переносе собственного излучения плазмы и кинетики её ионизации.

Сектор принимал активное участие в теоретическом сопровождении экспериментов на установках «Кальмар» и «Дельфин» с плоскими и сферическими мишенями. В частности, были разработаны физические основы корпускулярной диагностики плазмы сферических мишеней ЛТС на основе измерения спектров и выходов первичных и вторичных термоядерных частиц (Гуськов С.Ю., Розанов В.Б.). Эти методы диагностики стали классическими и широко используются в экспериментах.

К началу 90-х годов понимание физики взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой во всем доступном к тому времени диапазоне интенсивности лазера (до $10^{17}$ Вт/см$^2$) было достаточно полным. Это стимулировало создание в крупнейших лабораториях мира лазерных установок следующего поколения, направленных на демонстрацию зажигания реакции синтеза. В области теории

основными приоритетами стали поиски путей повышения устойчивости сжатия и эффективности горения термоядерных мишеней. В 90-е годы в секторе были выполнены основополагающие исследования в этом направлении.

В 1992 году был предложен метод прямого зажигания (“fast ignition” – в англоязычной литературе) в ЛТС (Басов Н.Г., Гуськов С.Ю., Феоктистов Л.П.). Этот метод предполагает разделение процессов сжатия и нагрева термоядерной плазмы за счет использования дополнительного источника энергии (пучки лазерно-ускоренных электронов или ионов), который должен нагреть предварительно сжатую плазму за время ее инерциального удержания. Выполненные расчётно-теоретические исследования показали, что такой подход снижает энергию, необходимую для зажигания (коэффициент усиления около 1) до значений около 100 кДж, в то время как при энергии 10 МДж может быть достигнут коэффициент усиления $1{,}5\cdot10^3$, что более чем в 5 раз превышает наиболее оптимистичное предсказание для мишеней с традиционным искровым зажиганием. В настоящее время быстрое зажигание считается наиболее перспективным направлением в инерциальном термоядерном синтезе.

Исследования в области повышения устойчивости сжатия в ЛТС привели к разработке двух новых концепций термоядерной мишени – мишени «Лазерный парник» (Гуськов С.Ю., Розанов В.Б., 1994) и рентгеновской мишени прямого облучения (Гуськов С.Ю., Меркульев Ю.А., 2001). В основе концепций обеих мишеней лежит идея использования в традиционной оболочечной мишени дополнительного внешнего слоя малоплотного поглотителя лазерного излучения – в первом случае пористого вещества лёгких элементов, во втором пористого вещества лёгких элементов с добавками кластеров тяжёлых элементов. В такого рода поглотителях, плотность которых может изменяться от $10^{-3}$ до $5\text{x}10^{-2}$ г/см$^3$, обеспечивается объемное поглощение излучения наносекундного лазерного импульса и нагрев вещества поглотителя до высокой температуры (более 1 кэВ). При достаточной длине поглотителя (несколько сотен микрон) это приводит к эффективному выравниванию неоднородностей нагрева мишени за счет либо электронной, либо лучистой теплопроводности даже при облучении мишени небольшим количеством лазерных лучей (6–12).

В совместных экспериментах с итальянскими учёными обнаружен эффект аномально высокого (близкого к 100%) объёмного поглощения мощного лазерного излучения с интенсивностью $10^{13}$ – $10^{15}$ Вт/см$^2$ внутри пористого вещества со средней плотностью, значительно (в 5-10 раз) превышающей критическую плотность, соответствующую явлению плазменного резонанса. Теоретически обосновано (Гуськов С.Ю., Розанов В.Б., 1997), что в основе такого результата лежит явление возбуждения длинноволновых осцилляций плотности образующейся плазмы, которое приводит к достаточно длительному (несколько наносекунд) времени гомогенизации пористого вещества и сохранению в течение этого времени областей плазмы с докритической плотностью. Обнаруженное явление может быть использовано для эффективного нагрева регулярно или

стохастически объёмно-структурированных сред со сверхкритической средней плотностью, используемых в качестве поглотителя мишеней инерциального синтеза или в технологических целях.

Исследование в области физики импульсной лазерной плазмы объемно-структурированных сред привело к развитию прикладных исследований, направленных на создание простых и эффективных источников нейтронного и рентгеновского излучения (Гуськов С.Ю., Розанов В.Б.). Эти пионерские работы сформировали новое научное направление – физику неравновесной лазерной плазмы объемно-структурированных сред, исследования в котором сегодня являются одними из наиболее востребованными в области ЛТС и проводятся практически во всех крупнейших лазерных лабораториях мира.

В 1990-е годы и позже важное место в исследованиях сектора занимало расчётно-теоретическое обоснование конкретных схем лазерного термоядерного реактора (ЛТР) и лазерной термоядерной электростанции (ЛТЭС). Основы физики ЛТР были сформулированы в работе Н.Г. Басова, В.Б. Розанова и Н.М. Соболевского, опубликованной в 1975 году. В дальнейших работах были исследованы такие ключевые вопросы как доставка лазерного излучения в камеру взаимодействия, воздействие термоядерного микровзрыва на стенку камеры, эвакуация продуктов микровзрыва из камеры, преобразование энергии в тепловую энергию, наработка трития. В сотрудничестве с Институтами Министерства атомной промышленности и Академии наук были разработаны проекты «чистого» термоядерного реактора и гибридного реактора с бланкетом из делящегося материала, в котором ядерная реакция инициировалась потоком нейтронов из лазерной термоядерной мишени (Басов Н.Г., Розанов В.Б., Феоктистов Л.П).

В этот период на основе новейших достижений компьютерной математики были разработаны математические программы второго поколения, предназначенные для численного моделирования мишеней ЛТС: программа РАПИД-СП (Демченко Н.Н.) для решения одномерных гидродинамических уравнений и уравнений Максвелла при релятивистском описании электронов плазмы с учетом пондеромоторного давления и различные версии программы АТЛАНТ (Демченко Н.Н., Лебо И.Г.) для решения двумерных гидродинамических уравнений в двух- и трех- температурном приближениях с использованием реальных уравнений состояния, резонансного поглощения и генерации быстрых электронов.

Сектор теории лазерной плазмы на протяжении многих лет проводит исследования в плодотворном сотрудничестве со многими ведущими институтами в России и за рубежом, такими как Институт прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Объединённый институт высоких температур РАН, Научный центр PALS (Чехия), Научный центр ENEA-Frascati (Италия), Институт ILE Университета г. Осака (Япония) Институт CELIA Университета г. Бордо (Франция), Институт GSI (Германия) и другими.

### 2.3.5 Сектор теории взаимодействия излучения с веществом (СТВИВ)

В обозреваемый период сектором заведовал д.ф.-м.н., профессор Ю.В. Афанасьев (Рис. 1.34). Сектор проводил исследования процессов взаимодействия потоков энергии с плазмой и конденсированными средами в широком диапазоне плотностей энергии, охватывающем высокотемпературные и технологические применения. Важные направления исследований были также связаны с разработкой и оптимизацией режимов нагрева мишеней для термоядерного синтеза мощными лазерными и ионными пучками и технологическими применениями пучков.

В 70-х годах Афанасьевым Ю.В. совместно с Беленовым Э.М., Крохиным О.Н. и Полуэктовым И.А. была развита теория лазерного пробоя атомарных и молекулярных газов в диапазоне от микросекундных до пикосекундных длительностей лазерных импульсов. За цикл работ по лазерному излучению и его взаимодействию с веществом в 1982 г. Крохину О.Н. присуждена Государственная премия СССР.

В 80-х годах Афанасьевым Ю.В. совместно с Исаковым В.А. были определены гидродинамические КПД для задач термоядерного синтеза на пучках ионов, позволившие определить наиболее перспективные для этих целей структуры мишеней. Тогда же были проведены исследования конверсии лазерного излучения в ВЧ и СВЧ диапазоны и найдены КПД преобразования излучения для различных частот.

В 90-х годах в секторе развернуты работы, посвященные взаимодействию фемтосекундных лазерных импульсов с веществом и их применением в технологии обработки материалов. Была развита гидродинамическая теория лазерной абляции металлов под действием лазерных импульсов в диапазоне плотностей энергии $10^{-1} \div 10^{4}$ Дж/см$^2$ и длительностей от 1 пс до 100 фс, которая включала аналитическое исследование теплового режима абляции и режима абляции в ударной волне. Показано, что наиболее эффективным является режим абляции в ударной волне. Найдены аналитические зависимости скорости абляции от плотности потока энергии для обоих режимов, и разработана специальная численная программа, включающая все основные физические механизмы, определяющие процесс абляции.

Физическая модель процесса абляции основана на уравнениях двухжидкостной гидродинамики, с учетом электронной теплопроводности, электрон-ионной релаксации, эффекта вырождения электронного газа, механизма фазового перехода «твердое тело–пар», и на системе уравнений Максвелла, описывающей поглощение и отражение лазерного излучения. В рамках двух-температурной модели металла и механизма неравновесного испарения в вакуум развита аналитическая теория лазерной абляции ультракороткими импульсами при низких плотностях лазерной энергии (менее 1 Дж/см$^2$). Получены аналитические зависимости пороговой величины плотности энергии $F_{th}$, как функции параметров

металла (температура Ферми, энергия связи ионов в решетке, теплоемкость электронного газа, времена электронной релаксации).

Развита теория гидродинамического движения вещества (металла) при температуре порядка критической и плотности, близкой к нормальной. Физическая модель основана на представлении о металле, как неидеальном газе электронейтральных атомных ячеек. В рамках данной теории исследована зависимость скорости лазерной абляции в диапазоне плотностей энергии $10^2 \div 10^4$ мДж/см$^2$ и длительности импульса порядка 100 фс.

Развита гидродинамическая теория «холодной» абляции органических веществ (полимеров) наносекундными лазерными импульсами ВУФ – диапазона. Физическая модель абляции в данном случае основана на представлении о квазиравновесном фазовом переходе «твердое тело – пар». Получены аналитические формулы для абляционных характеристик, хорошо описывающие экспериментальные результаты. Были проведены исследования оптических свойств металлов и плазмы при воздействии лазерных импульсов фемтосекундной длительности на вещество. Показано, как по данным экспериментов «греющий-пробный» импульсы излучения можно определять кинетические параметры металлов и плазмы, недоступные для других физических методов измерений. Разработана гидродинамическая теория лазерной стационарной короны. В модели, учитывающей электронную теплопроводность и локальное поглощение лазерного излучения, получены точные универсальные решения.

## 2.4 Исследования по оптоэлектронике (ОЭ) в Отделе ОЭ

Отдел оптоэлектроники был создан в 1990 году из лаборатории того же наименования, которая была образована в Отделении квантовой радиофизики в 1978 году на основе ряда секторов, успешно развивающих актуальные в то и в настоящее время исследования в области создания и использования полупроводниковых лазеров и методов оптической обработки и хранения информации. Заведующим лабораторией и отделом ОЭ являлся лауреат Ленинской премии и Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор Попов Ю.М.

В 70-х годах, продолжая исследования по разработке полупроводниковых лазеров (как инжекционных, так и с электронной накачкой) и по их использованию в волоконной оптике и оптоэлектронике, Н.Г. Басов значительно расширяет фронт работ по оптической обработке и хранению информации. С этой целью разрабатываются электрически и оптически управляемые пространственные модуляторы света (управляемые транспаранты), развиваются различные методы оптической записи (хранения) и обработки информации, включая дискретные вычисления в оптике, создаются высокочувствительные приемники света, в том числе на основе структур металл-диэлектрик- полупроводник, фоточувствительность которых близка к чувствительности фотоэлектронных умножителей (ФЭУ).

Задача разработки оптических (точнее, оптоэлектронных) методов и устройств информатики вытекала из проекта создания оптоэлектронной вычислительной машины, подготовка которого была инициирована Н.Г. Басовым весной 1970 г. Эти устройства наряду с лазерными источниками света могли бы стать ключевыми элементами системы параллельных вычислений, работающей на принципах, материалах и методах оптоэлектроники и, как было задумано, конкурирующей по производительности с электронными вычислительными системами того времени. По итогам обсуждения проекта в Отделении квантовой радиофизики (ОКРФ), в рамках его структуры были развёрнуты весьма актуальные тогда исследования. И хотя чисто электронные вычисления в скором времени показали гораздо большую эффективность, результаты проведённых фундаментальных исследований оказались востребованными для многих областей науки и техники, включая лазерную физику, оптику, информатику, и вследствие их научной и практической значимости были отмечены тремя Государственными премиями и двумя премиями АН СССР и АН ГДР, а также неоднократно премировались на научных конкурсах ФИАН и ВДНХ СССР.

К 2000 г. в отдел ОЭ входили четыре лаборатории: инжекционных лазеров, полупроводниковых лазеров с электронной накачкой, оптоэлектронных процессоров, сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации. Однако, с середины 70-х и в 80-х годах в составе лаборатории ОЭ по её тематике работал также сектор регистрирующих сред д.ф.м.н. А.Ф. Плотникова, в котором велись разработки структур для оптоэлектронной записи информации (группа В.Н. Селезнёва) и фоторегистрации оптических сигналов (группа В.Э Шубина). В конце 80-х годов сотрудники этого сектора были переведены в Отделение физики твёрдого тела.

### 2.4.1 Лаборатория инжекционных лазеров (ЛИЛ)

Лабораторией до отъезда на жительство в США в 1994 заведовал лауреат Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор П.Г. Елисеев (1936–2021 гг.), а после него лауреат Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор А.П. Богатов (Рис. 1.25 и 1.26).

Основным направлением теоретических и экспериментальных исследований лаборатории является дальнейшее развитие инжекционных гетеролазеров: расширение спектрального диапазона их генерации, определение оптимального режима работы, создание малошумящих инжекционных усилителей света, исследования возможностей применения инжекционных лазеров.

В 70-х годах на основе теоретических и экспериментальных исследований созданы инжекционные лазеры, излучающие в одномодовои режиме до 100 мВт (при 77 К) непрерывной мощности и до б Вт в импульсе; в гетероструктуре на основе новой четырехкомпонентной системы GaInPAs совместно с ГИРЕДМЕТ осуществлена генерация на длине волны 1,06 мкм; впервые в мире создан

инжекционный лазер на основе гетероструктур InGaSbAs/GaSb с длиной волны излучения 1,9 мкм (Елисеев П.Г., Свердлов Б.Н.).

Совместно с ГИРЕДМЕТ проведены исследования полупроводниковых многокомпонентных твердых растворов, на основе которых впервые осуществлены неохлаждаемые гетеролазеры в диапазоне спектра 1,05 – 1,15 мкм с пороговой плотностью тока 10 кА/см$^2$ и мощностью излучения 1 Вт, впервые осуществлены инжекционные геторолазеры, работающие при комнатной температуре на длине волны 1,75 мкм. Созданы инжекционные лазеры полоскового типа, работающие при комнатной температуре в режиме импульсов с частотой повторения 10 МГц и пиковой мощностью излучения более 0,1 Вт, предназначенные для оптической связи (Елисеев П.Г., Богатов А.П., Свердлов Б.Н.).

Закончен цикл исследований по нелинейной динамике генерации в лазерах на односторонних гетероструктурах при использовании внешнего дисперсионного резонатора. Получена перестраиваемая одночастотная генерация в инжекционном лазере на основе GaAs- AlGaAs, работающем в непрерывном режиме при 300°К с внешним двсперсионным резонатором. В диапазоне 0,85 – 0,9 мкм осуществлен инжекционный перестраиваемый лазер с дисперсионным резонатором и проведено измерение ширины линии методом сбивания частот от двух идентичных лазеров (Богатов А.П.). Ширина линии составила менее 100 кГц при мощности до 4 мВт.

Совместно с ГИРЕДМЕТ улучшены характеристики ПКГ в спектральном диапазоне 1,05 мкм и получен непрерывный режим генерации, а также осуществлена генерация на длинах волн до 2,0 мкм. Создан гетерофотодиод на основе четырёхкомпонентного твёрдого раствора с рекордной квантовой эффективностью на длине волны 1,06 мкм (около 100 %) и чувствительностью более 0,5 А/Вт. Совместно с НИИ «Полюс» выполнен цикл экспериментальных и теоретических исследований по деградационным явлениям в гетеролазерах, в том числе на основе GaInPAs; впервые в отечественной практике достигнут срок службы гетеролазеров при 300°К до 10 тыс. часов и получена рекордная внешняя эффективность (28%) изучения гетероэпитаксиальных структур в спектральном диапазоне 1,1 мкм. Для целей оптической связи и влагометрии созданы низкопороговые (1,5 кА/см$^2$ при комнатной температуре) гетеролазеры на основе четверных твердых растворов, работающие в диапазоне длин волн 1,6 - 1,8 мкм (Елисеев П.Г., Дракин А.Е., Свердлов Б.Н., Скрипкин В.А.).

В начале 80-х годов предложен и осуществлен вариант полоскового гетеролазера с зарощенной мезаполоской на основе четверной системы, дающего когерентное излучение в диапазоне 1,25–1,35 мкм, оптимальном для использования в волоконно-оптических линиях связи. Получено одномодовое излучение в широком диапазоне мощности - до 10 мВт в непрерывном режиме. Ресурсные испытания лазера в течение 2 тыс. часов при 300°К не обнаружили его заметной деградации. Работа выполнена совместно с ГИРЕДМЕТом, и в ней участвовали Елисеев П.Г., Безотосный В.В., Дракин А.Е., Свердлов Б.Н., Скрипкин В.А.). Технология производства зарощенных меза-полосковых гетеролазеров,

излучающих в диапазоне 1,6–1,8 мкм при комнатной температуре, передана в НПО «Полюс» и в ОКБ завода ПУЛ (г. Саратов). Совместно с НИИ "Полюс" разработан инжекционный канальный лазер, работающий при комнатной температуре в одночастотном режиме. Совместно с МИИГАИК изучены возможности применения инжекционных лазеров в геодезии для интерференционного измерения расстояний с точностью $10^{-7}$.

В результате внедрения на отраслевом предприятии МЭП освоен промышленный выпуск непрерывного инжекционного лазера на длину волны 1,3 мкм (прибор ИЛПН-202) с безотказной наработкой свыше 10000 часов. Отработана методика получения с помощью инжекционных лазеров регулярных пикосекундных импульсов. Разработана оптическая линия связи для передачи телевизионных изображений и исследована эффективность согласования полупроводниковых излучателей с тонкопленочными волноводами.

За цикл работ «Изопериодические гетероструктуры многокомпонентных (четверных) твердых растворов полупроводниковых соединений $A_3B_5$» сотрудники ЛИЛ Богатов А.П., Елисеев П.Г. и Свердлов Б.Н. (Рис. 2.36) совместно с коллегами из ЛФТИ им. А.Ф. Иоффе, НИИ «Полюс» и ГИРЕДМЕТ, были удостоены в 1984 г. Государственной премии СССР.

Рис. 2.36. Творческий коллектив (слева направо): Богатов А.П., Свердлов Б.Н., Елисеев П.Г. (сидят), Васильев М.Г. и Дураев В.П.

В 80-х годах в ЛИЛ осуществлен непрерывный режим генерации полупроводниковых лазеров в диапазоне длин волн 1,5–1,6 мкм цри комнатной температуре. Создан наиболее длинноволновый инжекционный лазер, работающий при комнатной температуре на длине волны 2,4 мкм. В совместной работе с ГИРЕДМЕТ МЦМ СССР впервые в мировой практике выращены соответствующие

лазерные гетероструктуры на основе индий-галлий-сурьма-мышьяк с эмиттерными слоями в системе галлий-алюминий-сурьма-мышьяк (обе системы изопериодические, с подложкой из антимонида галлия). Это открывает новые возможности для оптической связи, поскольку потери в стекловолокне на длине волны 2,4 мкм могут быть уменьшены на порядок по сравнению с потерями на 1,3 мкм. Гетеролазеры этого типа также перспективны для применений в спектроаналитических датчиках и для детектирования примесей в газовых средах. Это показано в работе, выполненной совместно с ГИРЕДМЕТ МЦМ СССР, в которой участвовали Елисеев П.Г., Дракин А.Е., Свердлов Б.Н., Скрипкин В.А.). В InGaAsP/InP - гетеролазерах получена полоса модуляции более 5 ГГц при прямой модуляции тока накачки.

Впервые предложен и экспериментально реализован в ФИАН совместно с ГДР и Минэлектронпромом СССР новый принцип регистрации спектральных характеристик излучения с помощью миниатюрных твердотельных детекторов, основанный на регистрации профиля поглощенной энергии света по толщине детектора. В разработке использованы последние достижения в технологии осаждения тонких фоточувствительных слоев и изолирующих пленок. Такие приборы отличаются малой стоимостью, компактностью, легко стыкуются с интегральными схемами обработки. Работа отмечена в 1988 г. Премией АН ГДР и АН СССР за лучшие совместные работы.

На рубеже 80–90-х годов в лаборатории осуществлена модуляция излучения гетеролазера на основе InGaAsP/InP, работающего в диапазоне 1,5 мкм с частотой модуляции до 2 ГГц. Впервые осуществлен режим излучения пикосекундных импульсов при когерентном взаимодействии с активной средой инжекционного лазера. Получены импульсы длительностью 2 нс с частотой следования 100 ГГц. Были проведены исследования (совместно с НИИ "Полюс") спектральных характеристик одномодовых РОС-лазеров диапазона длин волн 1,3-1,55 мкм, непрерывная мощность одночастотной генерации в которых составила 8-10 мВт. Созданы (на базе лазерной головки без дополнительной внешней оптической аппаратуры) датчики ультрамалых смещений и микровибраций с обнаружительной способностью порядка 1нм.

Совместно с ОТПМ ОКБ ФИАН разработан новый тип многоэлементных монолитных лазерных излучателей в системе GaAs/AlGaAs на основе диффузионной полосковой структуры. На этом принципе изготовлены инжекционные лазеры с длиной волны 0,81 мкм и с максимальной мощностью излучения более 0,4 Вт в непрерывном режиме при 300 К с КПД 40 %. Несмотря на проблемы в технологии, удалось создать линейки лазерных диодов, характеристики которых приближаются к достигнутым за рубежом. Полученные результаты можно использовать при разработке систем диодной накачки твердотельных лазеров, систем оптической связи, медицинских терапевтических и хирургических приборов.

В девяностые годы установлена температурная зависимость эффективности и спектра излучения квантоворазмерных структур в системе GaN/InGaN, являющейся наиболее перспективной с точки зрения дальнейшего прогресса в области коротковолновой оптоэлектроники (Елисеев П.Г., Акимова И.В.). Совместно с НИИ «Полюс» предложены и созданы новые конструкции полупроводниковых лазеров, работающих на «вытекающих» модах, способные обеспечить малую расходимость излучения (Богатов А.П., Дракин А.Е.). На основе шести-волнового взаимодействия волн развита теория для расчета поперечной неустойчивости интенсивности оптической волны, распространяющейся в усиливающей полупроводниковой среде. Теория позволяет оптимизировать конструкции мощных полупроводниковых лазеров с дифракционной расходимостью излучения (Богатов А.П.).

Совместно с предприятием «Инжект», г. Саратов разработаны двумерные матрицы диодных лазеров с излучающей поверхностью 1 $см^2$, имеющие в квазинепрерывном режиме выходную мощность 0,5 и 1,0 кВт на длине волны 808 нм и КПД до 40 %. Эти матрицы являются наиболее компактными и экономичными преобразователями электрической энергии в когерентное излучение. Поэтому создание высокоэффективных лазерных систем, имеющих народно-хозяйственное и оборонное значение, зависит от использования таких матриц. Они имеют широкий спектр применений в технологии, медицине и научных исследованиях, в том числе для лазерного термоядерного синтеза.

Совместно с фирмой «Сигма плюс», г. Москва разработаны: непрерывные лазеры на длине волны 808 нм с выходной мощностью 1 Вт, полным КПД. 50% и сроком службы $10^4$ часов, а также непрерывные лазеры с повышенной силой излучения на длине волны 1060 нм, имеющие выходную мощность 2 Вт и расходимость излучения 20-25 градусов в плоскости, перпендикулярной p-n переходу.

Измерен коэффициент амплитудно-фазовой связи для квантоворазмерных напряженных лазеров InGaAs/AlGaAs/GaAs (Богатов А.П., Дракин А.Е.). Определены параметры рекомбинацмонного баланса в квантоворазмерных структурах GaN/InGaN/AlGaN. Проведено экспериментальное измерение фактора спонтанного излучения в моду квантоворазмерного полупроводникового лазера. Разработана двумерная тепловая модель лазерного диода.

### 2.4.2 Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (ЛПЛЭН)

В лаборатории ПЛЭН, которой заведовал лауреат Государственной премии СССР, д.т.н., профессор А.С. Насибов (Рис. 2.37), проводились исследования и техническая разработка уникальных приборов - лазерных электронно-лучевых трубок (ЛЭЛТ), в основе которых лежало изобретение Н.Г. Басова, О.В. Богданкевича, А.С. Насибова (оформлено в 1970 г.). ЛЭЛТ в режиме телевизионного сканирования обеспечивают рекордно высокие световые потоки, в

10000 раз более высокие по сравнению с бытовыми телевизорами. Основными задачами исследований были: повышение срока службы ЛЭЛТ, освоение новых диапазонов частот генерации, совершенствование технологии выращивания полупроводниковых монокристаллов и последующих операций по изготовлению лазерных экранов.

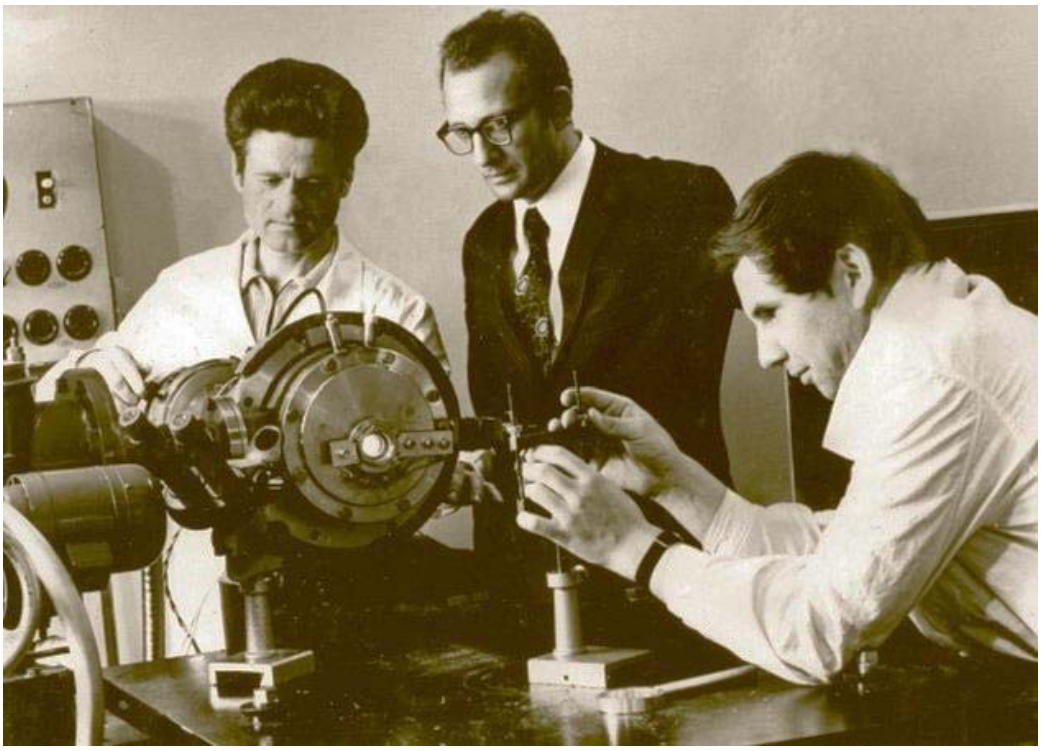


Рис. 2.37. В.П. Папуша, А.С. Насибов и В.И. Козловский (слева направо) у лазерного ЭЛТ-проектора с полупроводниковой мишенью

В начале 70-х годов был разработан так называемый «лазерный экран» на основе электронно-лучевой трубки и охлаждаемой мишени в ней, представляющей собой кристалл полупроводникового соединения $A_2B_6$, излучающий в синей, зелёной или красной области спектра (в зависимости от конкретного состава полупроводника) под действием его накачки электронным лучом. Тем самым была продемонстрирована возможность использования принципиально новых лазерных систем для отображения в реальном масштабе времени информации на большом экране, размером в несколько квадратных метров (Рис. 2.38). Вскоре была получена генерация лазерного излучения при комнатной температуре в телевизионном режиме работы «лазерной ЭЛТ». Впервые были проведены исследования лазерных параметров (порога, эффективности, спектра) при высоком уровне возбуждения электронным пучком лазерных экранов в процессе длительной эксплуатации (тысячи часов). Исследования макетного варианта электронно-лучевой трубки также показали перспективность использования этой трубки для считывания и записи голограмм с плотностью данных $10^4$ бит/мм$^2$.

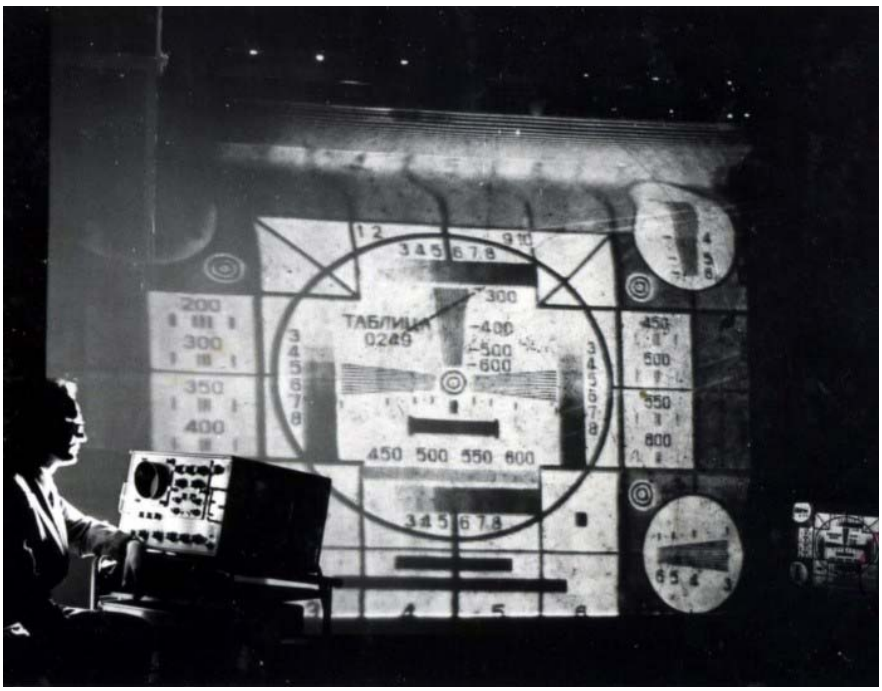



Рис. 2.38. Лазерный ЭЛТ-проектор проецирует ТВ таблицу на большой экран

К началу 80-х годов на ЭЛТ с лазерными экранами на основе монокристаллов сульфидов кадмия - цинка, кадмия-селена и селенида цинка получена генерация в синей, зеленой и красной областях спектра в режиме ТВ-растра при комнатной температуре. Впервые на основе лазерной электронно-лучевой трубки с полупроводниковой мишенью реализовано цветное проекционное изображение площадью до 10 кв. м.

За исследования и создание сканирующих полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением для проекционных телевизионных систем в 1977 г. молодые сотрудники лаборатории Борович Л.А., Васильев Б.И. и Козловский В.И. были удостоены премии Ленинского комсомола. В 1984 г. за разработку и создание новых энергетических устройств Государственная премия СССР была присуждена Насибову А.С.. Разработку полупроводниковых мишеней осуществили его коллеги Козловский В.И., Резников П.В., Скасырский Я.К., Коростелин Ю.В., Шапкин П.В.

Ещё в середине 70-х годов в ЛПЛЭН были теоретически и экспериментально исследованы полупроводниковые лазеры нового типа, возбуждаемые стримерными разрядами. Получена генерация в видимой области спектра при использовании полупроводников $A_2B_6$, возбуждаемых импульсами электрического поля. Показана возможность использования таких лазеров для формирования ультракоротких импульсов света с плотностью излучения до $10^9$ Вт/см$^2$. Впервые создан малогабаритный полупроводниковый стримерный лавер с импульсной мощностью до 3 кВт. Обнаружена генерация мощного оптического излучения в направлении распространения стримера и исследована зависимостъ скорости движения стримера от амплитуды импулъса напряжения.

В 80-х годах на стримерном лазере из сульфида цинка, разрабатываемом Печёновым А.Н., Обидиным А.З, Фроловым В.А., получена генерация в ультрафиолетовой области спектра. Совместно с ЛФТИ исследована возможность продвижения в коротковолновую область УФ спектра (до 260 нм) путем использования соединения $Zn_{1-x}Mg_xS$. Показано, что, начиная со значений $x>0,12$, соединение имеет структуру вюрцита и может быть использовано в качестве активной среды лазера. На основе стримерного лазера создан генератор световых импульсов субнаносекундного диапазона с регулируемой длительностью и задержкой относительно запускающего сигнала. Исследованы пороговые и пространственные характеристики стримерного полупроводникового лазера пикосекундного диапазона. с продольным выходом излучения. Достигнут частотный (до 50 Гц) режим возбуждения таких лазеров.

В 1991 г. был изготовлен действующий макет усовершенствованного полноцветного телепроектора со световым потоком до 4 тысяч люмен на основе полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком. Телепроектор состоял из трех лазерных ЭЛТ, излучающих на длинах волн: 455-475 нм (синяя область); 520-550 нм (зеленая), 620-630 нм (красная). В лазерных ЭЛТ соответственно использовались кристаллы ZnCdS, CdSeS, ZnSe. Телепроектор имел автономную систему охлаждения и мог работать в разрабатываемых системах телевидения высокой четкости (ТВЧ). На объединении НПО "Платан" под руководством В.Н. Уласюка (бывшего аспиранта О.В. Богданкевича) и при поддержке сотрудников ЛПЛЭН был создан цветной лазерный проектор с отпаянной ЛЭЛТ и начат выпуск опытных образцов лазерных проекторов.

Были предприняты попытки повышения рабочей температуры лазерных экранов, однако практическое использование ЛЭЛТ без криогенного охлаждения ограничивалось большими порогами лазерной генерации, что существенно ухудшало качество изображения и снижало срок службы таких приборов. Путем оптимизации параметров резонатора и технологии изготовления энергетические характеристики лазерных экранов ЭЛТ были улучшены, и они могли работать при комнатной температуре. При энергии электронного пучка в 50 кэВ мощность излучения составила более 2,5 Вт в красной, зеленой и синей областях спектра. Работа выполнена совместно с научно-производственным предприятием «Платан-Элин».

Создан новый тип полупроводникового лазера с накачкой электронным пучком путём введения в резонатор структуры волоконно-оптических волноводов. Это обеспечило стабилизацию диаграммы направленности при всех уровнях накачки и возможность использования лазера в устройствах оптической связи и в световодах, применяемых в медицине.

В 90-х годах стало ясно, что монокристаллические экраны не имеют перспектив практического применения. Поэтому сотрудниками лаборатории Коростелиным Ю.В. и Шапкиным П.В. была начата разработка технологии выращивания из паровой фазы монокристаллов ZnSSe и ZnTe для использования

их в качестве подложек эпитаксиального роста квантоворазмерных структур, излучающих в синей и красной областях спектра. Совместно с Отделением физики твердого тела ФИАН были найдены условия выращивания квантоворазмерных структур ZnCdTe/ZnTe методом молекулярно-пучковой эпитаксии на прозрачной подложке ZnTe, излучающих в желто-красной области спектра. В совместной с ИОФАН работе методом молекулярно-пучковой эпитаксии на прозрачной подложке ZnSe выращено брэгговское зеркало из 15 слоёв ZnMgSe/ZnCdSe с коэффициентом отражения 85% на длине волны 520 нм, и при возбуждении лазерного экрана сканирующим электронным пучком при комнатной температуре была получена рекордная мощность излучения - до 2 ватт в синей области спектра. На всемирном форуме CLEO-1997 эта работа была отмечена как выдающаяся.

Совместно с Институтом полупроводниковой техники, Аахен, ФРГ методом парофазной эпитаксии из металло-органических соединений впервые выращены перспективные квантоворазмерные структуры ZnSe/ZnMgSSe на прозрачной подложке ZnSSe, излучающие в синей области спектра (460 нм при комнатной температуре). Впервые получена в ФИАН генерация при накачке электронным пучком нового соединения нитрида индия-галлия с несколькими квантовыми ямами (длина волны излучения 409 нм при комнатной температуре), выращенного в университете г. Санта Барбара (США). Этот материал рассматривается как одно из наиболее перспективных соединений для развития оптоэлектроники, поскольку оно позволяет в зависимости от состава получить излучение от ультрафиолетового до красного диапазона длин волн и обладает высокой теплопроводностью.

Дальнейший прогресс в области лазерных экранов красного и зеленого диапазонов позволил создать промышленный образец работающего без глубокого охлаждения лазерного телепроектора с экраном площадью в десятки квадратных метров, превосходящего по основным (яркость, разрешение, цветопередача, энергопотребление) параметрам известные в мире системы. Большой интерес к использованию результатов лаборатории проявили крупные научно-технические фирмы США, Франции и других стран. ФИАН имеет уже около десятка патентов на ПЛЭН, действующих в США и других странах. Успешно выполнены контракты в области создания таких лазеров с фирмами Томсон (Франция) и Самсунг (Корея).

В лаборатории ПЛЭН также создан и успешно применён для целей косметологии комплекс медицинской аппаратуры с использованием лазера на парах меди, разработанный Пономарёвым И.В. От зарубежных аналогов комплекс выгодно отличается компактностью и малым весом (почти в 10 раз легче). Аппаратура прошла испытания в ряде медицинских центров России и за рубежом (Онкологический центр им. Блохина, больница им. Гельмгольца, Литовский онкологический центр и др.) и получила высокую оценку специалистов. Совместно с Российским детским лазерным центром проведены исследования по лечению сосудистых патологий. Для лечения «винных пятен» размером от 0,2 до 100 $см^2$ использовался метод селективной лазерной коагуляции. В большинстве случаев наблюдалось полное исчезновение пятен без каких-либо последствий.

### 2.4.3 Лаборатория оптоэлектронных процессоров (ЛОЭП)

Лаборатория, которой заведовал д.ф.м.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР И.Н Компанец (Рис. 2.39), проводила исследования в области оптоэлектронных методов формирования и параллельной обработки массивов информации (оптических сигналов, изображений), прежде всего с целью их ввода-вывода, отображения и распознавания.

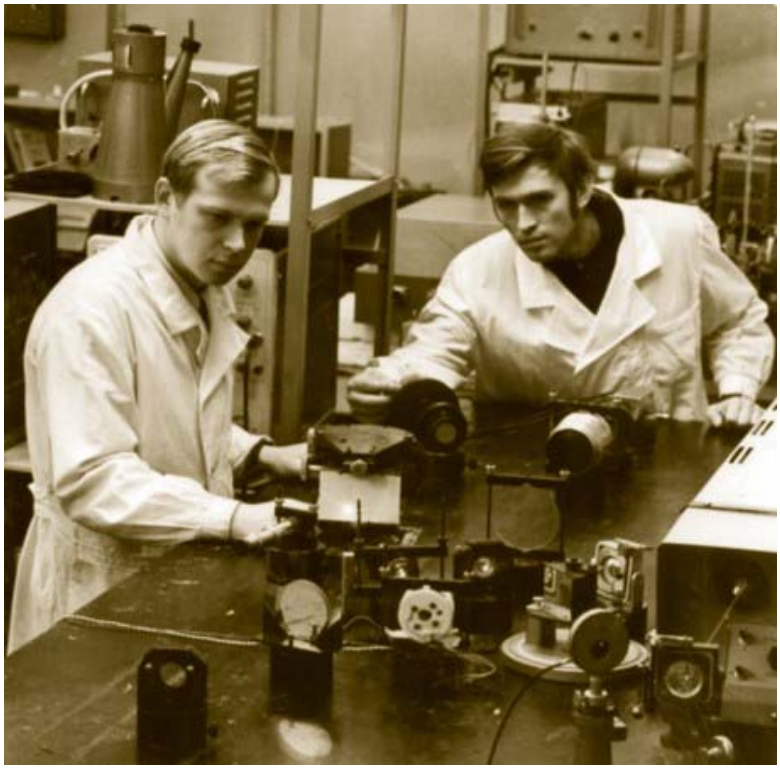


Рис. 2.39. П.Д. Березин и И.Н. Компанец проводят эксперимент (1976 г.)

Формирование изображений осуществлялось путем электрически или оптически управляемой модуляции лазерного излучения в многослойных структурах с использованием электрооптических кристаллов. Такие структуры позволяют создавать быстродействующие оптические затворы, переключатели интенсивности и поляризации света, амплитудные и фазовые модуляторы излучения (в том числе управляемые транспаранты – УТ или, по сути, пространственные модуляторы света – ПМС) для устройств и систем управления световыми пучками, оптоэлектронной обработки данных, телекоммуникаций, адаптивной оптики и отображения информации. В качестве электрооптической среды использовались низковольтные жидкие кристаллы (ЖК) нематического типа, синтезируемые в НИОПиК МХП, а также прозрачная электрооптическая керамика (ЭОК) состава цирконат-титанат свинца с примесью лантана (ЦТСЛ), изготовленная Жаботинским В.А. в г. Зеленограде и исследованная в ЛОЭП Соболевым А.Г. В научном и практическом отношении эти новые материалы оптоэлектроники, особенно ЖК, оказались на многие годы источником новых разнообразных свойств и применений.

В начале 70-х годов были исследованы физические свойства нематических ЖК (НЖК) и электрооптической керамики (ЭОК) состава ЦТСЛ, а также управляемых светом фоточувствительных многослойных структур типа фотополупроводник (ФП) – НЖК и симметричных структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с НЖК в качестве диэлектрика. При этом впервые или независимо был обнаружен и исследован ряд физических эффектов и механизмов, приводящих к управляемому внешним сигналом изменению оптических свойств указанных материалов вследствие переориентации в электрическом поле осей молекул ЖК и векторов поляризации доменов сегнетоэлектрической ЭОК или при изменении импеданса слоев в структуре МДП.

Три пионерских работы сотрудников ОКРФ Компанца И.Н., Березина П.Д., Васильева А.А. (Рис. 2.40) совместно с Л.М. Блиновым (НИОПиК МХП) и С.А. Пикиным (ИКАН) по исследованию НЖК были выполнены в 1971-72 гг.

Рис. 2.40. Сотрудники научной группы (слева направо): А.А. Васильев, М.Е. Румянцева, А.В. Парфёнов (сидят), А.Г. Соболев, П.Д. Березин, А.Ю. Быковский, И.Н. Компанец (руководитель группы), А.Ф. Денисов.

С помощью оригинального экспериментального макета управляемого транспаранта на стекловолоконной шайбе с динамическим рассеянием света в слое НЖК впервые была осуществлена запись в голограмму массива цифровой информации. В НЖК реализованы чисто фазовая модуляция света и метод получения коротких, в несколько миллисекунд световых импульсов (так называемых π- импульсов), следуемых с частотой до 10 кГц, причём чувствительность изменения фазовой задержки света составляла до 7 π /В. Изучено изменение распределения осей молекул ЖК в электрическом поле («переход

Фредерикса») и найдены согласующиеся с расчётными экспериментальные зависимости изменения двулучепреломления от величины поля, пороговые и релаксационные характеристики.

Исследованная Соболевым А.Г. и Компанцом И.Н. ЭОК показала высокие оптические и динамические характеристики, благодаря чему в образце матрично-адресуемого ПМС на основе ЭОК с электроникой управления, разработанной А.М. Вакуленко, обеспечивалась скорость формирования около $10^{-4}$ сек массивов информации ёмкостью 32х32 эл. и время цикла модуляции около $2 \cdot 10^{-4}$ сек с контрастом 100:1 и близкой к 100% эффективностью. В совместной с ЦИФИ (г. Будапешт) работе информационные массивы этим ПМС записывались в виде голограмм. В другой совместной работе с НИИВК (Климов И.И.) осуществлена запись информационных голограмм с помощью жидкокристаллического ПМС емкостью 128х128 элементов. Затем процесс записи голограмм полупроводниковым лазером через управляемый НЖК- транспарант был внедрен в Раменском приборостроительном КБ.

В середине 70-х г. разработан лабораторный макет оптоэлектронного арифметического устройства на электрически управляемых жидкокристаллических транспарантах. Совместно с ЛИВТ (Ли С.К.) разработаны принципы построения и предложены способы реализации оптоэлектронного процессора с переменной функциональной структурой, способного обеспечить производительность обработки массивов цифровой и аналоговой информация в $10^{10}$ - $10^{11}$ опер/сек, однако на других – быстродействующих электрооптических кристаллах.

Пороговая чувствительность образцов ПМС, в том числе фазовых, на основе структур ФП-ЖК, изготовленных Жиндулисом А.И. (университет Вильнюса) и исследованных Васильевым А.А., составила $10^{-8}$ Дж/см$^2$, что соответствовало лучшим мировым показателям. Для структур МДП с НЖК, изготовленных в ОКБ ФИАН и исследованных А.В. Парфёновым, она даже достигла рекордных значений в $10^{-10}$ – $10^{-11}$ Дж/см$^2$ или $10^{-7}$ – $10^{-8}$ Вт/см$^2$ для непрерывной мощности. Максимальная пространственная разрешающая способность обоих типов структур составила 300-350 мм$^{-1}$, что в несколько раз превысило мировой уровень. Приведённая пороговая чувствительность в широком спектральном диапазоне (от УФ до близкого ИК) достигла $10^{-14}$ – $10^{-16}$ Дж на разрешаемый элемент, что делало МДП- структуру с узкозонным полупроводником твердотельным (безвакуумным) низковольтным аналогом электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Оптически управляемые УТ внедрены в ГОИ и ЦКБ «Спектр». Большой вклад в технологию создания электрически и оптически управляемых УТ внесли сотрудники ОТПМ ОКБ ФИАН Стародубцев Н.Ф., Саввина Р.М., Полубояров В.Н., Таленский О.Н. и сотрудник ЛОЭП Вашурин П.В.

На рубеже 70-х – 80-х годов Компанцом И.Н., Маловым А.Н. и Морозовым В.Н. теоретически и экспериментально показана возможность голографической записи информации с повышенной плотностью в оптической системе с синтезированной апертурой (реализована плотность в $I0^6$ бит/мм$^2$). Разработан и

исследован эффективный голографический коррелятор на основе оптически управляемого транспаранта – перестраиваемого фильтра и высококогерентного полупроводникового лазера, для обработки оптических сигналов в реальном масштабе времени.

В начале 80-х годов А.А. Васильевым и Компанцом И.Н. с коллегами были теоретически и экспериментально изучены вопросы согласованной фильтрации изображений, в том числе с частично-когерентным излучением. Реализовано (совместно с Б.Я. Зельдовичем) обращение волнового фронта в оптически управляемом ЖК ПМС при микроваттной мощности опорной волны. Разработаны и исследованы когерентно-оптический коррелятор и спектроанализатор телевизионных изображений, вводимых в реальном масштабе времени с экрана ЭЛТ в систему обработки с помощью высокочувствительных оптически управляемых транспарантов. На их основе предложены и исследованы пространственные оптические элементы с бистабильной и мультистабильной характеристикой пропускания, подходящие для создания устройств хранения оптической информации и дискретизации уровней интенсивности в изображениях. В фоточувствительных жидкокристаллических структурах Парфёноввм А.В. реализован режим оконтуривания изображений и выделения в них областей с нестационарной освещенностью. На основе этих структур предложены методы обработки динамических изображений. С помощью образца НЖК ПМС Васильевым А.А. с Котовой С.П. реализованы запись голограмм с нестационарным объектным лучом и логарифмическое преобразование координат изображений, а совместно с Дадешидзе В.В. – выделение признаков симметрии в оптических схемах распознавания изображений.

В этот же период было выполнено несколько теоретических и экспериментальных работ по исследованию свечения тонкоплёночных туннельных структур металл-барьер металл, по усилению поверхностных плазменных колебаний в этих структурах и по генерации электромагнитных колебаний МБМБМ-структурами при их взаимодействии с внешними сигналами. Обнаружены отрицательное дифференциальное сопротивление в переходах МБМ и увеличение эффективности излучения поверхностных плазменных колебаний в структуре МБМ-ЖК. Показано, что структуры МБМ можно использовать для визуализации высокочастотных электрических сигналов. В работах участвовали сотрудники ЛОЭП Быковский А.Ю., Соболев А.Г., Компанец И.Н., Парфёнов А.В., а также теоретики Беленов Э.М. и Усков А.В.

В середине 80-х годов создан гибридный преобразователь изображений на основе ЭОП и НЖК ПМС с использованием твердого раствора полупроводников группы $A_2B_6$, который характеризовался высоким коэффициентом усиления яркости ($10^8$) вследствие согласования спектральных областей свечения ЭОП и чувствительности полупроводника в ПМС- преобразователе. Исследованы фотоэлектрические параметры и характеристики пространственно-временной модуляции света в структуре типа МДП, изготовленной совместно с ОКБ ФИАН на

основе легированного серебром селеннда кадмия и нематического ЖК. Структура не имела аналогов в мире, была чувствительна в диапазоне длин волн 2-6 мкм и в телевизионном темпе позволяла визуализировать изображения ИК-диапазона с пороговой чувствительностью $10^{-5}$ Вт/см$^2$ и разрешающей способностью до 40 мм$^{-1}$ на апертуре в несколько квадратных сантиметров.

Результаты фундаментальных исследований и применений нематических ЖК и приборов на их основе были отмечены в 1985 г. Государственной премией СССР, лауреатами которой стали Васильев А.А., Компанец И.Н. и Парфёнов А.В. (Рис. 2.41).

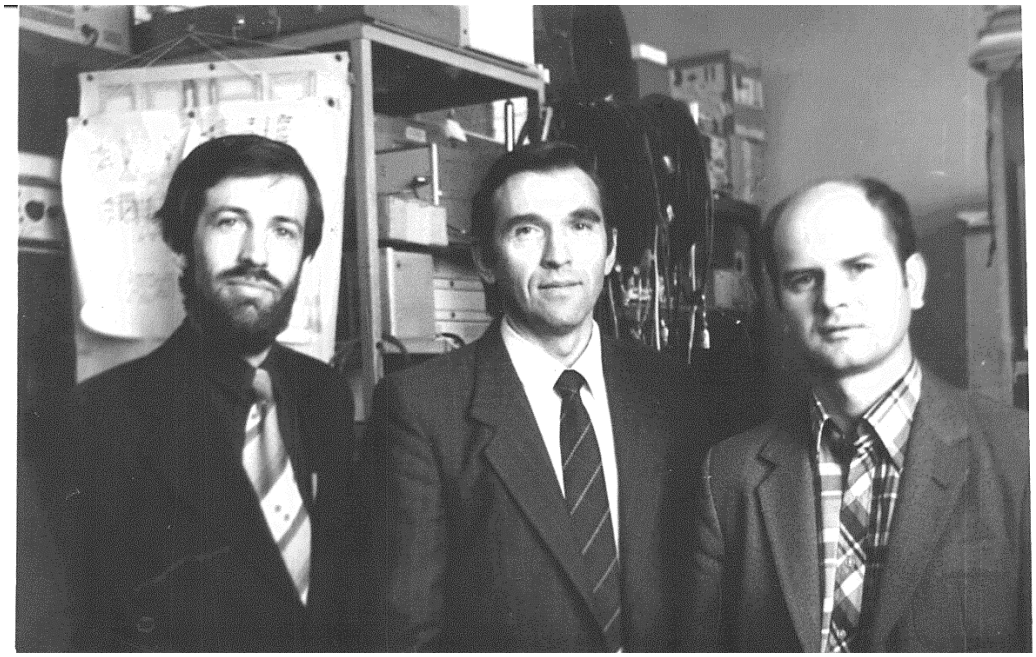


Рис. 2.41. А.В. Парфёнов, И.Н. Компанец и А.А. Васильев (слева направо), 1985 г.

На рубеже 80-х – 90-х годов в ЛОЭП разработана архитектура ассоциативной памяти голографического типа с управляемым НЖК ПМС, реализующим функции обращающего волновой фронт зеркала. При усилении им оптических сигналов в 3 раза на пространственной. частоте около 7 мм$^{-1}$ восстанавливались хранимые в памяти (в голограмме) изображения по их части, составляющей до 1/4 от целого. Голографические методы и технология изготовления тиснёных радужных голограмм при участии Компанца И.Н., Малова А.Н. (ИЛФ, г. Новосибирск), Серова О.Б. (НИКФИ, Москва) и сотрудников Приднестровского университета (Берил С.И. и др.) были внедрены на предприятии «Молдавизолит» (г. Тирасполь, ПМР).

Изучена динамика оптического отклика сегнетоэлектричесваго жидкого кристалла (СЖК) смектического типа с гомеотропной ориентацией молекул при поперечном электрооптическом эффекте (Пожидаев Е.П., Андреев А.Л., Компанец И.Н., Парфёнов А.В.). Достигнуто минимальное время цикла модуляции света 60 мкс при комнатной температуре, а через 2 года уже рекордно короткое (1 мкс) время переключения оптических свойств. Впервые на основе бистабильного

эффекта в СЖК создан макет матричного электрически управляемого ПМС форматом 128x128 элементов со временем адресации отдельной строки около 2,5 мкс при управляющих полях 15 В/мкм. На основе СЖК создан макет оптически управляемого ПМС с повышениым быстродействием, обеспечивающий параллельное преобразование оптического информационного массива (изображения) емкостью $10^5$ - $10^6$ бит со скоростью $5 \cdot 10^3$ кадров в секунду.

В девяностые годы результаты мирового уровня достигнуты в исследовании электрооптики наиболее чувствительных к внешним воздействиям и наиболее быстродействующих СЖК и полимерных композитов на их основе (Пожидаев Е.П., Андреев А.Л., Компанец И.Н.). Совместно с Институтом физики им. Л.В. Киренского (Зырянов В.Я.) созданы быстродействующие СЖК полимерно-дисперсные электрооптические композиты, в которых достигнуты лучшие в мире параметры модуляции света: чувствительность к управляющему электрическому полю 3 В/мкм, переключающее напряжение 7 В, время электрооптического отклика 15 мкс и оптическое пропускание 60% при контрасте 50:1.

Созданы СЖК электрооптические ячейки (Пожидаевым Е.П. и Андреевым А.Л.), обладающие устойчивой оптической бистабильностью и мультистабильностью, с запоминанием любого заданного уровня пропускания света. В СЖК без запоминания данных осуществлена амплитудная модуляция света с максимальным контрастным отношением 400:1 и с рекордным быстродействием электрооптического отклика 2,5 мкс при напряжении ±36 В или 40 мкс при ±5 В. Показано, что новые СЖК и СЖК-ячейки позволяют создавать низковольтные и в то же время быстродействующие оптические затворы, переключатели интенсивности и поляризации света, амплитудные и фазовые модуляторы излучения (в том числе пространственные) для устройств и систем управления световыми пучками, для телекоммуникаций, адаптивной оптики и отображения информации.

Впервые Пожидаевым Е.П. реализована эффективная фазовая модуляция света в СЖК с малым периодом деформируемого электрическим полем геликоида; достигнуто время оптического отклика 50 мкс при ±2 В и 500 Гц управляющего напряжения и получено рекордное изменение двулучепреломления (вдвое) с частотой не менее 100 Гц при напряжении не более 10 вольт. Совместно с университетом г. Дармштадта (Германия) созданы новые широкотемпературные композиции СЖК, обладающие вышеуказанным эффектом в диапазоне температур от -20 до +85 ºС. На промышленной базе НИИ «Платан» (Бобылёв Ю.П.) освоена технология изготовления ячеек СЖК с деформированным геликоидом и с безгистерезисной шкалой серого, обеспечивающая время отклика около 250 мкс при напряжении 1В и оптический контраст более 100:1.

В области параллельной обработки информации предложены оригинальные схемы оптико-цифровых (гибридных) распознающих процессоров с использованием разработанных ПМС. Исследован развиваемый А.Е. Красновым

(ИПУ РАН) новый когерентно-статистический метод инвариантного распознавания объектов, основанный на преобразовании Френеля, построении фазового портрета френелевского образа и последующем вычислении мер сходства фазовых портретов неизвестных и «эталонных» изображений. Рассматривается основанная на статистическом описании оптических сигналов теория нового метода. В отличие от известного метода Фурье-согласованной фильтрации, он обеспечивает инвариантность не только к перемещениям, но также к вращению и к изменению масштаба объектов, причем в условиях шумов и помех. Метод использован на практике для обработки радиосигналов (совместно с МАИ) и кодирования-декодирования голограмм с целью их защиты от несанкционированного копирования.

Быковским А.Ю. активно проводились исследования по созданию базовых элементов и блоков оптоэлектронного процессора, который функционирует на принципах многозначной и нечеткой логики и предназначен для параллельной многопараметрической обработки сложных массивов данных, характеризующихся большим числом переменных и/или нечеткими функциональными зависимостями, плохо поддающимися формальному описанию. В частности, на основе оптоэлектронных и электронных схем, оптических волокон и светодиодов разработан вариант нечеткого контроллера. С целью реализации его макета проведена сборка патентно чистого экспериментального макета параллельного оптоэлектронного дефазификатора, действующего по так называемой схеме вычисления «центра тяжести» функции принадлежности. Предложены схемные и программные решения, обеспечивающие совместную работу оптоэлектронных вентилей с массовыми микроэлектронными буферами и узлами ОЗУ.

### 2.4.4 Лаборатория сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации (ЛСООИ)

Лабораторией с момента её образования руководил д.ф.-м.н. В.Н. Морозов. В 1990 г. он уехал на постоянное жительство в США, и с 1991 г. заведующим лабораторией является к.ф.-м.н. А.Н. Путилин (Рис. 2.42).

Основной тематикой работ лаборатории в обозреваемый период являлись: исследования в области лазерных диодов, в том числе многосекционных, процессов генерации пикосекундных импульсов в лазерных диодах с синхронизацией мод, исследования в области волноводной голографии. Прикладными аспектами этих исследований стали разработки оптических запоминающих устройств, в том числе голографического типа и с использованием инжекционных лазеров, разработки модулей синхронизации и тестирования быстродействия ОЭ компонент на основе пикосекундных лазерных диодов, интегральных осветителей для процессоров, коммутаторов, элементов памяти и дисплейных элементов на базе волноводных голограмм, разработка принципов пространственно-временного и спектрального уплотнения оптических сигналов

для систем сверхплотной и сверхбыстродействующей передачи и обработки информации.

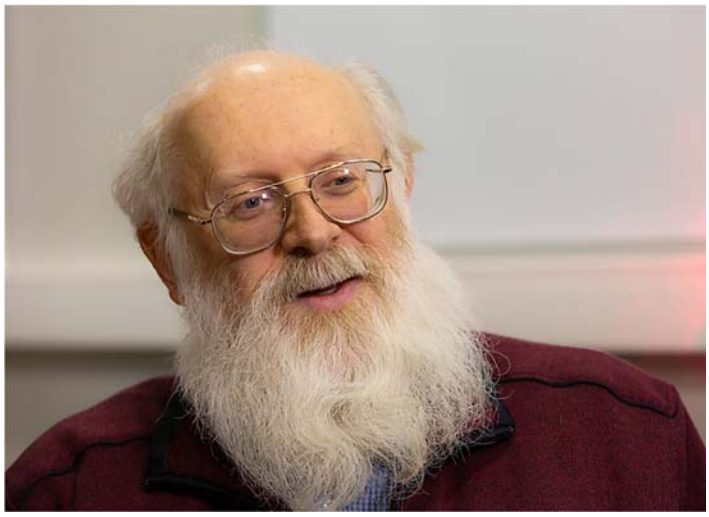


Рис. 2.42. А.Н. Путилин

В 70-х годах лабораторией проведены исследования оптических сред, допускающих реверсивную оптическую запись информации. Экспериментальные результаты показали, что на основе структуры типа металл-диэлектрик-полупроводник можно создать оперативное оптоэлектронное ЗУ емкостью $10^8$ бит, с временем полного цикла запись-считывание-стирание $10^4$ 6ит/мкс. Проведены исследования влияния различных факторов излучения инжекционных лазеров на качество изображений, восстановленных с Фурье-микроголограмм при плотности записи в них информации $10^4$ -$10^5$ бит/мм$^2$ (Рис. 2.43). Показано, что на основе полупроводниковых лазеров может быть создана малогабаритная (с физическим объемов 1л) голографическая память с информационной емкостью $10^7$ бит и с произвольной выборкой массива из $10^3$ - $10^4$ бит за время около 100 нс. Разработаны и внедрены на предприятиях РПКБ (МАП) и НИИЭТ (МПСС) голографические ЗУ специального назначения на инжекционных лазерах.

Рис. 2.43. С.П. Калашников проверяет качество голограмм (1975 г.)

Проведены исследования временной дисперсии импульсов излучения в световодах и элементов оптической линии связи для оптоэлектронного вычислительного комплекса. Оптимизированы характеристики элементов и созданы основные узлы макета линии связи: генератор импульсов наносекундной длительности с высокой частотой повторения, устройство для стыковки инжекционного лазера со жгутом световодов, устройство стыковки световодов, широкополосный усилитель для скоростного фотоприемника. Совместно с промышленными организациями (НИИВК и др.) разработана техническая документация и изготовлены типовые узлы волоконно-оптической системы передачи информации. Техническая документация была передана на серийные заводы-изготовители, а образец многоканальной оптической линии передачи информации установлен у заказчика как действующий демонстрационный.

Впервые была осуществлена запись волноводных голограмм трехмерных объектов для дискретных систем и изобразительной голографии, разработаны схемы оптоэлектронных нейронно-сетевых процессоров. Предложен и экспериментально осуществлен метод пространственно-временного преобразования световых импульсов пикосекундного диапазона с использованием волноводных голограмм, позволивший создать временной оптический мультиплексор для системы сверхплотной передачи информации десятью каналами уплотнения с временным разрешением между импульсами 20 пс.

Также впервые был создан многофункциональный полупроводниковый излучатель, который может работать в четырех различных режимах: в режиме суперлюминесцентного диода мощностью до 4 мВт с шириной спектра 16 нм при глубине модуляции 2%; перестраиваемого одночастотного лазера мощностью более 10 мВт; бистабильного лазера; пикосекундного лазера. В последующем созданы суперлюминесцентные излучатели мощностью до 1,5 мВт.

В 80-х годах впервые в мире в инжекционном лазере экспериментально был реализован режим генерации световых импульсов длительностью $2.10^{-12}$ с частотой следования до 100 ГГц, что стало возможным благодаря предложенному и осуществленному авторами (Васильев П.П., Сергеев С.А.) оригинальному методу модуляции добротности в инжекционном лазере с усиливающими и поглощающими секциями в едином резонаторе. В 1990 г. за эту работу авторам была присуждена премия Института инженеров - электриков (Institute of Electrical Engineers, IEE) Великобритании. В течение всех 90-х годов лаборатории принадлежали мировые рекорды по длительности и пиковой мощности импульсов, генерируемых таким типом лазеров.

В середине 90-х годов впервые был реализован режим сверхизлучения в полупроводниковых гетероструктурах при комнатной температуре. Была обнаружена нестационарная Бозе конденсация в фазовом пространстве электронно-дырочных пар в процессе сверхизлучающего квантового перехода. На базе этих исследований были созданы опережающие мировой уровень экспериментальные образцы инжекционных лазеров, излучающие короткие (до 180 фс) световые

импульсы мощностью свыше 230 Вт с частотами следования до 100 ГГц. Такие лазеры позволяют на несколько порядков увеличить объем передаваемой информации в линиях оптической связи, в быстродействующих вычислительных комплексах и системах оптической памяти. Экспериментально обнаружен эффект генерации второй гармоники внутри резонатора полупроводникового лазера при генерации субпикосекундных импульсов.

Предложены и экспериментально исследованы методы волноводной голографии в применении к созданию интегральных оптических схем для коммутаторов оптических вычислительных машин, планарных осветителей и устройств синхронизации. Исследования взаимодействия пикосекундных лазерных импульсов с волноводными голографическими элементами привели к созданию нового типа интегральных оптических схем для обработки оптической информации с частотами до 100 ГГц. Исследования в указанных областях защищены несколькими патентами России и США. Экспериментально исследованы волноводные голограммы для систем отображения визуальной информации в режиме виртуального дисплея. Разработаны планарные схемы для системы трехмерного отображения информации и миниатюрных нашлемных дисплеев.

Проведены исследования в области нейросетевой обработки информации, ориентированные на создание интегрально-оптических нейрочипов и систем оптоэлектронной параллельной обработки информации. По этой тематике в 1994-1997 г.г. на базе лаборатории СООИ работала временная лаборатория для выполнения проекта МНТЦ (Шумский С.А., Путилин А.Н.), а с 1997 – совместная с холдингом «НейрОК» лаборатория, выполнявшая прикладные исследования в области нейро-вычислений и создания 3D дисплеев с нейросетевой обработкой информации. В этой лаборатории разработан подход к исследованию свойств параллельных распределенных вычислений, основанный на статистической теории динамических систем. Он позволил сформулировать критерий сходимости нейросетевых алгоритмов и провести классификацию распределенных вычислительных систем.

Совместно с сотрудниками лаборатории искусственных нейросетей ВНИИТФ (г. Снежинск) и ИВВС РАН (г. Москва) были созданы новые классы параллельных алгоритмов для решения обратных задач математической физики и обработки изображений. Эти алгоритмы были внедрены в ряде прикладных разработок, в том числе для расчета, визуализации повышения четкости трехмерных изображений, для аппроксимации и визуализации многомерных экспериментальных данных, для статистической обработки и анализа финансовой информации. В ФИАН также создан Интернет-сайт, содержащий литературу, лекции, учебные пособия и обучающие программы в области искусственных нейросетей.

Кроме уже названных сотрудников, в разные годы в работах лаборатории принимали участие Захаров Ю.П., Калашников С.П., Литвинов В.Ф., Плетнев В.А., Семёнов Г.И., Семёнов А.С., Солодов С.Е., Шидловский В.Р.

### 2.4.5 Сектор регистрирующих сред (СРС)

Сектором, которым заведовал д.ф.м.н. А.Ф. Плотников, состоял из двух малочисленных научных подразделений – группы В.Н. Селезнёва, разрабатывавшего элементы оптической памяти на многослойных фоточувствительных структурах, и группы В.Э. Шубина, разрабатывавшего высокочувствительные лавинные фотоприёмники.

В 70-х и 80-х годах в группе д.ф.-м.н. Селезнёва В.Н. проведен цикл работ, раскрывающих физическую природу явления усталости МНОП-элементов оптической памяти, и совместно с НПО «Кристалл» созданы образцы оптических запоминающих сред площадью в несколько квадратных сантиметров на основе МНОП-структур, обладающие повышенной деградационной устойчивостью. Каждый элемент такой среды допускает свыше $10^8$ циклов переключения (что на три порядка больше по сравнению с выпускаемыми промышленностью образцами), сохраняя при этом основные функциональные характеристики.

Проведенные исследования показали возможность создания оперативного запоминающего устройства емкостью $10^9$-$10^{10}$ бит со скоростью выборки информации объемом $10^3$ – $10^4$ бит за 50 мкс на основе МНОП-структуры и лазерной электроннолучевой трубки. Результаты этих исследований позволили значительно упростить промышленную разработку оптоэлектронного ЗУ, осуществляемую НИЦЭВТ МРП СССР.

В группе д.ф.-м.н. Шубина В.Э. в указанный период впервые совместно с ПО МЭЛЗ разработаны и созданы многоэлементные (20 эл.) высокостабильные лавинные МДП- фотоприемники (твердотельные аналоги ФЭУ) для области 0,63 мкм с рекордной пороговой чувствительностью $I0^{-16}$ Дж (при отношении сигнал/шум ~ 2 и коэффициенте умножения ~ $5.10^3$) и показано, что их быстродействие может быть доведено до наносекунд. Реализован малошумящий режим работы лавинного МДП- фотодиода на основе кремния, который позволил довести пороговую чувствительность до $10^{-17}$ Дж ($10^{-14}$ ВтГц$^{-1/2}$), что выше чувствительности зарубежных лавинных фотодиодов.

Впервые на МДП- структурах, созданных на основе германия и арсенида индия, реализован лавинный режим регистрации световых импульсов, что открывает возможность создания многоэлементных высокочувствительных фотоприёмников с внутренним усилением для области спектра 1÷3 мкм. Получены образцы охлаждаемых плёночных МДП- фотоприёмников на основе антимонида индия, имеющие рекордную чувствительность – $5 \cdot 10^{-15}$ ВтГц$^{-1/2}$.

В результате внедрения на производственном объединении МЭЛЗ (МЭП) разработана технология и созданы образцы первых в мировой практике матричных лавинных МДП- фотоприемников. Также совместно осуществлена опытно-конструкторская разработка серийного лавинного фотоприемника. Созданы образцы волноводных фотоприемников на арсениде галлия.

В проведении исследований в обеих научных группах принимали участие Виноградов Л.В., Пудонин Ф.А., Свербиль П.П.

# Глава 3. РАЗВИТИЕ И ДОСТИЖЕНИЯ ОТДЕЛЕНИЯ КРФ В XX1 ВЕКЕ

## 3.1 Введение

Н.Г. Басов руководил им созданными Лабораторией КРФ и Отделением КРФ почти 40 лет. После его ухода с 2001 г. по 2004 г. руководителем (тогда директором) Отделения КРФ им. Н.Г. Басова являлся к.ф.-м.н. А.Н. Стародуб, работавший до этого у Н.Г. Басова заместителем по научной работе ОКРФ, а много раньше – учёным секретарём ФИАН (при директоре Н.Г. Басове) и заместителем председателя правления Всесоюзного просветительского общества «Знание» Н.Г. Басова (по совместительству). Заместителем директора по научной работе в ОКРФ им. Н.Г. Басова стал д.ф.-м.н., профессор И.Г. Зубарев. В.А. Сауткин (Рис. 3.1) продолжил работу учёного секретаря отделения и оставил эту должность в 2016 г., когда на смену ему пришёл к.ф.-м.н. А.Е. Дракин (Рис. 3.2).

Рис. 3.1. Учёный секретарь ОКРФ В.А. Сауткин (до 2016 г.)

С 2004 г. по 2010 г. Отделение КРФ им. Н.Г. Басова возглавлял академик О.Н. Крохин, а его заместителем по научной работе был д.ф.-м.н., профессор А.С. Шиканов.

С декабря 2010 г. по настоящее время руководителем Отделения КРФ им. Н.Г. Басова является д.ф.-м.н., профессор А.А. Ионин. Его заместители по научной работе – д.ф.-м.н., профессор И.Н. Компанец (с 2011 г. по 2019 г.) и д.ф.-м.н., профессор В.Ю. Быченков (с 2020 г. по настоящее время).

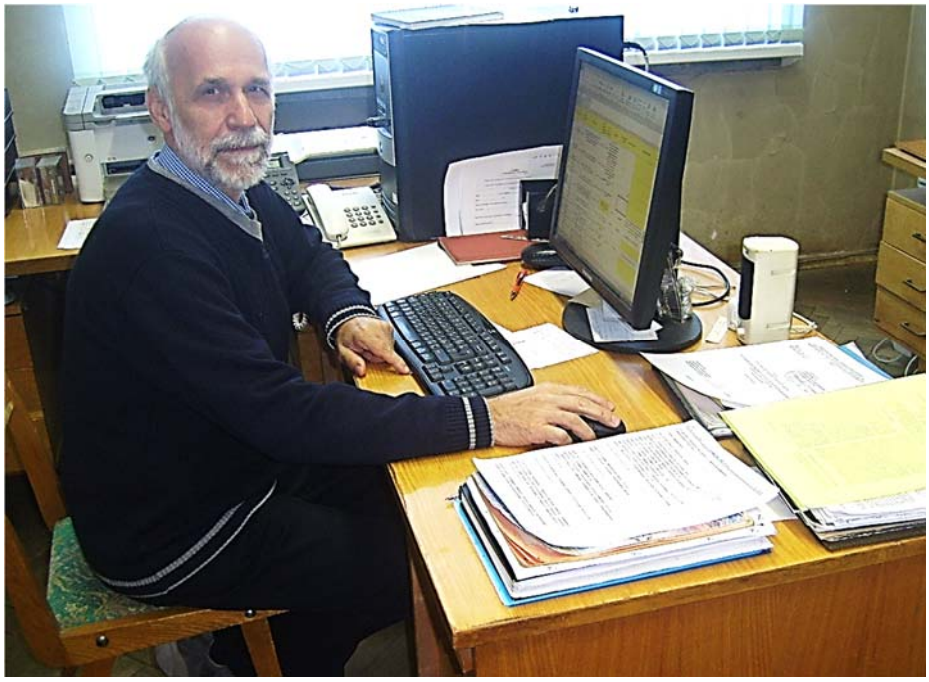


Рис. 3.2. Учёный секретарь ОКРФ А.Е. Дракин (с 2016 г.)

Структура Отделения КРФ с тремя научными отделами – квантовой радиофизики, лазерного термоядерного синтеза и оптоэлектроники, существовавшая в 2001 г., долгое время сохранялась неизменной. В 2016, 2018 и 2019 г. г. в ОКРФ были проведены реорганизации, обусловленные как внешними обстоятельствами (требованиями руководившего тогда наукой Федерального агентства научных организаций – ФАНО), так и внутренними (изменения тематики и кадрового состава подразделений ОКРФ).

В 2016 г. в Отделе КРФ была создана новая Лаборатория инновационных лазерных систем (заведующий к.ф.-м.н. Н.Н. Юрышев), которая в большой степени унаследовала тематику упразднённых лабораторий – Лаборатории химических лазеров и Лаборатории применения лазеров. Была упразднена Лаборатория лазерной хирургии. При этом сохранились в своём статусе Лаборатория фотохимических процессов (только до ухода из жизни в 2019 г. её заведующего Михеева Л.Д.), Лаборатория фотоники молекул (заведующий В.А. Петухов) и Сектор теоретической радиофизики (заведующий И.В. Сметанин).

Отдел ЛТС был преобразован в Отдел лазерной плазмы (руководитель – к.ф.-м.н. А.А. Рупасов), в состав которого вошли две экспериментальных лаборатории (Лаборатория диагностики плазмы с заведующим к.ф.-м.н. А.А. Рупасовым и Лаборатория воздействия лазерного излучения с заведующим к.ф.-м.н. А.Н. Стародубом) и три теоретических сектора (Сектор теории лазерной плазмы с заведующим д.ф.-м.н., профессором С.Ю. Гуськовым, Сектор теории взаимодействия излучения с веществом с заведующим к.ф.-м.н. А.Н. Канавиным и новый Сектор лазерно-плазменной физики высоких энергий с заведующим д.ф.-м.н., профессором В.Ю. Быченковым).

В июле 2018 года из ОКРФ в Троицкое обособленное подразделение (ТОП) ФИАН были переведены Лаборатория стандартов частоты (заведующий М.А. Губин), Лаборатория инновационных лазерных систем (заведующий Н.Н. Юрышев) и Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (заведующий А.С. Насибов), поскольку территориально они располагались на Троицкой площадке ФИАН.

В конце 2019 г. упразднен отдел ОЭ, и три оставшиеся в нём лаборатории вошли непосредственно в состав Отделения КРФ, как и все подразделения тоже упразднённого отдела КРФ. Одновременно в структуре Отделения появился Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий (руководит д.ф.-м.н., профессор А.А. Ионин), в который вошли прежняя Лаборатория газовых лазеров (заведующий А.А. Ионин) и две новые лаборатории – Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины (заведующий д.ф.-м.н. С.И. Кудряшов) и Лаборатория фемтосекундной нелинейной оптики (заведующий д.ф.-м.н. Л.В. Селезнёв).

Таким образом, в юбилейном 2022 г. действует следующая структура Отделения КРФ им. Н.Г. Басова:

- Лаборатория инжекционных лазеров (заведующий А.П. Богатов)
- Лаборатория нелинейных оптических явлений (заведующий И.Г. Зубарев)
- Лаборатория рентгеновской оптики (заведующий И.А. Артюков)
- Лаборатория фотоники молекул (заведующий В.А. Петухов)
- Лаборатория оптоэлектронных процессоров (заведующий Е.П. Пожидаев)
- Лаборатория сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации (заведующий А.Н. Путилин)
- Сектор теоретической радиофизики (заведующий И.В.Сметанин)
- Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий (руководитель А.А. Ионин)
  - Лаборатория газовых лазеров (заведующий А.А. Ионин)
  - Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины (заведующий С.И. Кудряшов)
  - Лаборатория фемтосекундной нелинейной оптики (заведующий Л.В. Селезнёв).
- Отдел лазерной плазмы (руководитель А.А. Рупасов)
  - Лаборатория воздействия лазерного излучения (заведующий А.Н. Стародуб)
  - Лаборатория диагностики плазмы (заведующий А.А. Рупасов)
  - Сектор лазерно-плазменной физики высоких энергий (заведующий В.Ю. Быченков)
  - Сектор теории взаимодействия излучения с веществом (заведующий А.П. Канавин)
  - Сектор теории лазерной плазмы (заведующий С.Ю. Гуськов)

При этом направления научной тематики Отделения КРФ им. Н.Г. Басова, сохраняя в своей основе заложенную его основателем структуру исследований,

наполнилась новыми задачами и обогатилась новыми направлениями, что видно из следующего перечня:

- Квантовая радиофизика
- Новые типы квантовых генераторов, ультракоротковолновые лазеры
- Взаимодействие лазерного излучения с веществом
- Физика экстремальных полей
- Нелинейная оптика
- Физика плазмы
- Лазерный термоядерный синтез
- Оптоэлектроника
- Лазерная технология
- Рентгенооптика
- Нанофотоника
- Лазеры в науке, технике и медицине.

Названия и тематика работы у части лабораторий Отделения КРФ до реорганизации и после неё не совпадают, а часть лабораторий даже выбыла из состава ОКРФ, поэтому ниже приводятся достижения всех подразделений – как существовавших в 2016 г., так и вновь образованных (тогда же и позднее), в период их деятельности по 2021 г., придерживаясь структуры, действовавшей с 2001 по 2016 год.

## 3.2 Лазерные исследования в Отделе КРФ

После Н.Г. Басова структура Отдела КРФ и тематика работ долгое время (до реорганизаций в 2016, 2018 и 2019 г.) сохранялись прежними, а должность руководителя Отдела никто не занимал. Основным научным направлением Отдела оставались исследования в области лазерной физики, создания и применения лазеров.

В связи с тем, что структурные преобразования Отдела произошли только на последней четверти обозреваемого периода, далее первоначально будут рассмотрены достижения прежних лабораторий и секторов в период их работы, а уж затем будет отмечена деятельность новых подразделений, тоже в период их работы.

### 3.2.1 Сектор теоретической радиофизики (СТРФ)

В 2003 г. не стало заведующего Сектором д.ф.-м.н., профессора А. Н. Ораевского, и СТРФ возглавил д.ф.-м.н. А. Г. Молчанов (ушёл из жизни в 2009), а с осени 2008 г. им заведует к.ф.-м.н. И.В. Сметанин (Рис.3.3). Основные направления деятельности Сектора включают в себя: исследования по нанооптике, наноплазмонике и фотовольтаике; теоретические исследования по взаимодействию ультракоротких УФ лазерных импульсов с газовыми средами и динамике низкотемпературной лазерной плазмы; исследования по нелинейной и по квантовой оптике; исследования по теории полупроводниковых лазеров, усилителей, квантово-

размерных оптоэлектронных приборов; теоретическая поддержка экспериментальных работ, проводимых в лабораториях ОКРФ.

Рис. 3.3. И.В. Сметанин

В первые годы нового столетия д.ф.м.н. Алексеевым В.А. развита квантовая теория генератора когерентного Бозе-конденсата на испарительном принципе охлаждения (атомный лазер). Расчёты, проведённые для трёх- и четырёхуровневых моделей ловушки, показали возможность генерации сильно сжатого субпуассоновского Бозе-конденсата. Когерентные атомные пучки, генерируемые атомным лазером, могут найти применение в новых улучшенных стандартах частоты (нестабильность $10^{-16}$), сверхточных измерениях величины ускорений ($10^{-8}$ g) и вращений ($10^{-13}$ рад/с), а также в атомной литографии. Найдена функция распределения числа частиц в конденсате захваченного в ловушку идеального Бозе-газа, и исследовано влияние взаимодействия атомов на температурную зависимость конденсата. Развито микроскопическое описание сверхтекучего движения слабонеидеального Бозе-газа, находящегося в кольцевом объеме с шероховатыми стенками.

На основе ранее развитого метода Молчановым А.Г. проведены расчеты характеристик широкоапертурных KrF- усилителей мегаджоульного масштаба, предназначенных в качестве драйвера для лазерного термоядерного синтеза. Показано, что, несмотря на эффекты усиленного спонтанного излучения, внутренний КПД такого драйвера, возбуждаемого электронным пучком, может превышать 8%.

Проценко И.Е. и Усковым А.В. разработаны теоретические основы нового направления в оптике гетерогенных сред, состоящих из металлических частиц, равномерно распределенных в диэлектрической или полупроводниковой матрице. Такая гетерогенная среда обладает резонансным показателем преломления и поглощения, даже если соответствующие характеристики исходных материалов не

обладают резонансными свойствами. Показано, что при помещении металлических наночастиц в усиливающую (лазерную) среду можно создать материал с большим управляемым показателем преломления и очень большими усилением и нелинейностью. Такие гетерогенные среды могут найти применение в качестве новых лазерных активных сред, селективных фильтров, фотоэлементов, сегнетоэлектрических ёмкостей, а также существенно повысить чувствительность и разрешающую способность метода опто-акустической томографии в медицине. На возможные применения новых гетерогенных сред получено три российских патента.

Предложен и рассчитан Усковым А.В. и Проценко И.Е. новый тип лазера на свободных электронах, основанный на диссипативной неустойчивости релятивистского электронного пучка вблизи поверхности резонансно-поглощающего материала (полупроводника, диэлектрика), в резонансно-поглощающей газовой среде. В дальнейшем этот принцип генерации когерентного излучения был распространен на токи в сверхпроводниках, двумерные токи в квантовых ямах. Предложена схема Черенковского генератора с использованием двумерного фотонного кристалла в качестве замедляющей среды. Предложена новая концепция лазерного пондеромоторного ускорения заряженных частиц в плазме, при которой частицы ускоряются в результате точечного рассеяния на переднем фронте лазерного импульса. Получено квантовое кинетическое уравнение, описывающее эволюцию релятивистского электронного пучка в поле мощного лазерного излучения в комптоновском режиме.

Усковым А.В. разработана теория усиления потоков импульсов света полупроводниковыми оптическими усилителями на квантовых точках в режимах большой плотности тока, когда импульсы в потоке усиливаются, не влияя друг на друга. Показано, что максимальная частота повторения импульсов растет с увеличением тока накачки и может достигать значений 200 ГБит/сек. Использование этого режима может на порядок увеличить скорость передачи информации в современных оптоволоконных системах связи.

На всемирном конкурсе изобретений в Токио в 2000 г. за предложение и разработку нового лазерного метода выращивания алмаза из сжатого графита получена бронзовая медаль (Молчанов А.Г., Розанов В.Б.).

В начале второго десятилетия в секторе построена теория плазменных СВЧ волноводов скользящих мод, образованных излучением KrF УФ лазера в атмосферном воздухе; развита теория резонансно-усиленной ионизации молекул кислорода (REMPI) в поле излучения KrF лазера, проходящей через двухфотонное возбуждение ридберговского состояния молекул $O_2$ с последующей его фотоионизацией; исследована кинетика прилипания электронов слабоионизованной лазерной плазмы в воздухе в постоянном внешнем электрическом пол (Сметанин И.В. совместно с Зворыкиным В.Д., Левченко А.О., Шутовым А.В. и Устиновским Н.Н. из ЛГЛ).

Построены теория диссипативных и бездиссипативных романовских солитонов при вынужденном рассеянии лазерного излучения назад в докритической

плазме и теория фазовой самомодуляции при ВРМБ- сжатии лазерного импульса (И.В. Сметанин). Развита теория генерации субпикосекундных импульсов при синхронизации мод в многосекционном InGaN лазерном диоде в режиме с большой энергией импульса; предложен новый механизм аномальных осцилляций в спектре генерации GaN лазерных диодов, обусловленный резонансным возбуждением плазменных волн в пространственно разделенных двумерных слоях электронов и дырок (Сметанин И.В., Васильев П.П.).

Исследован вклад Оже процессов в разогрев носителей в оптических усилителях на квантовых точках (Усков А.В.). Показано, что этот разогрев может существенно влиять на динамику усиления и, в частности, на время восстановления усиления. А.В. Усковым и Проценко И.Е. разработана теория усиленной фотоэлектронной эмиссии из металлических наноантенн. Предложено использовать этот эффект для создания плазмонных фотопроводящих метаматериалов, для создания фотоприемников ближнего и среднего ИК диапазонов, для увеличения КПД солнечных элементов. Исследованы возможности использования плазмонных наночастиц для контроля ввода излучения в солнечные элементы. Впервые показано, что алюминий в качестве материла наночастиц может иметь существенные преимущества для применения в фотовольтаике в сравнении с золотом и серебром и, в частности, в органических солнечных элементах.

Разработаны основы теории дисперсии нелинейной проводимости островковых металлических пленок (Проценко И.Е.). Получены аналитические выражения для среднеквадратичных флуктуаций числа частиц в квантовых состояниях канонических ансамблей идеальных газов бозонов и фермионов. Построена квантовооптическая теория многомодовой генерации в лазерах с учетом пространственной зависимости взаимодействия атомов с полем стоячей волны в резонаторе, исследован механизм подавления шумов в многомодовом лазере.

В середине второго десятилетия в СТФ построена теория самофокусировки УФ лазерного импульса при резонансно-усиленной ионизации с двухфотонным возбуждением молекул газа. (Сметанин И.В.). Показано, что плазменный канал, создаваемый в газах (Xe, воздух) субпикосекундным KrF- лазерным импульсом, является волноводом и активной средой для субтерагерцового излучения (Богацкая А.В., Попов А.М.).

Построена модель самофокусировки и безэлектронной филаментации фемтосекундного УФ лазерного импульса в воздухе при доминировании когерентного ВКР на вращательных переходах молекулы азота (Сметанин И.В.). Предложена модель управляемого УФ лазерным импульсом высоковольтного разряда. Продемонстрирована возможность использования явления интерференционной стабилизации атомов в сильных полях для получения инверсной населенности и генерации (усиления) электромагнитного излучения в различных частотных диапазонах, от дальнего и среднего ИК частот до ВУФ диапазона (Богацкая А.В., Попов А.М.). Определено качественное отличие жёсткого

и мягкого соотношений неопределённости для ряда квантовых состояний электромагнитного поля (Козловский А.В.).

Исследована самофазировка ансамбля квантовых излучателей вблизи металлической наночастицы на основе механизма сверхизлучения Дике для применения в ансамблях нанолазеров (Проценко И.Е. и Усков А.В.). Исследован вклад туннелирования электрона из возбужденного состояния эмиттера в металлическую наночастицу. Козловским А.В. разработаны основы методики аналитического описания квантовых или классических полей в низкодобротных микрорезонаторах типа Фабри-Перо во временной области. Проведено исследование квантово-статистических свойств состояний электромагнитного поля общих суперпозиций когерентных состояний, получены формулы для флуктуаций (дисперсий) координатных и импульсных квадратур поля, числа фотонов. Сайгиным М.Ю. разработана теория параметрического генератора счета в надпороговом режиме генерации с учетом распределённого по всей длине резонатора нелинейного оптического взаимодействия. Определены пороговые условия генерации плазмонного («дипольного») нанолазера (Проценко И.Е.).

Разработана строгая теория излучения фотонов при неупругом туннелировании электронов в зазоре плазмонной наноантенны (Усков А.В., Проценко И.Е., Сметанин И.В.). Показано, что квантовая эффективность возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов в этих структурах может быть увеличена на порядки путем внесения в зазор наноантенны дополнительной квантовой структуры с резонансным туннелированием. Предложен принципиально новый метод возбуждения плазмонных наноантенн на основе диссипативной неустойчивости электрического тока в квантовой яме, расположенной вблизи наноантенны; неустойчивость возникает на частоте плазмонного резонанса. В отличие от существующих схем, основывающихся на одноэлектронных физических процессах, здесь реализуется коллективный эффект когерентного вынужденного усиления самосогласованного поля плазмон-поляритонной волны.

Показано, что в процессе филаментации УФ ультракоротких лазерных импульсов в воздухе определяющим процессом является когерентное вынужденное комбинационное рассеяние на вращательных уровнях молекул азота, которое и обеспечивает компенсацию керровской самофокусировки, в результате чего и образуется филамент (Сметанин И.В. совместно с В.Д. Зворыкиным, А.В. Шутовым и Н.Н. Устиновским из ЛГЛ).

Предложено использовать явление интерференционной стабилизации ридберговских атомов в высокоинтенсивных лазерных полях как способ создания плазменного канала с инверсной населенностью (А.В. Богацкая и А.М. Попов) Инверсия между группой ридберговских уровней и низколежащими возбужденными и основным состоянием позволяет получить усиление и генерацию в ИК, видимом и ВУФ диапазонах частот. Проведен анализ процессов генерации и усиления излучения в плазменном канале на основе скоростных уравнений, а также оценена эффективность предложенного метода по сравнению с обычным методом

генерации высоких гармоник в процессе перерассеяния электрона на родительском ионе.

Предложен принципиально новый тип нелинейных структур, в которых возможно осуществить связанные нелинейно-оптические взаимодействия. Эти структуры – названные бинарными, так как они состоят из двух разных кристаллов, каждый из которых компенсирует различный набор фазовых расстроек. Методами квантовой оптики исследована эффективность генерации параметрических полей в бинарных структурах (М.Ю. Сайгин). Исследованы и рассмотрены, квантово-оптические приближения квадратичного и кубического законов изменения амплитуд волн в параметрическом генераторе света. Исследован альтернативный подход для реализации многоволновых параметрических процессов в одном нелинейном кристалле, включающих как преобразование частоты вниз, так и генерацию суммарной частоты.

Определены условия существования и проявлений (захвата, группировки фотонов) коллективных эффектов в микро- и нано-лазерах на основании новых обобщенных скоростных уравнений, не требующих адиабатического исключения поляризации (И.Е. Проценко и А.В. Усков). Предложен новый подход (А.В. Усков и И.В. Сметанин) к генерации плазмон-поляритонов для наночипов следующего поколения, основанный на баллистическом пролете электронов через нано-контакты (сужения нано-проволок). Проведены исследования по генерации поверхностных волн оптического диапазона в нано-резотроне – приборе на основе диссипативной неустойчивости постоянного тока в полупроводниковой квантовой яме, электродинамически связанной с металлической поверхностью.

Разработан новый квантово-механический подход (А.В. Богацкая и А.М. Попов), позволяющий корректно учесть спонтанное излучение квантовых систем в присутствии сильного лазерного поля. На основе данного подхода исследованы особенности формирования "одетых" атомов в режимах интерференционной стабилизации и стабилизации Крамерса- Хеннебергер, а также генерации гармоник воздействующего излучения. Проведено исследование процессов туннелирования электромагнитных волн через плазменные барьеры применительно к задаче преодоления радиоблокировки в спутниковых системах связи на основе оптико-механической аналогии.

И.В. Сметаниным совместно с В.Д. Зворыкиным, А.В. Шутовым и Н.Н. Устиновским из ЛГЛ проведены исследования по резонансно-усиленной ионизации компонент атмосферного воздуха лазерным излучением УФ диапазона, выявлена доминирующая роль паров воды. Исследован режим филаментации УФ УКИ, в котором компенсация керровской самофокусировки происходит за счет нелинейного отклика молекул азота (ВКР на вращательных переходах молекул азота), а не дефокусирующего действия фотоэлектронов.

Получены новые энтропийно-информационные соотношения для коэффициентов Клебша-Гордана (Манько О.В.). Построена схема квантового супрематизма для кубитов, n-уровневых атомов и систем с произвольным спином, в

рамках которого состояния этих систем описываются распределениями вероятности проекций спина 1/2 на три перпендикулярных направления. Проведено исследование квантово-статистических свойств состояний электромагнитного поля фазовых суперпозиций когерентных состояний (Козловский А.В.). Найдены и проанализированы формулы для средних значений и флуктуаций (дисперсий) эрмитового оператора фазы поля (так называемого оператора Пегга - Барнетта). Отдельно рассмотрены состояния суперпозиций типа «шредингеровский кот», а также фазовых суперпозиций когерентных состояний. Найдено частное решение (Позднеев С.А.) для стационарной нелинейной системы уравнений в частных производных, соответствующей теории взаимодействующих электромагнитных полей. Найден дискретный спектр этой последней системы для случая двух и трех частных производных.

В конце второго десятилетия построена теория вынужденного рассеяния Рэлея – Ми в условиях двухфотонного поглощения в коллоидных растворах металлических наночастиц (Сметанин И.В., Ерохин А.И.). Исследована вынужденная генерация плазмонных мод в сферических наночастицах за счет развития диссипативной неустойчивости тока в близлежащей квантовой яме (Сметанин И.В. и Усков А.В.). Показано, что в микрорезонаторе) с активной средой, ниже порога лазерной генерации, возникает расщепление линии излучения на две компоненты из-за коллективного взаимодействия излучателей с модой микрорезонатора (И.Е. Проценко и А.В. Усков).

Исследовано стимулированное излучение фотонов и плазмонов при баллистическом пролете электронов через сужение нанопроволоки. Показано (Усков А.В., Сметанин И.В., Проценко И.Е.), что скорость излучения в наносужениях с медленно меняющимся радиусом может быть существенно выше, чем в сужениях, когда радиус меняется быстро.

Для кубитов, кутритов и кудитов (частиц с произвольными спинами) найдены выражения для векторов чистых состояний и матриц плотности через стандартные вероятности дихотомных случайных величин, и получены кинетические уравнения для распределения вероятностей, идентифицируемых с квантовыми состояниями и являющихся альтернативой волновых функций, векторов состояний и операторов плотности (Манько О.В.). Исследованы мягкие и жёсткие соотношения неопределённостейдля квантовых операторов фазы и числа фотонов, тригонометрических операторов фазы и числа фотонов, а также корреляции между числом фотонов и фазой электромагнитного поля в состояниях суперпозиций когерентных состояний (Козловский А.В.).

Разработана теория тормозного излучения при столкновении горячих электронов со стенками металлической наноструктуры (Сметанин И.В. и Усков А.В.). Разработаны основы квантовой теории микролазеров, в том числе беспороговых и с низкодобротными резонаторами, где существенно коллективное спонтанное излучение. спектры мощности, флюктуаций мощности, автокорреляционная функция g2 (Проценко И.Е. и Усков А.В.).

Разработан метод мультипольной декомпозиции для направленного рассеяния света (Сизова И.М. и Москалев Т.Ю.). Разработана теория аподизаторов на основе зубчатых диафрагм круглой формы, представляющих собой пространственный фильтр (ПФ) в виде телескопа Кеплера, на входе которого установлена зубчатая диафрагма (ЗД). Теория построена на решении параболического уравнения для падающих на вход ПФ цилиндрически-симметричных плоских световых пучков с постоянным и экспоненциальным профилями амплитуды.

На рубеже второго и третьего десятилетия исследована задача о поверхностной фотоэмиссии в структурах типа металл-полупроводник с барьером Шоттки при наличии встроенной в барьер квантовой ямы (Шуклин Ф.А., Усков А.В., Сметанин И.В., Проценко И.Е.) Исследован частотный скейлинг фототока вблизи порога (красной границы фотоэффекта) и показано, что зависимость фототока от частоты фотона вблизи порога становится близкой к линейной. Теоретически описана поверхностная фотоэмиссия с учетом скачка эффективной массы электрона на границе раздела сред.

На основе концепции о стохастической обратной связи Сметаниным И.В. совместно с Куриленковым Ю.К. (ИВТАН, ОЯФА ФИАН) и Огиновым А.В. (ОЯФА ФИАН), предложено качественное объяснение экспериментально обнаруженного эффекта частичного «запирания» рентгеновских квантов полидисперсной межэлектродной средой плазмы наносекундного вакуумного разряда с виртуальным катодом. Показано, что условия для стохастической обратной связи могут возникать при запирании рентгеновского излучения за счет перерассеяния в плотных межэлектродных ансамблях наночастиц (нанокристаллов).

На основе метода CRDS создана лазерная установка с пределом обнаружения урана в технологических средах АЭС $10^{-3}$-$10^{-5}$ мкг/л и разработан способ, уменьшающий погрешности измерения концентрации урана с 20% до 3,5 % (Орлов Е.П.). На основе понятия инвертированной 4-мерной субстанции разработана космологическая модель, с большой точностью описывающая диаграммы Хаббла для суперновых типа Ia, квазаров и гамма всплесков вплоть до $z = 6,5$, в которой источник темной энергии находится внутри расширяющегося твёрдого 4-мерного сферического слоя, представляющего собой наблюдаемую нами Вселенную. Предложена и разработана теория, объясняющая механизм возникновения и динамику особенностей решений нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих сингулярности Эйнштейна.

В 2021 г. в секторе впервые решена задача о поверхностной фотоэмиссии электронов из одномерного (1D) кристалла в барьер с участием Таммовского состояния на границе между кристаллом и барьером (Усков А.В., Сметанин И.В., Проценко И.Е.). Показано, что резонансное туннелирование с поглощением кванта через Таммовский уровень приводит к красному сдвигу порога фотоэффекта и к существенному увеличению квантового выхода фотоэмиссии горячих электронов. Показано, что поверхностная фотоэмиссия менее чувствительна к изменению эффективной массы электрона на границе металл-диэлектрик и поэтому более

эффективна, чем объемная фотоэмиссия для металлических наночастиц размера менее 20 нм. Разработаны и исследованы новые метаповерхности (Усков А.В.), позволяющие переключение между электрическими и магнитными модами за счет изменения поляризации падающей световой волны.

Предложен новый способ аналитического решения квантовых нелинейных уравнений Ланжевена, который использован для анализа нанолазеров со сверхизлучением (Проценко И.Е.). Впервые показано, что оптический спектр таких нанолазеров имеет триплетную структуру из-за больших флуктуаций населенностей лазерных уровней и сильных релаксационных колебаний. Получена новая формулировка (Манько О.В.) условий эволюции квантовых состояний в виде линейной системы уравнений для распределений вероятностей, задающих квантовые состояния в вероятностном представлении квантовой механики. Изучены примеры кудитов и квантовых осцилляторов в вероятностном представлении квантовой механики. Предложены квантовомеханические тригонометрические операторы разности фаз двух электромагнитных полей и исследованы их свойства (Козловский А.В.). Эрмитовы операторы разности фаз полей определяются с помощью операторов интерференции двух полей, возникающей при их смешении на светоделителе. Получены и проанализированы соотношения неопределённостей для операторов разности фаз двух электромагнитных полей, для операторов косинуса и синуса разности фаз, а также для операторов суммы числа фотонов и операторов разности фаз двух полей.

Предложен и реализован вариант единой теории поля (Жура Н.А.), в основе которой лежит использование оператора Дирака. Изучены резонансы (Позднеев С.А.) в простейших химических реакциях Исследованы резонансы при столкновениях электронов с молекулами. Разработаны методы численного решения уравнений Фаддеева. На основе представления об инвертированной 4-субстанции предложена модель (Орлов Е.П.) ускоренного расширения Вселенной и получены формулы, описывающие с высокой точностью наблюдаемую диаграмму Хаббла. Аналитически определено предельное значение постоянной Хаббла на больших расстояниях, совпадающее с результатами численных расчетов других авторов. Объясняется разница двух значений постоянной Хаббла, подтвержден вывод о времени жизни Вселенной, сделанный в других работах на основании исследований рождения малометалличных звёзд.

Предложен новый подход для получения терагерцовых импульсов с высокой степенью униполярности (Богацкая А.В. и Попов А.М.). Полученные результаты основаны на самосогласованном решении волнового уравнения второго порядка и кинетического уравнения Больцмана для релаксации функции распределения электронов по скоростям. Рассмотрен процесс детектирования широкополосного излучения терагерцевого диапазона частот болометрическим способом с помощью гетероструктуры, состоящей из последовательности проводящих и диэлектрических слоев легированного и нелегированного полупроводника (арсенида галлия, германия). Выбирая толщины слоев и уровни легирования, можно формировать

спектральные интервалы эффективного поглощения, что позволяет детектировать импульсы в диапазоне частот $\geq 10^{12}$ $с^{-1}$ со спектральной шириной порядка несущей частоты.

Показано (Орлов Е.П.), что с помощью метода резонаторной кольцевой спектроскопии предел обнаружения урана в технологических средах ядерных энергетических установок может быть снижен с 1-2 до 0,01-0,02 мкг/л, что существенно повышает безопасность АЭС. Разработана лазерная система обнаружения и мониторинга в реакторном отделении АЭС радиоактивного йода на уровне $10^8$-$10^6$ $см^{-3}$ (объемная активность 140-1,4 Бк/$см^3$), т. е. система обнаружения самой ранней стадии аварийного режима работы АЭС 4-го уровня по Международной шкале ядерных событий. Предложена и экспериментально опробована методика учета корреляции полей в опытах с пустым резонатором и резонатором, содержащим вещество с целью уменьшения погрешности определения показателя экстинкции методом резонаторной кольцевой спектроскопии.

### 3.2.2 Лаборатория газовых лазеров (ЛГЛ)

Лабораторией с 1996 г. руководит д.ф.-м.н., профессор А.А. Ионин. В 2019 г. на базе этой Лаборатории, существенно расширившей в последние несколько лет тематику работ и выросшей численно, в Отделении КРФ был образован Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий (ЦЛНТ) – см. раздел 3.3. Центр объединил в себе три лаборатории: Лабораторию газовых лазеров (см. 3.3.1), Лабораторию лазерной нанофизики и биомедицины (см. 3.3.2) и Лабораторию фемтосекундной нелинейной оптики (см. 3.3.3). А.А. Ионин возглавил Центр ЛНТ и сохранил за собой руководство ЛГЛ.

Основными направлениями исследований ЛГЛ в обозреваемый период времени являлись: молекулярные ИК лазеры и их применения, электроразрядный генератор для нехимического кислород-йодного лазера, лазеры на атомарных переходах, физика и технология широкоапертурных эксимерных лазерных систем с накачкой электронным пучком, взаимодействие фемтосекундных импульсов лазерного излучения с веществом и нанофотоника.

В первые годы нового столетия Иониным А.А., Синицыным Д.В., Котковым А.А., Климачевым Ю.М., Козловым А.Ю., Селезневым Л.В. совместно с теоретиками из ТРИНИТИ Напартовичем А.П., Кочетовым И.В. и Курносовым А.К. было проведено исследование механизмов обертонного излучения, связанных с кинетическими процессами в активной среде импульсного частотно-селективного обертонного электроионизационного CO лазера. Показано, что снижение энергии его излучения (вплоть до срыва генерации) при введении в лазерную смесь молекулярного азота обусловлено асимметричным колебательно-колебательным обменом между молекулами азота и высоковозбужденными молекулами окиси углерода. Экспериментально обнаружено, что модель одноквантового колебательно-колебательного обмена, которая обычно используется для расчета колебательной функции распределения, может быть применена только для нижних

колебательных уровней (V<15). На высоких колебательных уровнях (V>15) необходимо учитывать процессы многоквантового обмена и процессы асимметричного обмена двух квантов CO молекулы на верхних уровнях на один квант на нижних уровнях. При соответствующей коррекции энерговклада результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, что свидетельствует об адекватности используемой современной теоретической модели.

При исследовании кинетики молекул окиси углерода, возбужденных в импульсном электроионизационном (ЭИ) разряде, было экспериментально обнаружено, что эффективность импульсного ЭИ CO лазера с кислородной смесью в полтора-два раза превышает КПД лазера с обычными смесями (с азотом и гелием), а энергетические характеристики CO лазера на воздушных смесях, генерирующего как на основных (длина волны ~5 мкм), так и на обертонных колебательных переходах (~3 мкм), сопоставимы с аналогичными характеристиками лазера на смесях обычного состава.

В середине первого десятилетия в ЛГЛ с участием вышеперечисленных авторов был впервые создан компактный (объем активной среды 250x30x3мм$^3$) отпаянный криогенный лазер на обертонных переходах молекулы окиси углерода с накачкой щелевым ВЧ разрядом, действующий в диапазоне длин волн ~2,5–4,0 мкм. Средняя мощность генерации лазера составила около 0,5 Вт. Стабильная работа лазера реализована в течение порядка $5 \cdot 10^5$ лазерных импульсов Лазер может быть использован для детектирования токсинов, взрывчатых и наркотических веществ, линии поглощения многих из которых лежат в этом же спектральном диапазоне.

В рамках двух проектов МНТЦ совместно с Лабораторией химических лазеров и теоретиками из ТРИНИТИ выполнялись исследования, направленные на формирование в электрическом разряде синглетного кислорода (СК), как резервуара энергии для кислород-йодного лазера. Результаты экспериментального исследования энергетических характеристик ЭИ разряда в кислородсодержащих газовых смесях продемонстрировали, что добавление CO в смесь газов $O_2$:Ar позволяет существенно повысить устойчивость ЭИ разряда в кислородсодержащих смесях и достичь высокой величины удельного энерговклада, более чем на порядок превышающее значения, достигаемые без молекулярных добавок. Максимальное значение удельного энерговклада в пересчете на молекулярные компоненты смеси достигало ~6.5 кДж/л атм в газовой смеси $O_2$:Ar:CO=1:1:0.1 при полном давлении газа 30 Тор и объеме возбуждения ~18 литров. Теоретический расчет, проведенный для экспериментальных условий в предположении постоянства газовой температуры, показал, что выход СК может достигать ~20%, превышающих его пороговое значение, необходимое для работы кислород-йодного лазера при комнатной температуре. Были проведены эксперименты по наработке СК в поперечном по отношению к газовому потоку щелевом ВЧ разряде. В экспериментах исследовалось влияние на наработку СК таких параметров, как давление и состав газовой смеси, скорость потока газа, частота модуляции (низкочастотная) ВЧ мощности и мощность, вкладываемая в ВЧ разряд. Показано, что при одинаковой

вкладываемой мощности выход СК увеличивается с уменьшением давления и скорости потока газа и при разбавлении кислорода гелием. (Вагин Н.П., Ионин А.А., Кочетов И.В., Напартович А.П., Синицын Д.В., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Рулев О.А., Юрышев Н.Н.).

Под руководством Холина И.В. (Рис. 3.4) Заярным Д.А. и Льдовым А.Ю. был завершен цикл исследований лазеров высокого давления с пеннинговской очисткой нижних лазерных уровней на 3p–3s переходах неона с накачкой пучком быстрых электронов. Впервые запущены мощные лазеры на неисследованных ранее переходах с длинами волн 703,2 и 724,5 нм. Оптимизированы энергетические характеристики лазеров (включая лазер на 585,2 нм) при электроннопучковой накачке с плотностью тока 1,7 А/см$^2$, проведено исследование динамики генерации этих лазеров, а также динамики коэффициентов усиления слабого сигнала и наведенного ("горячего") поглощения. Исследованы процессы столкновительной дезактивации атомов Xe, находящихся в 6s и 6s'-состояниях, в Ar–Xe и He–Xe смесях высокого давления с малым содержанием Xe. Изучены процессы тушения $^1P_1$, $^3P_0$, $^3P_1$ и $^3P_2$-уровней в двухчастичных соударениях $Xe^* + Ar(He) \rightarrow$ продукты + Ar(He), трехчастичных соударениях $Xe^* + 2Ar(2He) \rightarrow ArXe^*(HeXe^*) + Ar(He)$ и в трехчастичных соударениях $Xe^* + Xe + Ar(He) \rightarrow Xe_2^* + Ar(He)$. Возбуждение исследуемых газовых сред производилось пучком быстрых электронов. Измерения выполнены с использованием методики абсорбционного зондирования и основаны на анализе временного хода концентраций исследуемых возбужденных состояний в послесвечении электронного пучка. Измерены константы скоростей 24-х плазмохимических реакций, из них 17-ти впервые.

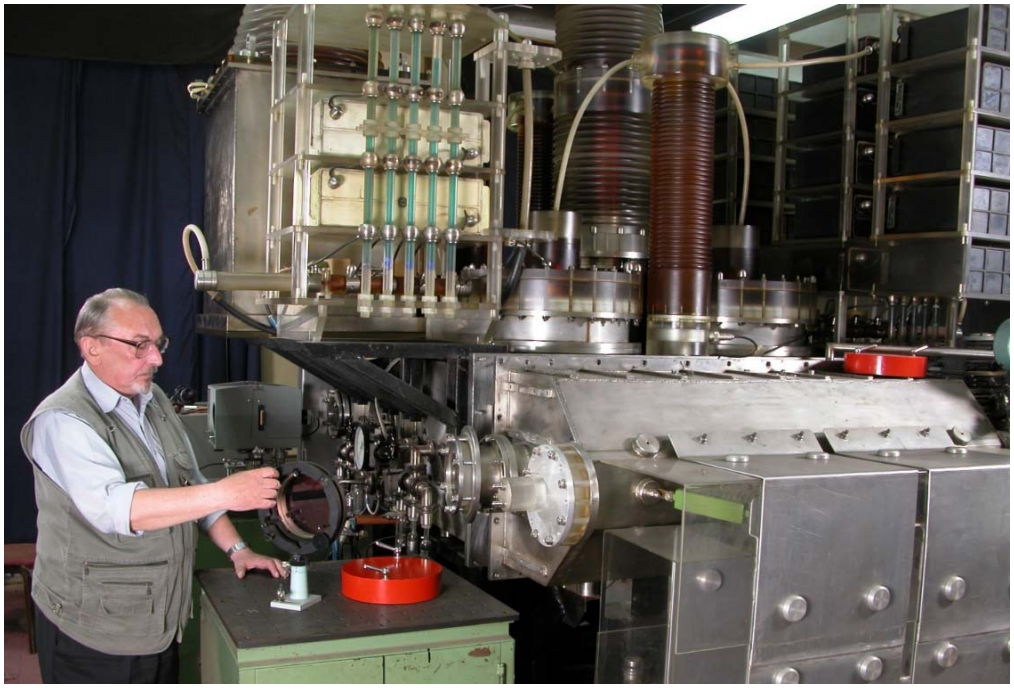


Рис. 3.4. И.В. Холин на установке

Зворыкиным В.Д. предложено устройство миниатюрной “Лазерной ударной трубы” с характерными размерами ~1см, заполняемой жидкостью или газом, в которых возможна генерация волн сжатия с амплитудой до 10 кбар и сильных ударных волн с числами Маха 10-20 за счет поглощения энергии излучения KrF лазера вблизи входного окна. Данное устройство позволяет исследовать проблемы гиперзвукового обтекания тел и развития гидродинамических неустойчивостей на границах раздела разных сред при прохождении ударных волн. Для обоснования концепции на мощной KrF лазерной установке «ГАРПУН» (длина волны излучения 248 нм, энергия 100 Дж и длительность импульсов 100 нс) совместно с Устиновским Н.Н. была выполнена серия экспериментов по взаимодействию импульсов УФ лазерного излучения со сплошными плоскими мишенями и тонкими CH пленками толщиной от 1 до 50 мкм. Изучены механизмы нагрева лазерной плазмы и ее динамика в диапазоне лазерных интенсивностей 0,1-1 ГВт/см$^2$, измерены спектры излучения плазмы с пространственным и временным разрешениями. Достигнуто ускорение пленок до скорости 4 км/с и измерены скорости ударных волн до 30 км/с.

Совместно с Сергеевым П.Б. исследованы проблемы стойкости и долговечности вакуумноплотных окон, предназначенных для инжекции электронных пучков накачки, а также лазерной оптики для широкоапертурных KrF лазеров с электронно-пучковой накачкой, важные для создания импульсно-периодических KrF лазерных драйверов для экспериментальных ЛТС-реакторов. Показаны преимущества фольги на основе гетерогенных сплавов алюминия и бериллия, обладающих высоким пропусканием для электронов, механической и коррозионной прочностью и хорошим теплоотводом. По совокупности свойств наилучшим материалом для окон может служить фтористый кальций, а для покрытий- лейкосапфир.

Экспериментально и теоретически Зворыкиным В.Д. изучена транспортировка и рассеяние сильноточных релятивистских электронных пучков в широкоапертурных KrF лазерных усилителях. Показано, что применение магнитного поля позволяет избежать пинчевания пучков, увеличивает эффективность накачки, а также практически исключает вынос рассеянных электронов на выходные окна лазера, что сводит к минимуму наведенное поглощение. В этих условиях единственной причиной деградации пропускания окон остаётся сопутствующее тормозное излучение. С помощью сцинтилляционного детектора измерено пространственно-временное распределение рентгеновского излучения из лазерной камеры, а также сняты кривые ослабления в различных поглощающих материалах (алюминии, меди, свинце). Совместно с Арланцевым С.В. разработан алгоритм регуляризации решения некорректной обратной задачи для восстановления спектра излучения на основании кривых ослабления.

Исследована динамика усиления наносекундных импульсов в широкоапертурных KrF лазерных усилителях: измерены коэффициенты усиления и поглощения в активной среде и интенсивность насыщения. Измерена эффективность усиления (12%) в двухпроходовой схеме и изучено усиленное спонтанное излучения

в осевом и поперечном направлениях. Результаты экспериментов сопоставлены с расчетами на основе самосогласованной модели KrF лазера (Молчанов А.Г.), которая затем использовалась для предсказания параметров крупномасштабных KrF лазерных драйверов для ЛТС.

Исследован скользящий режим распространения СВЧ излучения в трубчатых плазменных волноводах, создаваемых в атмосферном воздухе УФ лазерными импульсами, обусловленный полным внутренним отражением на оптически менее плотных стенках плазменного волновода. Продемонстрирована передача СВЧ-сигнала на частоте 35,3 ГГц на расстояние до 60 м. Показано, что дальность распространения СВЧ-излучения с длиной волны $\leq$ 1 см может достигать нескольких километров при энергии УФ лазерных импульсов порядка 500 Дж.

Фемтосекундные лазерные установки, заработавшие в ЛГЛ во второй половине нулевых годов благодаря поддержке директора ФИАН академика Месяца Г.А., позволили Ионину А.А., Селезневу Л.В., Кудряшову С.И., Макарову С.А. начать исследования по фемтосекундной лазерной записи субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана (были предложены, обоснованы и апробированы способы фемтосекундной лазерной записи квазирегулярных субволновых поверхностных нанорешеток с минимальным периодом до 60 нм), по внутриобъемной маркировке природных алмазов, по туннельной ионизации воздуха в сильном поле фемтосекундных лазерных импульсов, по филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Был обнаружен и теоретически подтвержден эффект множественной филаментации и образования мини-филаментов при острой фокусировке фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Было показано, что такие мини-филаменты с минимальным диаметром ~5 мкм являются компактным источником третьей гармоники возбуждающего излучения.

Следует отметить, что начатые в это время исследования по формированию наноструктур фемтосекундным лазерным излучением, по внутриобъемной маркировке алмазов, по филаментации фемтосекундного лазерного излучения явились мощным толчком для дальнейшего развития этих направлений и привели почти через десятилетие к созданию и исследованию антибактериальных наносистем для медицины и пищевой промышленности, к внутриобъемной записи QR-кодов в алмазах, к применению протяженных филаментов и постфиламентационных каналов для поджига электрического разряда на расстоянии в десятки метров и созданию в ОКРФ на базе ЛГЛ в 2019 г. Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий (рук. Ионин А.А.), состоящего и трех лабораторий: ЛГЛ (заведующий Ионин А.А.), лаборатория нелинейной фемтосекундной оптики (заведующий Селезнев Л.В.), лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины (заведующий Кудряшов С.И.).

В начале второго десятилетия на основе двухкаскадного преобразования частоты излучения CO-лазера в одном нелинейном кристалле Ионины А.А., Синицыным Д.В., Киняевским И.О., Котковым А.А., Климачевым Ю.М., Козловым

А.Ю (Рис. 3.5) впервые была создана широкополосная (более полутора октав) гибридная лазерная система «газовый лазер - нелинейный кристалл», в которой многочастотное излучение CO-лазера преобразуется в важный для спектроскопии и лазерной химии интервал длин волн от 2,5 до 8,5 микрон. Детальный анализ условий фазового синхронизма для генерации суммарных и разностных частот CO-лазера в нелинейном кристалле $ZnGeP_2$ продемонстрировал, что многие спектральные линии на выходе из гибридной системы располагаются чрезвычайно плотно друг к другу. Чтобы повысить мощность излучения и увеличить эффективность его преобразования, CO-лазер действует одновременно в двух режимах - синхронизации мод и модуляции добротности, что позволяет генерировать короткий (длительностью 1 - 2 мкс) цуг мощных наносекундных импульсов.

Рис.3.5. Сотрудники лаборатории газовых лазеров (слева направо):
Ю.М. Климачёв, А. Ю. Козлов, А.А. Ионин, И.О. Киняевский, А.А. Котков

Апробированы способы расширения спектра излучения гибридной лазерной системы в длинноволновую область среднего ИК-диапазона. На основе генерации разностных частот излучения CO- и $CO_2$-лазеров в нелинейных оптических кристаллах была создана лазерная система, которую можно перестраивать по множеству спектральных линий в среднем ИК-диапазоне спектра в области от 2,5 до 17 микрон, в том числе вблизи длины волны 16 микрон. Тем самым, продемонстрирована принципиальная возможность создания 16-микронной лазерной системы, - ключевого элемента технологии лазерного разделения изотопов урана. Экспериментально измерена эффективность конверсии частоты (генерация второй гармоники, суммарных и разностных частот) излучения

молекулярного газового лазера (CO-лазера) в нелинейных кристаллах. При генерации второй гармоники излучения CO-лазера, генерировавшего короткий (длительностью ~1 мкс) цуг мощных наносекундных импульсов, получена рекордно высокая эффективность конверсии 37%. Продемонстрирована возможность двухкаскадного преобразования частоты излучения CO-лазера в одном и том же образце нелинейного кристалла.

Впервые был реализован режим импульсно-периодической (частота следования ~100 Гц) генерации коротких (~1 мкс) импульсов в щелевом криогенном CO- лазере с ВЧ накачкой путем использования нетрадиционной для щелевых конструкций оптической схемы с модуляцией добротности резонатора внешним вращающимся зеркалом. Пиковая мощность излучения составила ~3 кВт, спектр излучения находился в интервале 5,0-6,5 мкм (колебательно-вращательные переходы основной полосы молекулы CO). Проведены первые эксперименты по генерации суммарных и разностных частот этого CO лазера в нелинейных кристаллах. Разработана оптическая схема конверсии частоты излучения молекулярных газовых лазеров (на примере CO- и $CO_2$-лазеров) в нелинейных кристаллах при совместной модуляции добротности обоих резонаторов. Продемонстрировано широкополосное (2,5-3,0 мкм) преобразование (генерация второй гармоники и суммарных частот) излучения CO-лазера в нелинейных кристаллах $PbIn_6Te_{10}$ и $AgGaSe_2$. В этих же кристаллах получена генерация разностных частот излучения CO- и $CO_2$-лазеров в диапазон длин волн от 11,5 до 16,6 мкм. Реализовано двухкаскадное преобразование (генерация второй гармоники, суммарных частот и разностных частот как второго каскада) частоты излучения CO-лазера в одном и том же образце нелинейного кристалла $AgGaSe_2$. В результате исследований свойств активной среды электроразрядного CO-лазера его спектр излучения был расширен в длинноволновую область на 0,5 мкм. При этом впервые была получена генерация излучения CO-лазера на самом высоком из достигнутых колебательных переходов молекулы CO, - на переходе 39=>38 с длиной волны 8,7 мкм. Обнаружено, что заселению более высоких колебательных состояний молекулы CO ($V$>39) препятствуют процессы ассиметричного (два кванта на один) колебательного обмена между молекулами CO. При добавлении в лазерную смесь молекулярного азота заселению высоких колебательных уровней ($V$>37) препятствуют процессы ассиметричного межмолекулярного колебательного обмена между молекулами CO и $N_2$.

Мощный (несколько десятков киловатт) одиночный наносекундный импульс был выделен из цуга импульсов излучения CO-лазера, действующего в режиме активной синхронизации мод, благодаря созданию и использованию электрооптического затвора (ячейки Поккельса) на основе кристалла теллурида кадмия. Пиковая мощность выделенного импульса излучения возрастает в несколько раз после прохода через CO-лазерный усилитель.

Экспериментально продемонстрировано, что компактные щелевые CO-лазеры способны эффективно генерировать импульсно-периодическое излучение,

как в полосе основных (фундаментальных) колебательных переходов, так и в полосе первого колебательного обертона молекулы CO. Исследована долговременная динамика мощности генерации щелевого CO-лазера, работающего в отпаянном режиме. Средняя выходная мощность щелевого лазера на обертонных колебательно-вращательных переходах молекулы CO (диапазон длин волн от 2,5 до 3,9 мкм) составила ~2 Вт, при этом ресурс стабильной работы лазера без замены активной среды достиг миллиона лазерных импульсов. Реализован режим модуляции добротности лазерного резонатора, при котором лазер генерирует короткие (порядка 1 мкс) и мощные (с пиковой мощностью 3 кВт) импульсы излучения одновременно на десятках (~80) спектральных линий в интервале длин волн от 5 до 7 мкм. Изготовлен щелевой двухдиапазонный (5-5,5 мкм и 2,5-3,0 мкм) CO-лазер, возбуждаемый ВЧ-разрядом при криогенном охлаждении электродов.

Методом абсорбционного зондирования Холиным И.В., Заярным Д.А. и Льдовым А.Ю. исследованы процессы столкновительного тушения метастабильного состояния $5s[3/2]_2^o$ ($^3P_2$) атома криптона в возбуждаемых электронным пучком He–Kr смесях высокого давления с низким содержанием криптона. Впервые измерены константы скоростей плазмохимических реакций $Kr^* + Kr + He \rightarrow Kr_2^* + He$ ($(2{,}88 \pm 0{,}29)\times10^{-33}$ см$^6$/с), $Kr^* + 2He \rightarrow HeKr^* + He$ ($(4{,}6 \pm 1{,}3)\times10^{-36}$ см$^6$/с) и $Kr^* + He \rightarrow$ продукты + He ($(1{,}51 \pm 0{,}15)\times10^{-15}$ см$^3$/с). Уточнены константы скоростей аналогичных реакций в Ar–Kr смеси.

Селезневым Л.В., Сунчугашевой Е.С. и Мокроусовой Д.В. продемонстрирована возможность управления параметрами плазменных каналов при филаментации ультракоротких лазерных импульсов методами амплитудной и фазовой модуляции лазерного пучка. В частности, при одинаковой линейной фокусировке применение диафрагм кругового и треугольного профиля приводило к тому, что старт плазменного канала происходит ближе к геометрическому фокусу, чем для пучка гауссового профиля, но дальше, чем при использовании сегментированной диафрагмы. Распределение плотности лазерной плазмы вдоль оптической оси для разных диафрагм также оказывается неоднородным: в случае диафрагмирования пучка плазменный канал прерывается в области геометрического фокуса, восстанавливаясь через несколько сантиметров, создавая таким образом второй филамент.

Экспериментально было продемонстрировано, что внесение дополнительных сферических аберраций в лазерный пучок, приводило к значительному увеличению длины плазменного канала, образованного в результате филаментации как ИК, так и УФ лазерных импульсов. Также было проведено исследование распространения двух последовательных фемтосекундных лазерных импульсов УФ- и ИК-диапазонов. Показано, что для ИК- диапазона плотность плазмы, образованной вторым импульсом, несколько меньше, чем плотность плазмы, образованной первым импульсом, при этом в интервале от 1,5 до 15 нс она не зависит от времени задержки второго импульса. Для УФ импульсов продемонстрировано, что при

увеличении временной задержки более 5 нс профиль распределения плотности плазмы вдоль филамента, образованного вторым импульсом, практически не отличался от первого, а при задержках менее 5 нс генерация плазмы вторым импульсом была малоэффективна.

Изучено влияние характеристик лазерного импульса на параметры плазменных каналов, образующихся при филаментации излучения. Впервые проведен сравнительный анализ динамической картины филаментации лазерных импульсов на длинах волн 248 и 740 нм. Установлен различный характер прохождения плазменным каналом линейной фокальной перетяжки пучка для УФ и ИК излучения. Продемонстрировано существенное удлинение плазменных каналов, образующихся при филаментации УФ и ИК лазерных импульсов, при внесении астигматизма волнового фронта.

Зворыкиным В.Д. и Селезневым Л.В. с коллегами были разработаны методы управления множественной филаментацией при распространении в атмосферном воздухе УФ пикосекундного лазерного импульса с субтераваттной пиковой мощностью на длине волны 248 нм, усиливаемого в гибридной титан-сапфир/KrF лазерной системе. Вследствие мелкомасштабной самофокусировки выходное излучение разбивается на 300 случайно распределенных по сечению пучка филаментов с диаметром ~ 0.3 мм, интенсивностью ~ $2 \cdot 10^{11}$ Вт/см$^2$ и плотностью электронов ~ $4 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$. При фокусировке филаментированного пучка зеркалом с $F$ = 6.75 м происходит слияние филаментов в один суперфиламент с диаметром ~ 0.5 мм, значительно меньшим фокального пятна (~ 3 мм). Интенсивность излучения в нём возрастает на порядок, а плотность электронов – на три порядка, что позволяет управлять высоковольтными разрядами и получать направленное сверхизлучение на переходах атмосферного азота.

При помощи этой гибридной Ti-Sa/ KrF лазерной системы осуществлен новый эффективный способ создания протяженных ионизованных каналов в атмосферном воздухе для управления разрядами и транспортировки СВЧ-излучения, в которых плотность электронов нарабатывается и поддерживается за счет многофотонной ионизации молекул $O_2$ и резонансного фотоотрыва электронов от электроотрицательного иона $O_2^-$ амплитудно-модулированными УФ лазерными импульсами субтераваттной пиковой мощности с длительностью огибающей 100 нс.

Иониным А.А., Зворыкиным В.Д., Селезневым Л.В. и Устиновским Н.Н. выполнены эксперименты по инициированию протяженных (до 1 м) высоковольтных (420 кВ) электрических разрядов в воздухе с помощью амплитудно-модулированных УФ лазерных импульсов, представляющих собой суперпозицию цуга усиленных в KrF усилителях пикосекундных импульсов субтераваттной мощности и 100-нс импульса квазистационарной генерации. Продемонстрированы снижение напряжения пробоя промежутка в несколько раз и прямолинейная траектория разряда, распространявшегося вдоль лазерного пучка. Скорость положительного лидера, распространяющегося от высоковольтного электрода к заземленному по создаваемому лазером слабоионизованному

плазменному каналу, достигала $4{,}0\times10^6$ м/с, что значительно выше скорости при самопробое промежутка ($1{,}2\times10^6$ м/с). Ускорение лидера, равно как и снижение напряжения пробоя при лазерной подсветке объяснены более быстрой лавинной ионизацией воздуха вблизи головки лидера, обусловленной образованием отрицательных ионов кислорода с низкой энергией связи электронов ~0,5 эВ и большим временем жизни (~1 мс) в процессе релаксации плазмы.

На гибридной титан-сапфир/KrF лазерной системе Зворыкиным В.Д., Устиновским Н.Н. и Шутовым А.В. были исследованы механизмы фотоионизации атмосферного воздуха УФ излучением с длиной волны 248 нм (энергия квантов ~ 5 эВ) с энергией 1÷50 Дж, временной формой и длительностями импульсов от 1 пс до 100 нс, пиковой мощностью от 0,5 ГВт до 0,2 ТВт. Измерены параметры одиночных и множественных филаментов, образующихся при фокусировке лазерного пучка и его свободном распространении. Показано, что ионизация воздуха в разрядном промежутке мощными УФ импульсами в 3 раза увеличивает скорость распространения разрядного лидера, что уменьшает время развития пробоя, в 4-5 раз снижает пробойное напряжение и направляет разряд вдоль лазерного пучка. Показано, что множественная мелкомасштабная филаментация сверхкритического лазерного пучка при прямом усилении субпикосекундных тераваттных импульсов на гибридной титан-сапфир/KrF лазерной системе ГАРПУН-МТВ приводит к насыщению энергии выходного излучения и деградации пропускания окон усилителей, а также ухудшает расходимость излучения и его фокусировку на мишени. Для подавления филаментации в экспериментах использовалась ячейка с ксеноном, который имеет двухфотонный резонанс с УФ излучением на 248 нм. Отрицательный нелинейный коэффициент Керра, оказывает обратное (по сравнению с самофокусировкой) дефокусирующее воздействие на области пучка с более высокой интенсивностью. Показано, что керровская дефокусировка не только эффективно выравнивает распределение интенсивности по сечению пучка в условиях уже сформировавшихся множественных филамент, но и предотвращает их последующее возникновение при установке ячейки с ксеноном в начале оптического тракта.

Кудряшовым С.И., Даниловым П.А. и Сараевой И.Н. была экспериментально и теоретически исследована субпикосекундная динамика околокритической электрон-дырочной плазмы, возбуждаемой в полупроводниках интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Впервые обнаружено, что сверхбыстрая плазменная перенормировка зонного спектра нелинейно увеличивает константу скорости Оже-рекомбинации, стабилизируя плотность плазмы и резко увеличивая выход надтермических носителей из фотовозбужденного материала с перенормированным вакуумным уровнем. Установлен новый принцип фабрикации регулярных суб-100-нанометровых решеток на поверхностях материалов под тонким слоем прозрачной иммерсионной жидкости – путем высокоэффективного возбуждения динамически перестраивающегося резонанса коротковолновых поверхностных плазмонов широкополосным излучением фемтосекундной

длительности, генерируемым в режиме мультифиламентации в иммерсионной среде теми же лазерными импульсами со сверхкритической пиковой мощностью. В данном режиме, путем фемтосекундного лазерного наноструктурирования поверхности кристаллического кремния в серосодержащей жидкой среде впервые получены субмикронные наноструктурированные слои гипердопированного материала (содержание серы 5-6 атомных % против менее 1% ранее), сильно поглощающего в видимой и ближней ИК-области. По данным ИК-спектроскопии, высокий коэффициент поглощения ~$10^4$ $см^{-1}$ обусловлен формированием зоны донорных состояний серы на 0,7 эВ ниже дна зоны проводимости.

С помощью фемтосекундных лазерных импульсов на поверхности алюминия созданы поверхностные плазмонные нанолинзы и наноантенны (нанолинза-зеркало + наноострие), позволяющие получить в фокусе локальное усиление электромагнитного поля исключительно электродинамического (без химического вклада) характера – до 3 раз в материале и до 8 раз над материалом, а также 30-кратное усиление нелинейной фотоэлектронной эмиссии с нано-острия в результате локального усиления электромагнитного поля в материале.

В середине второго десятилетия в ЛГЛ экспериментально исследованы параметры сверхбыстрой электронной, решеточной, фазовой и плазменной динамики железа, кремния, графита, титана, алюминия, меди на поверхностях конденсированных сред, возбуждаемых фемтосекундными лазерными импульсами. Выполнено нано- и микроструктурирование поверхностей конструкционных материалов (стали, алюминия, титана, стекла, оргстекла, молибдена) фемтосекундными лазерными импульсами для целей супергидрофобизации, генерации ТГц-излучения и авто-эмиссии.

Впервые с помощью электростатической коллекторной схемы обнаружен эффект низкопороговой (ниже порога термической фемтосекундной абляции) эмиссии электрон-ионной плазмы с поверхности полупроводников и металлов под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Корреляция пороговой плотности энергии для выхода плазмы и плато оптического отражения возбуждающих фемтосекундных лазерных импульсов накачки от поверхности указанных материалов указывают на сверхбыстрый (в масштабе лазерного импульса накачки) характер эмиссии.

В конце второго десятилетия в лаборатории на примере грам-положительных и грам-отрицательных культур патогенных бактерий выполнена демонстрация антибактериального и антибиопленочного эффекта для поверхностных кремниевых наноструктур и нанопокрытий на основе кремниевых наночастиц, образованных с помощью фемто- и наносекундного лазерного излучения; рассмотрены механизмы антибактериального действия. Разработан лазерно-аппликативный метод борьбы с биопленками патогенных микроорганизмов (золотистого стафилококка, синегнойной палочки) путем лазерно-индуцированного прямого переноса наночастиц различных материалов на биопленку, установлена эффективность

бактерицидного действия частиц различных материалов, а также влияние поверхности подложки.

Предложен плазмонный механизм формирования периодических наноструктур при фемтосекундном многоимпульсном лазерном воздействии на поверхности алмаза и кремния, соответственно, в воздухе и жидком сероуглероде. Для металлических одно- и многослойных пленок выполнено одно-импульсное фемтосекундное лазерное нано- и микро- структурирование, а также моделирование каскадной теплопроводности в многослойных пленках. Исследована лазерная абляция и генерация наночастиц ультракороткими импульсами варьируемой длительности с поверхностей материалов в различных средах, установлены режимы максимальной эффективности, предложено объяснение влияния длительности импульса на параметры абляции.

*Продолжение описания результатов Лаборатории газовых лазеров, достигнутых в период её принадлежности к Центру лазерных и нелинейно-оптических технологий (2019 г. и позднее), см. в разделе 3.3.1.*

### 3.2.3 Лаборатория нелинейных оптических явлений (ЛНОЯ)

Лаборатория, которой с 1986 г. заведует лауреат Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор И. Г. Зубарев, продолжает работы по совершенствованию мощных лазеров методами нелинейной оптики. Направления исследований – сами нелинейно-оптические явления (вынужденное комбинационное рассеяние – ВКР, вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна – ВРМБ, обращение волнового фронта – ОВФ) и их использование для создания высокоэнергетических лазерных систем общего и специального назначения. Определённое внимание уделяется разработке методов получения неискажённого изображения различных объектов через турбулентную атмосферу. В связи с последней реорганизацией 2016 г. в тематику работ ЛНОЯ вошли также исследование и использование бесфононных линий в твёрдых телах и применение лазеров в медико-биологических исследованиях.

На старте столетия в Лаборатории проведены экспериментальные и теоретические работы, в которых получены следующие приоритетные результаты: 1) предложен и реализован принцип многокаскадного ВРМБ-усилителя, на котором достигнуто усиление около $4 \cdot 10^8$ по интенсивности сигнала, 2) впервые в мире проведен успешный натурный эксперимент по самонаведению слабого (порядка $10^{-7}$Дж) сигнала на мишень, находящуюся на расстоянии около 600 м, с использованием ОВФ – зеркала и ВРМБ-усилителя с коэффициентом усиления ~ $10^5$ (Рис. 3.6).

Проведены расчеты пороговых условий и ожидаемой эффективности генерации в петлевой схеме применительно к усилителям на неодимовом стекле типа ГОС–1000 с размером стержня Ø 45×680 мм. Помимо специального применения, лазеры на основе петлевых резонаторов, слабо чувствительные к неоднородностям оптических элементов, могут использоваться и в промышленно–хозяйственных целях.

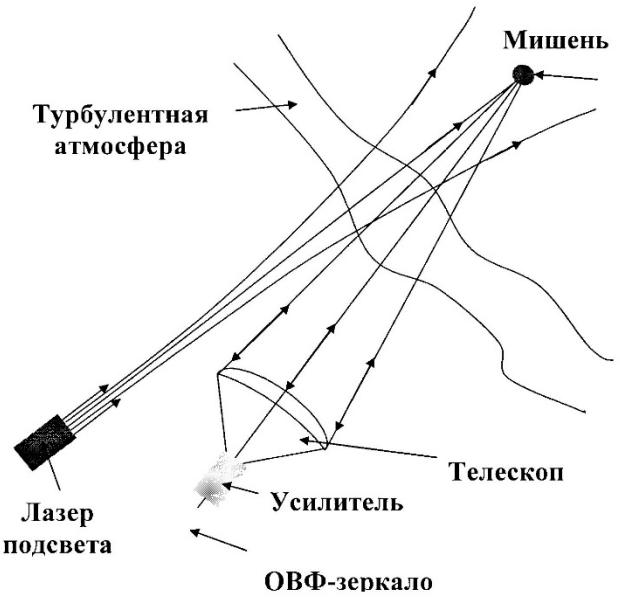



Рис. 3.6. ВРМБ-усилитель слабых сигналов, предложенный И.Г. Зубаревым

Разработана оптическая схема лазера на неодимовом стекле, работающего в режиме длинных (~ 4 мсек) импульсов, с выходной энергией ~ 1 кДж и ОВФ–зеркалом на основе газообразного ксенона. Помимо специального применения, например, силового воздействия на удаленные объекты, полученные результаты можно использовать для передачи лазерной энергии на большие расстояния в условиях атмосферных и оптических искажений, для создания лазерных информационных систем связи нового поколения, уничтожения космического "мусора", а также в устройствах и технологиях дистанционной резки, очистки поверхностей и сварки.

Наблюдалось квази-хаотическое изменение неоднородностей интенсивности усиленного неодимовым стержнем однородного на входе сигнала. Конструктивно усилитель был выполнен в виде стержня, охлаждаемого жидкой смесью (дистиллированная вода с растворённым хромпиком, поглощающим ультрафиолетовое излучение ламп–вспышек), которая находилась между прозрачной трубкой и стержнем. Установлено, что неоднородности усиленного излучения устраняются, если материал трубки поглощает ультрафиолетовое излучение.

Разработан принципиально новый метод получения неискаженных атмосферой изображений удаленных объектов, основанный на анализе спекл-структуры в распределении интенсивности принимаемого от объекта излучения. Для регистрации спекл-структуры в плоскости наблюдения не требуются какие-либо оптические системы или опорные волны. Проведенные модельные эксперименты подтверждают возможность создания безобъективных телескопов, с практически неограниченной апертурой по сравнению с имеющимися оптическими телескопами (1-10 м) и нечувствительных к турбулентным искажениям, вносимым земной атмосферой.

Исследована схема двухкаскадного ВРМБ – усилителя слабых сигналов с независимой накачкой каждого из каскадов усиления, в которой в два раза ослаблено конкурирующее влияние коррелированных с накачкой шумовых компонент. Экспериментально получен коэффициент усиления ~ $10^6$ ÷ $10^9$. Теоретически рассмотрено ВРМБ–усиление стоксова сигнала, нерезонансного с накачкой. Показано, что при инкрементах усиления G ~ ≥ 10 возможно достижение режима абсолютной неустойчивости, при котором происходит эффективное преобразование накачки в усиленный сигнал. Позднее была исследована лазерная схема, включающая трехпроходный твердотельный усилитель с коэффициентом усиления ~ ·$10^2$ и двухпроходный ВРМБ–усилитель. Суммарный коэффициент усиления составил $10^{10}$ при качестве (эффективности) обращения около 70 %. В 2003 г. исследована лазерная схема, состоящая из неодимового усилителя с коэффициентом усиления ~$10^2$ и однокаскадного однопроходного ВРМБ - усилителя с коэффициентом усиления ~ 2·$10^9$. Суммарный коэффициент усиления составил 2·$10^{11}$. Исследованы условия для высокого суммарного усиления при малых фазовых искажениях усиливаемого излучения (Зубарев И.Г., Ефимков В.Ф. и др. – Рис. 3.7).

Рис.3.7. В.Ф. Ефимков на установке.

Показано, что в спектре биений трех мод двухкомпонентного широкополосного лазера (например, на красителе) проявится чётно-симметричный частотный резонанс двухфотонного поглощения одной из боковых мод на запрещенном переходе без пьедестала над уровнем квантовых флуктуаций (Пантелеев В.И. и др.).

Открыта, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена однозначная связь между шириной спектра стоксова сигнала при ВРМБ в

оптическом волокне и числовой апертурой световода, причём эффект не зависит от того, является ли световод одно- или многомодовым. Построена теоретическая модель формы линии ВРМБ в оптическом волокне. Показано, что при мощности накачки на входе в световод выше порога ВРМБ спектр прошедшей световод накачки представляет собой Лоренцев контур с шириной на полувысоте (~0,5-1 МГц), в 5-10 раз меньшей однородной ширины спектра усиленного стоксова сигнала (~5 МГц). Эти характеристики спектра прошедшей световод накачки не зависят ни от превышения накачки над порогом, ни от числовой апертуры световода и длины образца, ни от того, является световод одно - или многомодовым.

Экспериментально и теоретически исследованы различные режимы пульсации мощности стоксова сигнала при ВРМБ, возбуждаемом в оптическом волокне излучением непрерывного одномодового лазера. Установлено, что в зависимости от длины волокна и величины коэффициента отражения на торцах волокна, пульсации могут быть либо нерегулярными, либо регулярными, либо, при определенных условиях, могут быть подавлены. Предложен и реализован эффективный метод селекции продольных мод волоконного ВРМБ лазера с длиной резонатора более 100 м. Найдены условия, при которых не пульсирующая высоко когерентная составляющая мощности стоксова сигнала при ВРМБ, возбуждаемом в оптическом волокне излучением непрерывного одномодового лазера, появляется при превышении накачки над порогом ВРМБ на уровне 10-20%, и ее амплитуда растет линейно с ростом мощности накачки вплоть до десятикратного превышения над порогом ВРМБ.

Создана работающая в непрерывном режиме лазерная система: задающий генератор - многомодовый волоконный усилитель мощности - волоконное ОВФ-ВРМБ зеркало. Этим доказана принципиальная возможность реализации полностью волоконной соответствующей системы. Создана и экспериментально исследована работающая в квазинепрерывном режиме (длительность импульса 100 мкс, частота повторения импульсов 100 Гц) лазерная система: одномодовый задающий генератор - усилитель мощности (Nd:YAG пластина с диодной накачкой) - ОВФ зеркало на основе волоконного световода. Для достижения высокого усиления при малой длине пластины использована конфигурация 12-проходного усилителя. Оптические неоднородности в пластине полностью скомпенсированы за счет ОВФ. Получены квазинепрерывная мощность 300 Вт и максимально достижимый коэффициент усиления около 150. Показано, что использование диодной накачки активной среды (кристалл Nd:YAG или легированное эрбием оптическое волокно) позволяет повысить выходную мощность системы до 1 кВт.

Впервые экспериментально установлен факт существования эффекта самообращения спектра при ВРМБ. Показано, что эффект ответственен за появление обнаруженных ранее непульсирующей высоко когерентной составляющей мощности и провала в спектре изначально шумового стоксова сигнала при ВРМБ, возбуждаемом излучением непрерывного одномодового лазера в режиме насыщения накачки. Проявляясь как восстановление временной когерентности возбуждающего

излучения, эффект является спектральным аналогом известного эффекта самообращения волнового фронта при ВРМБ.

В середине первого десятилетия разработан новый метод подавления ВРМБ в мощных волоконно-оптических лазерных усилителях высоко когерентного непрерывного лазерного излучения. Достигнут рекордный для волоконных усилителей уровень выходной мощности в 264 Ватт. Построена теоретическая модель и показано, что порог возбуждения ВРМБ в волоконных усилителях может быть повышен до 500 Вт (Ковалев В.И.).

Зубаревым И.Г. экспериментально и теоретически исследован усилитель слабых лазерных сигналов, состоящий из усилителя на неодимовом стекле, ВРМБ – усилителя и ОВФ – зеркала. При входном сигнале на стоксовой частоте ~$10^{-16}$ Дж и длительности импульса около 50 нсек полный коэффициент усиления составил ~$10^{16}$ при качестве ОВФ ≥ 80% и выходной энергии на уровне 1 Дж.

Экспериментально показано, что при использовании методов ОВФ для самонаведения лазерного излучения на удалённые объекты, доля излучения, попадающего точно на объект, составляет величину ~ 80±10% от всей энергии, отраженной от ОВФ-зеркала. В большинстве случаев это значение слабо зависит от величины турбулентности атмосферы и длины трассы, несмотря на значительную величину апертурных потерь. Показано, что в достаточно широких пределах турбулентную атмосферу можно считать фазовым экраном, «прижатым» к приемной апертуре ОВФ-зеркала.

В конце первого – начале второго десятилетия в ЛНОЯ создан мощный лазер-сумматор на ВКР в жидком кислороде при накачке излучением взрывных фотодиссоционных лазеров с энергией генерации ~ $2.5 \cdot 10^3$ Дж и увеличением яркости излучения накачки в $3{,}6 \times 10^2$ раз. Исследованы различные варианты усиления стоксовых сигналов. Предложен и реализован ряд новых систем, таких как ВРМБ усилитель в нестационарном режиме усиления и система комбинированного усиления типа лазерный усилитель – ВРМБ усилитель. Найдены условия, при которых усиление происходит при минимальных искажениях пространственной структуры сигнала. Использование ОВФ зеркала в системе комбинированного усиления позволило создать двухпроходную систему усиления и обращения волнового фронта слабых сигналов. Получено усиление порядка $(0{,}5 \div 1{,}0) \cdot 10^{16}$ при качестве ОВФ ≥ 80%, выходной энергии около 1 Дж и длительности около 30 нсек.

Развит новый подход к получению некогерентных изображений дифракционного качества при наблюдении объектов через искажающую оптическую среду. В частности, предложен метод достижения дифракционного предела по разрешающей способности, в том числе при наблюдении объектов через турбулентную атмосферу с помощью относительно недорогих аберрационных оптических систем (включая системы с составными апертурами), без использования вспомогательных адаптивных устройств. Показано, что при наблюдении удаленного объекта можно восстановить аппаратную функцию системы «атмосфера +

телескоп», используя распределение интенсивности излучения во вспомогательной плоскости, и с ее помощью получить дифракционно ограниченное изображение наблюдаемого объекта. Путем численного моделирования продемонстрировано применение предложенного метода для распознавания различных объектов при наблюдении их через турбулентную атмосферу.

Исследована петлевая схема ВРМБ – генератора, в которой излучение накачки, вышедшее из нелинейной среды, направляется обратно в среду навстречу исходной накачке. Для увеличения длины взаимодействия использовался светопровод. В такой схеме обратная связь осуществляется на неподвижной решетке нелинейного показателя преломления, образованной волнами накачки. Такой генератор можно рассматривать как генератор с распределенной обратной связью, созданной самими волнами накачки. Проанализировано взаимодействие встречных волн в бриллюэновски активных средах на основе компьютерного численного моделирования. Показано, что при использовании встречных волн с достаточно крутыми передними фронтами импульсов ($\tau_f \leq 3\ T_2$, где $T_2$ – время жизни акустических фотонов) процесс ВРМБ начинается не с уровня спонтанных шумов, а с уровня акустических волн, обусловленных ударным возбуждением в объеме активной среды. Этот механизм и определяет фазу выходной стоксовой волны, которая генерируется навстречу волне с наибольшей входной интенсивностью независимо от соотношений частот встречных волн.

В середине второго десятилетия в ЛНОЯ проведено исследование временных характеристик усиливаемого стоксова сигнала в режиме некогерентного рассеяния, т.е. при длине активных сред, значительно превышающих длину области когерентности. На практике подобные условия реализуются в световолоконных системах длиной более 100 метров. Наряду с аналитическим рассмотрением проведено численное моделирование реальной экспериментальной ситуации. В расчетах использовались соотношения Крамерса-Кронига для описания связи действительной и мнимой частей коэффициента усиления. Результаты анализа полностью подтверждаются данными экспериментов и численным моделированием.

Экспериментально и теоретически исследованы закономерности временной эволюции импульса стоксова излучения при его ВРМБ-усилении. Показано, что наблюдаемое экспериментально отклонение времени задержки максимума усиливаемого импульса от классического $Ln/c$ (здесь $L$ и $n$ – длина и показатель преломления усиливающей среды, $c$ –скорость света в вакууме), интерпретируемое в настоящее время в литературе как «медленный свет», в действительности является следствием нестационарности ВРМБ-усиления. лежащей в основе активно продвигаемой в мировой литературе идеи способа реализации «медленного/быстрого света». Проведено исследование влияния ширины спектра излучения накачки, длительности усиливаемого стоксова импульса, коэффициента ВРМБ усиления и длины усиливающей среды на задержку. Для получения информации о дополнительной временной задержке были применены два метода анализа: 1 - исследование с помощью прямого и обратного преобразования Фурье и

2 - путём численного решения соответствующих динамических уравнений с помощью разработанного для этих целей программного обеспечения. Показано, что оба метода дают одинаковый результат. В процессе исследований были использованы гауссовы, лоренцевы и линейчатые спектры накачки при различных значениях стационарного инкремента усиления (Ковалев В.И., Котова Н.Е.).

Получено новое оптическое волновое уравнение для макроскопически неоднородной прозрачной среды. В средах, моделирующих соответствующие неоднородности, экспериментально проиллюстрировано явное отличие решений, следующих как из нового, так и традиционно используемого волновых уравнений. В частности, исследовано угловое распределение интенсивности рассеянного излучения в серии изготовленных в Университете Хериота-Ватта, Эдинбург, и в НЦВО РАН образцов с объемными и планарными структурами с субмикронными (нано) и микронными масштабами периода.

Обнаружено, что в излучении, рассеянном волоконными структурами типа «фотонный кристалл», наряду с общей для всех образцов круговой индикатрисой, в некоторых образцах наблюдается узкий «лепесток», характерный для рассеяния регулярной, т. е. строго периодической объемной наноструктурой. Угловое распределение интенсивности излучения внутри лепестка имеет специфический вид, описываемый новым оптическим волновым уравнением. Предполагается, что по мере подтверждения обнаруженной корреляции результатами исследований более широкого набора образцов, она может лечь в основу нового оптического метода контроля характеристик наноструктурированных материалов.

Разработаны модельные представления, описывающие особенности спектрально-временных характеристик мощного отрицательно чирпированного фемтосекундного импульса, проходящего через пластинку из плавленного кварца. Они могут быть непротиворечиво объяснены эффектом ВКР, если описывать динамику отклика среды уравнением нелинейного осциллятора с резонансной частотой, уменьшающейся с ростом амплитуды колебаний (Ковалев В.И.).

С использованием спектрального подхода и численного моделирования проведено исследование характеристик усиления стоксовых импульсов в одномодовых световодах при ВРМБ излучения монохроматической и не монохроматической накачек. Найдены условия, когда можно реализовать «медленный свет», обусловленный групповой задержкой. Показано, что модель взаимодействия плоских волн адекватно описывает динамику этого процесса в одномодовых световодах. Исследован ряд режимов усиления стоксовых импульсов с различной временной структурой при монохроматическом и немонохроматическом возбуждении. Предложен способ передачи информации, основанный на эффекте трансформации скачкообразной фазовой модуляции входного стоксова сигнала в амплитудную модуляцию выходного сигнала.

Предложен универсальный метод расчета разности фаз лазерных пучков, выходящих через полупрозрачное зеркало интерферометра Майкельсона с плоскими зеркалами и ВРМБ-зеркалами, работающими в схемах прямой и обратной

фокусировки. Выявлены особенности фазировки стоксовых волн в схемах с независимыми и со связанными ВРМБ-зеркалами, находящимися в кольцевом интерферометре. Расчеты показали, что, например, в схеме интерферометра Майкельсона с двумя независимыми ВРМБ-зеркалами, находящимися в кольцевой схеме, при накачке импульсами с крутыми (2÷3 нсек) передними фронтами, при использовании в качестве активной среды фреона FC-75 и для $l_1 \approx l_2$ (расстояния плоскостей зеркал от полупрозрачного зеркала) разность фаз стоксовых волн на полупрозрачном зеркале интерферометра должна подчиняться зависимости $\Delta\varphi = \Delta k \Delta l$. Анализ показал, что в расчете необходимо учитывать также задержку начала генерации гиперзвука в одном из зеркал из-за разности длин плеч интерферометра. При учете такой задержки зависимость разности фаз стоксовых компонент для описанной выше схемы приобрела вид $\Delta\varphi = 2\Delta k \Delta l$, что и было подтверждено экспериментально.

В конце второго десятилетия теоретически и экспериментально исследовано вынужденное температурное рассеяние (ВТР) при наличии двухфотонного поглощения в активной жидкой среде. Были исследованы как чистые среды, так и суспензии из наночастиц серебра. Наночастицы серебра были получены двумя различными методами – методом лазерной абляции и при помощи плазменного разряда в кавитирующей жидкости. Не обнаружено качественных различий между характеристиками чистых жидкостей и суспензий. Показано, что величина антистоксова сдвига не должна зависеть от ширины линии накачки, а коэффициент усиления может возрастать в случае применения широкополосной накачки. Экспериментально показано, что частотный сдвиг при ВТР может существенно превосходить рассчитанное с использованием стационарной теории значение. Путем увеличения расстояния между зеркалами с применением деталей из комплектов эталонов Фабри-Перо заводского изготовления ИТ28-30 увеличена база эталона Фабри-Перо до значения 10,5 см, что позволило измерять малые (~ $10^{-4}$ $см^{-1}$ или ~ 30 МГц) частотные сдвиги при ВТР.

Исходя из анализа предпосылок квантовой модели фотоэффекта Эйнштейна и учитывая продемонстрированную недавно экспериментально способность «однофотонного» лавинного фотодиода на основе Ge-on-Si регистрировать лазерное излучение с суб-однофотонной энергией в импульсе, показано, что этот эффект, как и фотоэффект в полупроводниках, может быть объяснен в рамках классической электродинамики. Установлено, почему появление фотоэлектрона в «однофотонном» лавинном фотоприемнике на основе германия при суб-однофотонной энергии в импульсе воздействующего излучения не противоречит закону сохранения энергии при фотоэффекте. Результаты проведенных исследований позволили сформулировать определение фотона как импульса электромагнитного излучения с энергией, равной несущей частоте этого импульса, умноженной на постоянную Планка.

Установлено, что активной спектроскопии Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния присуще специфическое, асимметричное, искажение истинного спектра, обусловленное особенностями возбуждения волн плотности среды, распространяющихся с до- и сверхзвуковыми скоростями. Разработан математический формализм, позволяющий описать эффект немонохроматичности излучения накачки и пробного сигнала в такой спектроскопии. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными (Ковалев В.И.).

Предложена и реализована методика математической обработки оцифрованных интерферограмм Фабри-Перо с целью исключения субъективных факторов и увеличения точности измерений при определении частотного сдвига спектральных линий, когда этот сдвиг сравним с разрешающей способностью эталона Фабри-Перо. Показано, что для увеличения точности измерений необходимо найти геометрический центр системы интерференционных колец и произвести суммирование значений амплитуд по радиусу в определенном угле отдельно для верхней и нижней полуплоскости. Разработана компьютерная программа на основе математического пакета Mathcad 15, что позволило измерять при ВТР малые бриллюэновские сдвиги частоты (около 100 МГц).

Проведено исследование вынужденного температурного рассеяния (ВТР) лазерного импульса при двухфотонном поглощении излучения в толуоле. Излучение накачки с длиной волны 530 нм, длительностью импульса 30 нсек и расходимостью около $4x10^{-4}$ рад формировалось удвоением частоты излучения неодимового лазера ($\lambda = 1060$ нм) и фокусировалось линзой с фокусным расстоянием $f = 3$ см в кювету с толуолом длиной 7 см. С помощью ПЗС-матрицы регистрировалось распределение интенсивности в дальней зоне излучения ВТР. С помощью другой ПЗС-матрицы регистрировалось распределение излучения накачки, прошедшей кювету, в плоскости, близкой к фокальной плоскости фокусирующей линзы.

Измерения показали, что расходимость антистоксова излучения ВТР близка к дифракционной для пучка излучения ВТР ~ 2,5 мм. Ширина неоднородной фоновой компоненты возбуждающего излучения в фокальной плоскости фокусирующей линзы составила 300 – 400 мкм, однако в линейном случае она должна быть 12 мкм. Такой результат, по-видимому, является следствием возмущения оптических свойств среды при двухфотонном поглощении и интерпретируется как распад пространственной структуры возбуждающего излучения при ВТР за счёт двухфотонного поглощения накачки в толуоле. В дальнейшем показано, что значения коэффициентов двухфотонного поглощения сфокусированных лазерных пучков, рассчитанных в приближении плоских волн в области фокальной перетяжки и при учёте изменяющегося поперечного сечения светового пучка, различаются на два порядка величины.

В 2020-2021 г.г. в лаборатории, совместно с коллегами из Лаборатории газовых лазеров ОКРФ, исследовано влияние спектральных и временных характеристик излучения накачки на эффективность ВКР преобразования в кристалле $BaWO_4$. Показано, что реализуемая экспериментально в существенно нестационарном

режиме взаимодействия аномально высокая (~20% по энергии импульса) эффективность ВКР преобразования в отстроенное на ~925 $см^{-1}$ Стоксово излучение для спектрально ограниченных фемтосекундных (100-300 фс) лазерных импульсов сине-зеленой длины волны (ДВ 467 и 515 нм) является следствием интерференции эффектов фазовой самомодуляции (ФСМ) и ВКР. Обнаружено и установлено, что ответственная за ФСМ Керровская нелинейность кристалла $BaWO_4$ ориенационной природы характеризуется временем релаксации нелинейного отклика ~3,5 пс и нелинейным коэффициентом преломления $n_2 \cong 6{,}4.10^{-15}$ $см^2$/Вт.

Исследованы энергетические и спектральные характеристики ВКР в кристалле BaWO4 при накачке растянутых до 200 и 40 пс чирпированных 0,35 и 0,09 пс импульсов титан сапфирового лазера (длины волн 750 и 925 нм), соответственно. При этом максимальная эффективность генерации отстроенного на ~ 925 $см^{-1}$ Стоксового импульса достигнута в схеме с тремя последовательно расположенными образцами кристалла суммарной длиной 3,3 см. Найдено оптимальное расположение образцов относительно фокусирующей накачку линзы, позволившее достигнуть эффективности преобразования ~50% по спектральной яркости и ~20% по энергии импульса Стоксового излучения. Также обнаружены, охарактеризованы и интерпретированы эффекты повышения порога ВКР при накачке длинными, по сравнению с временем релаксации ВКР-отклика, чирпированными импульсами, и перестройки ДВ Стоксова излучения при изменении энергии импульса накачки.

### 3.2.4 Лаборатория фотохимических процессов (ЛФП)

Лабораторией с 1990 г. руководил к.ф.-м.н. Михеев Л.Д. (Рис.3.8), но в 2019 г., после его ухода из жизни, ЛФП была расформирована. Коллектив лаборатории занимался фотохимическим возбуждением газов и достиг больших успехов в создании на этой основе новых лазеров и усилителей, в разработке и применениях активных квантовых фильтров.

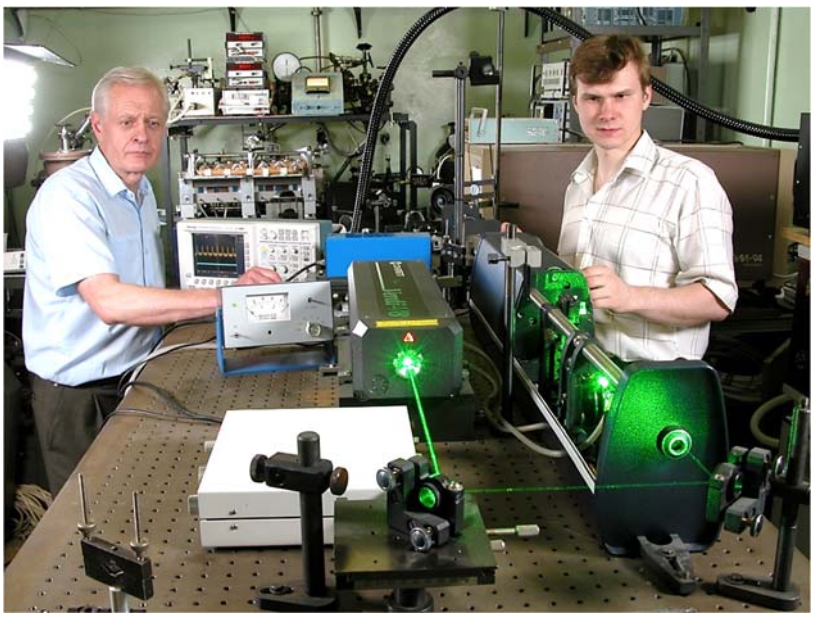


Рис. 3.8. Л.Д. Михеев (слева) и В.В. Миславский на установке

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований шумовых характеристик сред йодных фотодиссоционных лазеров (Носач О.Ю., Орлов Е.П., Сизова И.М.) разработаны и созданы на длине волны 1315 нм активные квантовые фильтры (АКФ) с полосой фильтрации 0,01 $см^{-1}$ и коэффициентом усиления до $10^6$, соответствующие мировому уровню. Их использование в качестве приемников лазерного излучения позволило достичь квантового предела чувствительности. Такие АКФ позволяют в условиях сильной засветки, например, на фоне солнечного диска выделять, усиливать и регистрировать импульсы излучения, состоящие всего из нескольких фотонов. Например, с помощью йодного АКФ экспериментально осуществлены выделение и регистрация предельно слабых сигналов на фоне плазмы с температурой 40000 К.

Показано что чувствительность лазерного приемного устройства с АКФ при его работе на фоне любой природной световой помехи, даже на фоне солнечного диска, снижается мало, не более чем на 12%. С помощью АКФ можно осуществлять усиление яркости изображений при предельно слабом уровне их освещённости, и получено усиление яркости в 3000 раз при сохранении дифракционного разрешения. Способность АКФ выделять сигналы в узкой спектральной полосе на фоне сильной засветки и формировать изображения объектов при предельно низком уровне их освещенности может быть использована при зондировании пламени, высокотемпературной плазмы, биообъектов.

Показана возможность согласования спектра излучения перестраиваемого полупроводникового лазерного диода с линией усиления йодного АКФ (Носач О.Ю., Орлов Е.П.), и достигнуто усиление излучения лазерного диода более $10^3$. Перестраиваемый по частоте одномодовый, одночастотный лазерный диод может быть использован для осуществления динамического контроля стабильности усилительных характеристик АКФ, работающего в импульсно-периодическом режиме. Разработан также метод оперативного динамического контроля стабильности усилительных характеристик АКФ и метод коррекции коэффициента усиления слабых сигналов в АКФ, работающем в импульсно-периодическом режиме, по измерениям его собственных шумов.

Эти результаты, в совокупности с результатами проведенных ранее экспериментальных и теоретических исследований йодного фотодиссоционного лазера, показывают, что приемо-передающая пара на основе этого лазера позволяет создать новое поколение лазерных локационных комплексов с дальностью действия более 1000 км, способных работать в любое время суток и даже на фоне диска Солнца. Эту пару можно использовать и для широкополосной космической лазерной связи с космическими аппаратами как в открытом космосе, так и при их входе в плотные слои атмосферы, а также для поиска сигналов внеземных цивилизаций на фоне излучения их звезд, удаленных от нас на расстояние более 300 св. лет, и, при необходимости, посылать сигналы этим цивилизациям. Сведений об аналогах йодного АКФ и зарубежных публикаций о разработке на период создания в 2001-2009 г. не имелось.

Создан фотохимический XeF(C-A)-усилитель фемтосекундных оптических импульсов с коэффициентом усиления $10^3$ (Аристов А.И., Москалёв Т.Ю., Черемискин В.И.). Совместно с Марсельским университетом (Франция) впервые экспериментально продемонстрировано прямое усиление фемтосекундных (~100 фсек) оптических импульсов в активной среде фотохимического XeF(C-A)- лазера, и измерены параметры усиливающей среды. Разработана и, на примере фотохимического XeF(C-A)-усилителя, экспериментально реализована новая концепция прямого усиления оптических импульсов фемтосекундного диапазона ($10^{-14}$-$10^{-13}$ с) на длине волны второй гармоники Ti:Sa лазера в широкополосных квантовых усилителях на основе активных сред фотохимических лазеров. Будучи газовыми, эти среды практически не имеют физических ограничений на их масштабирование и обладают низкой нелинейной восприимчивостью, что позволяет отказаться от применения дорогостоящей техники усиления чирпированных импульсов. Характерная для них сравнительно высокая плотность энергии насыщения (порядка $10^{-1}$ Дж/см$^2$) позволяет создавать достаточно компактные устройства с высоким контрастом излучения. Практическая значимость данной концепции состоит в том, что она открывает перспективу создания сверхмощных фемтосекундных систем (до $10^{15}$ Вт) с высоким временным контрастом (до $10^{10}$), на 4-5 порядков превышающим контраст существующих сверхмощных Ti:Sa систем.

На рубеже двух десятилетий в ЛФП совместно с ИСЭ СО РАН впервые реализована гибридная концепция построения фемтосекундных систем гибридного типа для генерации высококонтрастного фемтосекундного излучения сверхвысокой мощности в видимом диапазоне спектра на основе на основе газового XeF(C-A)-усилителя с оптической накачкой. Получена рекордная для видимого диапазона пиковая мощность 14 ТВт. Данный подход открывает перспективу создания петаваттных систем видимого диапазона и генерации мягкого рентгеновского излучения в окне прозрачности воды для получения голографического изображения живой клетки с нанометровым разрешением.

Обнаружен и исследован (Зуев В.С., Нетемин В.Н., Носач О.Ю., Орлов Е.П.) ранее неизвестный вид вынужденного рассеяния света в термодинамически неравновесных лазерных средах, названный энтальпийным вынужденным рассеянием. Разработаны и опробованы методы его подавления (Корольков К.С., Носач О.Ю., Орлов Е.П.), что открыло возможности создания мобильных взрывных лазеров с дифракционной расходимостью излучения и энергией в каждом импульсе несколько кДж в одном пучке. На основе численных методов квантовой теории рассеяния Позднеевым С.А. обнаружены и исследованы необычные резонансные состояния (резонансы Ефимова) в реальных системах ядерной физики (рассеяние нейтрона и протона на дейтроне), атомной физики (рассеяние электронов на молекулах) и молекулярной физики (рассеяние атомов на молекулах).

Во втором десятилетии было открыто новое явление уширения спектра и сокращения длительности отрицательно чирпированных фемтосекундных импульсов видимого диапазона при нелинейном взаимодействии

широкоапертурных пучков с оптическими материалами, обладающими нормальной дисперсией и кубической нелинейностью. Выяснена физическая природа спектрального уширения и самокомпрессии отрицательно чирпированных фемтосекундных импульсов при нелинейном взаимодействии с керровскими оптически прозрачными материалами. Установлено, что в основе наблюдаемого явления лежит совместное действие фазовой самомодуляции и четырехволнового смешения. Полученные результаты перспективны для разработки нелинейного метода самокомпрессии фемтосекундных импульсов, который свободен от физических ограничений на энергию в импульсе, а также для применений в фемтосекундных системах.

Впервые реализован метод самокомпрессии фемтосекундных импульсов в тонких прозрачных пленках. Получено двукратное (с 80 до 38 фс) сокращение длительности импульса в пленке PET толщиной 0,2 мм. Данный результат открывает перспективу разработки методов самокомпрессии, которые отличаются от существовавших до сих пор отсутствием физических и технических ограничений на их масштабирование по энергии.

В результате численного моделирования и экспериментальных исследований аподизатора лазерного пучка на основе зубчатой диафрагмы и пространственного фильтра разработан метод формирования супергауссовых пучков (Михеев Л.Д., Москалёв Т.Ю.), обеспечивающий низкие (не более 15%) дифракционные искажения при числе Френеля порядка 10, соответствующем распространению в многопроходном XeF(C-A)-усилителе гибридных фемтосекундных систем видимого диапазона. Данный результат открывает перспективу повышения эффективности и качества излучения указанных систем.

Разработан и практически реализован корректор фазы для лазерного аподизатора на основе зубчатых диафрагм, позволяющий устранять дифракционные искажения пучков супергауссова типа при числах Френеля менее 5 (Михеев Л.Д., Москалёв Т.Ю., Сизова И.М.), что позволяет в 2–3 раза увеличить диапазон расстояний, на котором наблюдается низкий уровень (менее 15%) дифракционной модуляции интенсивности в сечении лазерного пучка и, следовательно, повышенная пространственная однородность (Ставровский Д.Б.). Данный результат имеет практическое значение для многопроходных усилителей лазерных систем с большой трассой распространения лазерного пучка, характеризующейся малыми числами Френеля, в частности, для гибридных фемтосекундных систем видимого диапазона. Путем прямого решения параболического уравнения для цилиндрически-симметричных плоских световых пучков с постоянным и гауссовым профилями амплитуды получены решения, описывающие профиль лазерного пучка на выходе аподизатора, состоящего из зубчатой диафрагмы и пространственного фильтра.

Впервые осуществлен физический запуск активной среды $Xe_2Cl$ с оптической накачкой излучением XeCl-лазера (308 нм) и изучены ее усилительные свойства (Широких А.П., Мамаев С.Б.). Данная среда особенно привлекательна для усиления лазерных импульсов, благодаря широкой полосе усиления (100 нм) в области 500 нм

и большому времени жизни возбужденного состояния (250 нс). Кроме того, при оптической накачке рабочей смеси хлора и ксенона можно реализовать импульсно-периодический режим работы без смены рабочей смеси. Масштабируемость данной активной среды в силу ее газовой природы и развитые в настоящее время технологии изготовления возбуждаемых электронным пучком XeCl-лазеров с энергией не менее 2 кДж делают ее перспективной для создания субэкзаваттных фемтосекундных систем, полностью основанных на имеющихся отечественных технологиях.

Выяснена физическая природа самосокращения спектрально ограниченных фемтосекундных импульсов видимого диапазона при нелинейном взаимодействии с керровскими средами (Грудцын Я.В., Корибут А.В.). Установлено, что наблюдаемое явление обусловлено переходным режимом формирования множественной филаментации, вызванной модуляционной неустойчивостью пучка, которая охватывает центральную часть импульса и оставляет нетронутым излучение на переднем фронте. Распад пучка в его центральной и задней частях вследствие множественной филаментации позволяет за счет пространственной фильтрации выделить в дальней зоне излучение с переднего фронта импульса. Данный механизм самосокращения свидетельствует об отсутствии физических и технических ограничений на энергию в импульсе и позволяет рассчитывать на получение импульсов с длительностью, приближающейся к периоду световых колебаний, в системах сверхвысокой мощности вплоть до субэкзаваттного уровня.

На основе полученного критерия осуществимости межзвёздной лазерной связи в поисках внеземных цивилизаций, учитывающего соотношение размеров орбиты планеты и дифракционной картины лазерного пучка в месте приёма, а также несинхронность прихода сигнала и планеты в заданную точку орбиты из-за погрешности определения межзвёздных расстояний, проведён анализ основных параметров устройств, предназначенных для межзвёздной лазерной связи с экзопланетами Proxima b, TRAPPIST-1 f, LHS 1140 b и Ross 128 b (Орлов Е.П.). Показано, что двусторонняя лазерная связь с этими экзопланетами может быть установлена на длине волны 1,315 мкм с помощью йодных фотодиссоционных лазеров и оптических наземных телескопов с параметрами, уже реализованными на Земле, а поиск сигналов с экзопланеты Proxima b, посылаемых на Землю в оптимальном режиме, можно осуществлять даже с помощью любительских телескопов диаметром от 60 мм.

Разработаны методы (Орлов Е.П.) лазерного контроля состояния теплоносителя как в ядерных реакторах типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), так и типа РБМК (реактор большой мощности канальный), а также разработаны лазерные устройства для снижения предела обнаружения урана в технологических средах ядерных энергетических установок с 1-2 мкг/л до 0,01-0,02 мкг/л и мониторинга 4-го уровня (по международной шкале ядерных событий) аварийной ситуации на АЭС (например, она может быть обусловлена разгерметизацией тепловыделяющих элементов), что предотвращает гибель

обслуживающего персонала, выполняющего в это время регламентные работы в реакторном отделении АЭС.

На основе обнаруженного ранее свойства подобия одноименных статистических характеристик узкополосных случайных процессов разработан метод их аналитического представления при произвольной спектральной плотности случайного процесса (Орлов Е.П., Сизова И.М.), что существенно облегчает анализ шумовых процессов в лазерных средах и открывает новые возможности их исследования (в частности, в средах с двугорбыми контурами линии усиления) с целью достижения ещё большей чувствительности приема слабых сигналов.

### 3.2.5 Лаборатория химических лазеров (ЛХЛ)

До реорганизации в 2016 г. Отделения КРФ лабораторией ХЛ руководил лауреат Государственной премии д.ф.-м.н. П.Г. Крюков. ЛХЛ продолжала разработку и исследования лазеров ближнего ИК и видимого диапазонов, в том числе химического кислород-йодного лазера с непрерывным и импульсным режимом работы и лазеров на основе монокристаллических соединений $A_2B_6$.

В химических кислород - йодных лазерах в качестве энергетического донора для излучающего атомарного йода выступает молекула синглетного кислорода (СК) в электронно-возбужденном состоянии $O_2(a^1\Delta_g)$. Наработка СК в электрическом разряде позволяет исключить необходимость применения токсичных веществ, которые используются для получения СК в химическом генераторе. Для оценки возможности создания электроразрядного кислород-йодного лазера в первое десятилетие нового века в ЛХЛ совместно с Лабораторией газовых лазеров проведены экспериментальные исследования электрических и спектроскопических характеристик электроионизационного (ЭИ) разряда в кислороде и кислород-содержащих газовых смесях при давлениях газа до 100 Тор и большом объеме возбуждения (~18 л). Показано, что ЭИ разряд в чистом кислороде и его смесях с благородными газами неустойчив и характеризуется малыми значениями удельного энерговклада (УЭ).

При добавлении небольших количеств окиси углерода или водорода (порядка 1-10%) в кислород или его смеси с благородными газами устойчивость разряда заметно повышается, а УЭ увеличивается более чем на порядок, достигая ~6,5 кДж $л^{-1}$ $атм^{-1}$ в расчете на молекулярные компоненты газовой смеси. Теоретический расчет, проведенный для экспериментально достижимого УЭ ~6,5 кДж $л^{-1}$ $атм^{-1}$ при фиксированной температуре, показал, что выход СК может составлять ~20%, что превышает его значение, необходимое для достижения порога генерации в кислород-йодном лазере при комнатной температуре. Проведены эксперименты по спектроскопии электронно-возбужденных состояний кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Delta_g^+)$, образующихся в ЭИ разряде. Разработана методика измерения концентрации СК в послесвечении импульсного ЭИ разряда путем сравнения с интенсивностью излучения СК с заданной концентрацией, вырабатываемого в химическом генераторе СК.

Впервые исследованы особенности плазмы тлеющего разряда в кислороде с высоким содержанием синглетного состояния. Измерено напряжение пробоя в такой среде и потенциал ионизации СК. Показано, что зависимость сечения ионизации для СК получается параллельным смещением в сторону уменьшения на 0,98 eV по шкале энергий зависимости сечения ионизации для кислорода в основном состоянии. Разработан метод абсолютной калибровки датчиков СК с использованием химического генератора СК.

На основе проведенных исследований к концу десятилетия разработан облик импульсно-периодического химического кислород-йодного лазера (ИП ХКЛ) для локации удаленных объектов, отвечающего требованиям спецзаказчика по энергии, частоте следования импульсов и средней мощности излучения. Разработан, изготовлен и запущен макет ИП ХКЛ с инициированием электрическим разрядом. Достигнута выходная энергия 0,5 Дж при длительности импульса в диапазоне 5-10 мкс. Проведены исследования частотного режима работы лазера. При использовании гелия в качестве буферного газа достигнута частота следования импульсов до 75 Гц. По параметрам лазерного излучения видно, что такой лазер может быть использован также в сфере обработки материалов. По критерию отношения импульсной мощности к мощности непрерывного режима при одинаковом расходе реагентов разработанный лазер превосходил зарубежные аналоги.

В ЛХЛ совместно с ИОФАН также была разработана уникальная технология выращивания высококачественных кристаллов $A_2B_6$ с ионами переходных металлов и на их основе созданы твердотельные лазеры среднего ИК диапазона с рекордными характеристиками, перестраиваемые по длине волны в диапазоне 1,9-6,1 мкм. Для этого из паровой фазы были выращены совершенные монокристаллы ZnS, ZnSe, ZnTe, CdSe, легированные ионами Cr, Fe, Co до концентрации $5 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ непосредственно в процессе роста. Полученные кристаллы отличались повышенной однородностью, меньшими внутренними потерями, и из них могли быть вырезаны активные элементы с большой длиной оптического усиления.

Такие лазеры перспективны для медицины, спектроскопии и локации. В них впервые была реализована непрерывная лазерная генерация. В Cr:CdS (2,3 мкм) и Cr:CdSe (2,6 мкм) достигнута мощность 2 Вт с дифференциальным КПД выше 50 %. В импульсном Fe:ZnSe лазере (4,1 мкм) выходная энергия составила 2,1 Дж с КПД 51%.. В непрерывном Cr:CdSe-лазере продемонстрирован диапазон плавной перестройки длины волны генерации 2,35-3,45 мкм и реализован одночастотный режим работы с шириной линии, не превышающей 1 МГц. Генерация Fe:ZnSe-лазера была получена при температуре жидкого азота. Максимальная выходная энергия составила 130 мДж с дифференциальным КПД 40% по поглощенной энергии (квантовая эффективность 55%), что соответственно на 4 порядка и в 5 раз превосходило ранее полученные результаты. В дисперсионном резонаторе осуществлена плавная перестройка спектра генерации в области 3,77-4,40 мкм. В Cr:ZnSe-лазере получена генерация при комнатной температуре на длине волны 2,45

мкм с дифференциальным КПД 59 % по поглощенной энергии, что соответствует квантовой эффективности 87 %. Коэффициент поглощения на длине волны генерации не превышал 0,07 $см^{-1}$, что соответствовало лучшим результатам.

Cr:ZnSe-лазер с накачкой полупроводниковым дисковым лазером был впервые успешно использован в методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС) ИК диапазона, который является одним из наиболее чувствительных методов анализа газовых сред (реализована чувствительность к слабым линиям поглощения на уровне $10^{-9}$ $см^{-1}$), что позволяет на несколько порядков повысить чувствительность абсорбционного анализа по сравнению с традиционной спектроскопией. Рост чувствительности спектра генерации Cr:ZnSe- лазера к внутрирезонаторному поглощению наблюдался при увеличении длительности генерации по меньшей мере до 100 мкс, что эквивалентно эффективной поглощающей длине 30 км. Тем самым показано, что Cr:ZnSe-лазер является перспективным кандидатом для разработки компактного ВРЛС спектрометра невысокой стоимости для ИК диапазона.

Непрерывный двухмодовый Cr:ZnSe лазер применен также для регистрации резонансов насыщенной дисперсии на компонентах линии R(2) колебательно-вращательной полосы $\nu_1+\nu_4$ метана в области 2,36 мкм при охлаждении внутрирезонаторной метановой ячейки до 77К. Параметры резонанса подтвердили перспективность разработки на основе Cr:ZnSe/$CH_4$ лазера оптического задающего генератора с высокой ($10^{-15}$-$10^{-16}$) кратковременной стабильностью частоты.

Другим перспективным кандидатом для метода ВРЛС являлся Co:$MgF_2$- лазер. В его спектральной области генерации (1,6-2,5 мкм) находятся относительно сильные колебательные переходы многих молекул ($CO_2$, CO, $H_2O$, HF, HBr, $NH_3$, $CH_4$ и др.). Кристалл Co:$MgF_2$ имеет полосу поглощения с максимумом на длине волны 1,3 мкм, что позволяет использовать для накачки компактные лазерные диоды или твердотельные лазеры с диодной накачкой. Было показано, что сигнал внутрирезонаторного поглощения в Co:$MgF_2$-лазере возрастает до длительности генерации, по меньшей мере, 4 мс, что соответствует эффективной поглощающей длине 1200 км. В настоящее время это наилучший результат, достигнутый в методе ВРЛС для среднего ИК диапазона. Такая чувствительность позволяет регистрировать в атмосфере многие примесные газы на уровне концентраций единиц и десятков ppb.

Полученные результаты послужили основой для создания экспериментальных внутрирезонаторных спектрометров на основе Co:$MgF_2$ лазера для записи слабых спектров поглощения газов. Например, в окрестности 2 мкм методом ВРЛС было записано более 300 слабых линий поглощения метана, отсутствующих в спектральной базе данных HITRAN. Впервые был зарегистрирован спектр поглощения синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ в газовой фазе на переходе молекулярного кислорода $a^1\Delta_g \rightarrow b^1\Sigma_g^+$ вблизи длины волны 1,91 мкм. Разработан метод измерения абсолютного содержания СК на основе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии на переходе a-b молекулы кислорода. В случае

доплеровского уширения линий поглощения при комнатной температуре чувствительность регистрации $O_2(a^1\Delta_g)$ составила ~$(2\text{-}5)\cdot10^{14}$ $см^{-3}$. Продемонстрирована возможность измерения газовой температуры на основе зависимости сечения поглощения отдельных линий от вращательного квантового числа, что открывает большие возможности для исследования активной среды кислородно-йодного лазера (Фролов М.П., Подмарьков Ю.П. – Рис. 3.9).

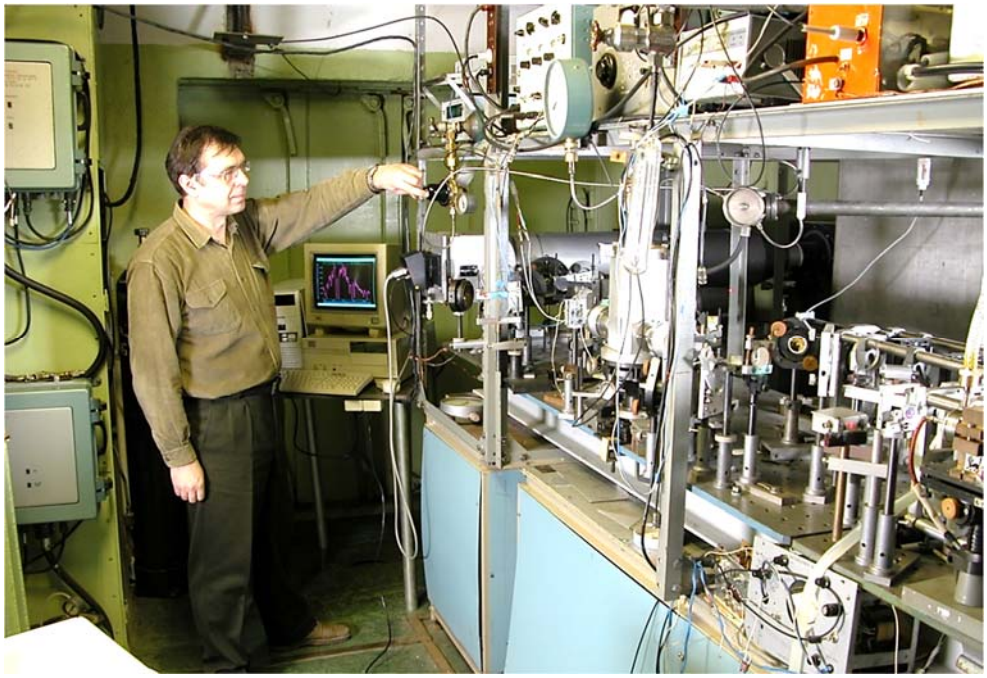


Рис. 3.9. Ю.П. Подмарьков у Nd-лазера с преобразованием излучения в 3 и 4 гармоники для инициирования химических реакций.

В середине второго десятилетия в ЛХЛ проведено исследование воспламенения смеси водород – кислород при наличии электронно-возбужденных молекул окислителя. Выполнены исследования влияния синглетного кислорода, получаемого в химическом генераторе, на воспламенение метан-кислородных смесей. Указанный подход позволяет исследовать явление в чистом виде, свободном от воздействия атомарного кислорода и озона. Продемонстрировано существенное сокращение времени воспламенения, что может быть использовано при разработке энергетических установок (Вагин Н.П., Юрышев Н.Н.).

Выполнены исследования, направленные на разработку лазеров 2÷6-микронного диапазона с повышенной выходной энергией (единицы джоулей) на основе кристаллов $A_2B_6$, легированных двухвалентными ионами железа, а именно, импульсного Fe:ZnSe-лазера при накачке мощными короткими импульсами при комнатной температуре. Исследована также возможность работы в непрерывном режиме Cr:CdSe-лазера с диодной накачкой. Изучен импульсно-периодический режим генерации лазера на кристалле Fe:ZnSe с термоэлектрическим охлаждением, накачиваемом двумя импульсными Er:YAG-лазерами, работавшими в режиме свободной генерации. Показано, что в короткой серии импульсов средняя мощность

на длине волны 4,3 мкм может превышать 10 Вт. В установившемся температурном режиме достигнута средняя мощность 3,1 Вт.

Была предложена оригинальная схема накачки Fe:ZnSe при комнатной температуре, по которой активный элемент Fe:ZnSe лазера одновременно служил пассивным затвором Er:YLF лазера накачки, и реализован импульсно-периодический режим генерации кристалла Fe:ZnSe с частотой следования импульсов 200 Гц. При использовании в качестве источника накачки непрерывного волоконного Er:ZBLAN лазера на монокристалле Fe:ZnSe, охлаждаемом жидким азотом, была получена непрерывная генерация с выходной мощностью 2,1 Вт и дифференциальным КПД по поглощенной мощности накачки 59%.

Были проведены комплексные исследования свойств монокристалла Cr:CdSe, в ходе которых была измерена температурная зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня $Cr^{2+}$ в диапазоне 236-391 K и изучены его лазерные характеристики при мощной непрерывной и импульсно-периодической накачке. В непрерывном режиме на кристалле Cr:CdSe получена выходная мощность 2,3 Вт (длина волны 2,65 мкм) с дифференциальным КПД 44% по поглощенной мощности накачки. В квазинепрерывном режиме с частотой следования импульсов 8 кГц достигнута средняя мощность 6 Вт при КПД 67 % (Фролов М.П.).

Проведено компьютерное моделирование нелинейного процесса распространения фемтосекундного импульса в кварцевом капилляре. Показано, что при компрессии фемтосекундных лазерных импульсов на основе процесса нелинейной фазовой самомодуляции в волокне с нормальной дисперсией и при последующем прохождении чирпированного импульса через оптический элемент с отрицательной дисперсией второго порядка существует оптимальная длина волокна, при которой достигается максимальное значение контраста компрессированного импульса – минимальное значение энергии в низкоинтенсивном пьедестале компрессированного импульса при сохранении длительности основного пика. С использованием нелинейного волоконного компрессора импульсы излучения иттербиевого лазера (средняя мощность выходного излучения 4,2 Вт, частота повторения импульсов 70 МГц) длительностью 100 фс сжаты до длительности 13 фс с эффективностью 74%. Снижение доли энергии, содержавшейся в низкоинтенсивном пьедестале, до 13% позволило повысить пиковую мощность лазерного излучения после временной компрессии в 4,9 раза.

В результате проведенных исследований в конце второго десятилетия был создан компрессор фемтосекундных лазерных импульсов на сверхкритическом ксеноне. Импульсы излучения иттербиевого лазера с длительностью 300 фс и энергией (7 -8) мкДж сжаты до длительности 23 фс с эффективностью 40 % на основе уширения спектра в ксеноне с давлением 62 атм (плотность 0,7 г/см$^3$ при температуре 22° С). Использование короткого (длиной 12 см) капилляра позволило создать ячейку с ксеноном малого объема (~ 5 см$^3$) и длиной 20 см. Вместе с компрессором на чирпированных зеркалах (расстояние между зеркалами ~ 10 см)

вся система в целом является достаточно компактной и безопасной в эксплуатации (Лосев Л.Л.).

В процессе исследования возможностей создания углеродных нанопленок на стекле КУ-1 с помощью излучения KrF-ЭПЛ был обнаружен эффект относительно низкого порога разрушения входной поверхности кварцевых пластин при отжиге излучением KrF-лазера в пятне с диаметром 1 см пленок ТМ (трансформаторного масла) на их выходной поверхности. Пространственное разделение мест поглощения излучения (выходная поверхность кварцевой подложки) и разрушений (области вблизи входной поверхности) указывает на то, что причиной разрушений являются ударные волны, а скачок давления у них в пробойном режиме близок к прочности кварцевого стекла на разрыв, т. е. ~$10^8$ Па. Оценки подтверждают, что при интенсивности излучения ~10-100 МВт/см$^2$ температура лазерной плазмы близка к ~1 эВ. Переход ТМ в плазму на поверхности стекла за время ~10 нс вызывает в нем ударную волну со скачком давления до $10^8$ Па.

Кроме кварцевого стекла в экспериментах пробовались и другие прозрачные для УФ излучеиия оптические материалы. Но у $CaF_2$ выходная поверхность с ТМ покрывалась мелкоструктурными трещинами уже после одного импульса лазерного излучения с плотностью энергии 3 Дж/см$^2$. Обусловлено это не только меньшей механической прочностью $CaF_2$ по сравнению с кварцевым стеклом, но и в 30 раз большим, чем у КУ-1, коэффициентом наведенного ионизирующим излучением (коротковолновое излучение плазмы) поглощения лазерного излучения на λ=248 нм. Эти факторы надо учитывать при выборе подложек для экспериментов по лазерному отжигу ТМ. У лейкосапфира наведенное поглощение лазерного излучения на λ=248 нм практически отсутствует. Это свойство, наряду с высокими прочностными характеристиками, указывает на перспективность использования лейкосапфировых подложек для синтеза нанопленок с помощью излучения мощных KrF-ЭПЛ по представленной схеме отжига слоя масла на воздухе.

Новый интересный результат получен при использовании в качестве покровного материала фторуглеродного масла (ФМ). В этом случае с помощью излучения мощного эксимерного электронно-пучкового KrF−лазера с длиной волны генерации 248 нм осуществлялся синтез фторуглеродных (C:F) наноплёночных покрытий на титане. Лазерная установка ЭЛА генерировала импульсы излучения с длительностью около 80 нс и энергией до 10 Дж, плотность энергии излучения за импульс не превышали 10 Дж/см$^2$, когда интенсивность достигала 125 МВт/см$^2$. Облучаемое пятно имело диаметр 9 мм. Использовались титановая (ВТ1-0) фольга толщиной 50 мкм и пластины толщиной 0,5 мм. Выбор титана обусловлен его широким использованием в технике и медицине.

Это первое использование фторуглеродной жидкости (по сути, масла для форвакуумных насосов) в процессе лазерной модификации поверхности металлов. Жидкость очень прозрачная с плотностью 2,2 г/см$^3$, её спектр поглощения лежит в области от 0,2 до 11 мкм. В диапазоне от 0,35 до 3,2 мкм ФМ имеет поглощение менее 1 см$^{-1}$, а в области от 0,46 до 2,1 мкм оно меньше 0.1 см$^{-1}$. Следовательно, ФМ

может быть покровной жидкостью при лазерной модификации металлов большинством технологических лазеров. На длине волны KrF-лазера поглощение ФМ равно 380 $см^{-1}$. При таком поглощении подвод хотя бы половины энергии лазерного излучения до поверхности титана возможен при толщине покрова менее 10 мкм. Но изюминка здесь ещё и в том, что тонкие слои ФМ толщиной от 50 до 10 мкм легко наносятся простой ватной палочкой.

Механические свойства синтезированных нанопокрытий измерялись в ТИСНУМе на нанотвердомере “НаноСкан-4D”. Оказалось, что в пределах ошибки измерения нанотвердость C:F нанопленки близка к титановой. Её модуль упругости также близок к показателям титановой фольги в 130 ГПа. Отметим, что это лишь в 2.3 раза меньше, чем у фторографена, и почти в 300 раз выше (!!!), чем у обычного фторопласта Ф-4 (Сергеев П.Б., Морозов Н.В. – Рис. 3.10).

Рис. 3.10. Морозов Н.В (слева) и Сергеев П.Б. на установке с электронно-пучковым инициированием.

На рубеже второго и третьего десятилетий был предложен и экспериментально исследован метод понижения макроскопических квантовых флуктуаций энергии стоксова импульса при нестационарном ВКР. Когда длительность лазерного импульса становится меньше времени дефазировки когерентных колебаний в активной среде $T_2$, стоксов импульс с мощностью, сравнимой с мощностью импульса накачки, возникает после прохождения через активную среду части лазерного импульса – пороговой энергии накачки. При этом в случае фиксированной формы и энергии лазерного импульса момент времени, соответствующий возникновению стоксова импульса, будет варьироваться вследствие квантовых флуктуаций исходного числа стоксовых фотонов. В свою

очередь, это будет вызывать флуктуацию энергии стоксова импульса. С целью снижения величины макроскопических квантовых флуктуаций энергии стоксова импульса было предложено разделить исходный лазерный импульс на два субимпульса с временным интервалом между ними, меньшим времени дефазировки $T_2$.

В дальнейшем посредством изменения соотношения между энергиями субимпульсов или параметров активной среды выбирался такой режим преобразования, при котором интенсивный стоксов импульс возникает в конце первого субимпульса. Тогда ВКР преобразование второго субимпульса будет осуществляться посредством рассеяния на динамической решетке поляризуемости (когерентных колебаниях среды), уже сформированной первым импульсом. Соответственно, процесс спонтанного комбинационного рассеяния не будет оказывать заметного влияния на преобразование второго субимпульса, и величина квантовых флуктуаций может быть значительно понижена. В средах со скалярным типом комбинационного рассеяния, к которому относится ВКР на колебательных уровнях в газах, поляризация стоксовой волны воспроизводит поляризацию волны накачки. Поэтому для разделения субимпульсов стоксова излучения на выходе преобразователя используется поляризационный способ, при котором на входе в активную среду формируются ортогонально линейно поляризованные субимпульсы лазерного излучения.

Исследование данной схемы было выполнено при ВКР в водороде излучения иттербиевого лазера с длительностью импульса 1,6 пс. Длина волны стоксова излучения составила 1,8 мкм. Было показано, что при нестационарном ВКР использование накачки двумя последовательными ортогонально поляризованными лазерными импульсами позволяет снизить величину макроскопических квантовых флуктуаций энергии стоксова импульса в 4 раза по сравнению с накачкой одиночным импульсом. При относительной дисперсии распределения по энергии импульсов иттербиевого лазера 0,4% в водороде получена дисперсия импульсов первой стоксовой компоненты 0,9%.

Предложенная схема комбинационного преобразователя с двухимпульсной накачкой является перспективной для создания частотных преобразователей со стабильностью, близкой к стабильности лазерной системы. Использование данной схемы с мощными иттербиевыми лазерами открывает возможности генерации с высокой стабильностью миллиджоульных субпикосекундных импульсов в диапазоне длин волн 2 мкм для экспериментов в области нелинейной оптики среднего ИК диапазона.

Экспериментально исследован процесс ВКР в режиме нелинейной фазовой модуляции волн лазерного и стоксова излучения. Установлено влияние параметров комбинационно-активной среды и соотношения лазерной и стоксовой длины волны на величину минимальной длительности лазерного импульса, при которой возможен эффективный процесс ВКР. Показано, что наиболее короткая длительность лазерного импульса достигается в случае, когда длина волны стоксова излучения в

два раза превышает длину волны излучения накачки. Показана возможность получения максимально широкополосных импульсов стоксова излучения при согласовании групповых скоростей лазерного и стоксова импульса.

При использовании фемтосекундного лазера с длиной волны ~ 1 мкм и сжатого водорода зарегистрировано стоксово излучение с центральной длиной волны 1,8 мкм и спектром, соответствующем спектрально ограниченному импульсу с длительностью 16 – 18 фс, что короче трех периодов световой волны. После временной компрессии получены стоксовы импульсы длительностью 20 фс. Эффективность преобразования по энергии достигала 12% (Лосев Л.Л., Пазюк В.С.).

Метод некогерентного антистоксова комбинационного рассеяния света с фемтосекундным временным разрешением применялся для изучения динамики G-фононов в образцах графена. Графен возбуждался на длине волны 816 нм, и рассеивание наблюдалось на длине волны 383,5 нм при зондировании на длине волны 408 нм. Исследовалось время жизни G-фононов в графене, полученном методом отслаивания и нанесения на $Si/SiO_2$ подложку, и графене, полученном методом напыления на $Si/SiO_2$ и кварцевую подложки. Во всех случаях измерения проводились для одного, двух и трех слоев. Время жизни G-моды составляло 1,76 пс для монослоя графена и увеличивалось до 2,04–2,29 пс для двух и трех слоев, что близко к результату, полученному для чистого графита. Время жизни фононов для графена, полученного методом напыления, меньше, чем для графена, полученного методом отслаивания (это связано с различными типами структурных дефектов) и лежит в диапазоне 1,43–1,67 пс для кварцевой подложки и 1,21–1,35 пс для $Si/SiO_2$ подложки. Различие, вероятно, связано с большей шероховатостью кварцевой подложки и менее эффективным контактом (Шарков А.В., Хорошилов Е.В.).

В лаборатории были также проведены экспериментальные исследования лазерных характеристик монокристалла Fe:CdTe, накачиваемого при комнатной температуре 40-нс импульсами Fe:ZnSe лазера, работающего на длине волны 4,1 мкм. Выходная энергия Fe:CdTe лазера составила 5,8 мДж при КПД более 30%. Кроме того, была достигнута рекордная плавная спектральная перестройка шириной 2300 нм в области 4,5-6,8 мкм, что является самым длинноволновым диапазоном перестройки длины волны, достигнутым для лазеров на халкогенидах, легированных двухвалентным железом.

Энергетическое масштабирование Fe:CdTe лазеров при комнатной температуре проблематично из-за отсутствия 4-мкм высокоэнергетических короткоимпульсных источников накачки и относительно низкого порога лазерно-индуцированного повреждения кристалла Fe:CdTe. Поэтому были проведены исследования лазерных характеристик кристалла Fe:CdTe при низких температурах, тем более что при охлаждении кристалла Fe: CdTe время жизни верхнего состояния увеличивается, достигая 68 мкс при температуре жидкого азота, а это позволяет увеличить энергию с помощью более длинных импульсов накачки. В частности, при накачке 250-мкс импульсами 4,1-мкм Fe:ZnSe лазера в Fe:CdTe лазере при 77 К была получена рекордная энергия 0,35 Дж с дифференциальным КПД 44%. Заметим, что

при температуре 215 K (легко достижимой с помощью элемента Пельтье) лазер генерировал 0,15 Дж выходной энергии с КПД 22%.

Продемонстрирована возможность высокочувствительной регистрации CO, $N_2O$ и изотопов $CO_2$ методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии на основе Fe:ZnSe лазера, непрерывно перестраиваемого в спектральном диапазоне 3,76-5,29 мкм. Длинноволновая граница диапазона 5,29 мкм является рекордной для Fe:ZnSe лазеров.

Впервые получена лазерная генерация на ионах $Ce^{3+}$ в селенидном стекле (совместно с ИОФАН). Реализована область спектральной перестройки 4,5-5,6 мкм. В таком лазере впервые реализован (тоже совместно с ИОФАН) режим генерации гигантских импульсов. В качестве пассивных затворов для спектральной области в окрестности 5,2 мкм впервые использованы монокристаллы Fe:CdSe и Fe:CdTe.

Впервые получена лазерная генерация в селенидном стекле $Ge_{20}Sb_{10}Ga_5Se_{65}$, легированном ионами $Ce^{3+}$, на переходе $^2F_{7/2}\rightarrow{}^2F_{5/2}$. Накачка осуществлялась импульсным Fe:ZnSe лазером с длительностью импульса 250 мкс и длиной волны 4,08 мкм, работавшим при температуре жидкого азота. Генерация $Ce^{3+}$ лазера получена при комнатной температуре. В первых экспериментах была достигнута выходная энергия 0,5 мДж и реализована область перестройки 5,10–5,52 мкм. Длительность импульса составляла 40-150 мкс в зависимости от уровня накачки. Энергетическое масштабирование $Ce^{3+}$ лазера было достигнуто за счет оптимизации лазерного резонатора. В результате выходная энергия лазера составила 35 мДж при дифференциальной эффективности 21%, а область спектральной перестройки расширена до 4,5-5,6 мкм.

В лазере на стекле $Ge_{20}Sb_{10}Ga_5Se_{65}$, легированном ионами $Ce^{3+}$, был впервые реализован и режим генерации гигантских импульсов. В качестве пассивных затворов для спектральной области в окрестности 5,2 мкм впервые использованы монокристаллы Fe:CdSe и Fe:CdTe. В первом случае длительность гигантских импульсов была 110 нс, во втором - 30 нс.

Проведены измерения шумов интенсивности и стабильности частоты повторения твердотельного лазера на кристалле Cr:ZnSe с пассивной синхронизацией мод. Наименьшее значение временного джиттера (1,5 мрад) получено для режима одиночных импульсов, когда в качестве компенсатора дисперсии используются две пластики из фторида магния. Лучшая стабильность частоты повторения на уровне $9{,}1\cdot10^8$ для времени усреднения в 1 секунду реализуется для режима связанных импульсов, когда в качестве компенсатора дисперсии используются две сапфировые пластинки (Фролов М.П.).

В целях расширения области применения лазерных технологий были исследованы возможности получения изделий из самосвязанного карбида кремния с помощью только лазерного нагрева, без использования нагревательных печей и высокого внешнего давления. Измерение плотности образцов, полученных двумя разными способами нагрева, показало значение 2,8 г/см$^3$ для образца, спеченного в высокотемпературной печи, и 2,6 г/см$^3$ для образца, синтезированного лазером.

Были выполнены эксперименты по формированию многослойной структуры и по имитации процесса сварки 2-х заранее синтезированных слоев карбида кремния путем спекания с помощью лазерного нагрева прослойки из шихты между ними. Электронный микроскоп показал весьма удовлетворительное и сопоставимое по качеству соединение нескольких поверхностей самосвязанного SiC. Тем самым продемонстрирована потенциальная возможность создания (внутри синтезируемых лазером областей) участков со сплошным каркасом из частиц первичного и вторичного карбида кремния не только внутри слоев, но и между ними. Применение лазера в технологии синтеза самосвязанного карбида кремния позволяет решать проблемы ликвидация трещин или соединения двух поверхностей самосвязанного SiC локально и достаточно быстро без нагрева всего остального изделия, что может быть очень важно при работе с емкостями, заполненными опасными или вредными веществами (Юрышев Н.Н., Вагин Н.П., Стародубцев Н.Ф., Лысенко С.А.).

### 3.2.6 Лаборатория применения лазеров (ЛПЛ)

До реорганизации ОКРФ в 2016 г. лаборатория, которой руководил лауреат Государственной премии СССР д.ф.-м.н., профессор А.З. Грасюк, проводила исследования по нелинейной оптике и созданию ВКР- лазеров, по эксимерным лазерам и по выбору оптических материалов для использования в технологии создания мощных лазеров.

В первые годы нового столетия в ЛПЛ созданы комбинационно-параметрические ВКР- лазеры на кристаллах и газовых средах с накачкой импульсами длительностью от 100 фс до 10 нс. В многочастотном комбинационно-параметрическом лазере на вращательных уровнях водорода получена генерация 15 комбинационных компонент со сравнимыми интенсивностями. Показано, что основными эффектами, ограничивающими число комбинационных компонент, является дифракция световых пучков и нелинейная отстройка от комбинационного резонанса (для фемтосекундной накачки). При неколлинеарной бигармонической накачке комбинационно-параметрического лазера на кристалле $KGd(WO_4)_2$ (КГВ) осуществлено преобразование с повышением частоты в первую антистоксову компоненту с рекордной энергетической эффективностью 4%.

Разработана схема генерации мощных пикосекундных световых импульсов в эксимерных лазерах. Схема основана на процессах ВКР-компрессии, четырехволновой комбинационно-параметрической генерации антистоксова излучения и насыщенного усиления в эксимерном электроразрядном усилителе. Получены импульсы на длине волны 248 нм длительностью 1 пс, энергией до 3 мДж, контрастом выше $10^9$ и с дифракционной расходимостью светового пучка.

Значительное внимание уделялось выбору оптических материалов – кристаллов и стёкол для использования в технологии создания мощных лазеров. У образцов современных высокочистых кристаллов $CaF_2$, $BaF_2$ и $Al_2O_3$ измерены коэффициенты двухфотонного поглощения на длинах волн 193 и 248 нм при длительностях импульсов 30 и 80 нс. На 193 нм они составили 2,2; 2,3 и 5,6 $см^{-1}$/ГВт,

а на 248 нм – менее 0,05; 0,5 и 2 $см^{-1}$/ГВт соответственно. Разработаны численные модели, на основе которых удалось объяснить механизмы повышения нелинейного поглощения УФ лазерного излучения в кристаллах фторидов щелочноземельных элементов для наносекундных и более длинных импульсов по сравнению с пикосекундными импульсами.

Изучено поведение поглощения в области 120-1000 нм у современных высокочистых образцов кристаллов $CaF_2$, $MgF_2$, $BaF_2$, $Al_2O_3$ и кварцевых стекол типа КУ-1 и КС-4В при их длительном облучении на воздухе электронным пучком с энергией электронов менее 280 кэВ. В течение двух лет образцы подверглись действию около $10^4$ импульсов, суммарная плотность энергии (флюенс) которых оставила ~20 $кДж/см^2$. Установлено, что после такого облучения у лейкосапфирового образца пропускание практически не изменилось. Наведенная оптическая плотность у $CaF_2$ и $BaF_2$ в области 200-1000 нм при этом составила 0,04-0,1. У образцов $MgF_2$ поглощение при облучении монотонно увеличивалось, и они полностью теряли свою прозрачность в области 260 нм уже при флюенсе около 500 $Дж/см^2$. Показано, что в исследованных кристаллах наводимое электронным пучком поглощение существенно зависит от их чистоты.

У кварцевых стекол наведенное поглощение с ростом флюенса выходит на насыщение, величина которого зависит от средней мощности облучения. При одинаковых условиях облучения поглощение у стекла КС-4В в 4 раза меньше, чем у КУ-1. Это указывает на перспективность использования нового российского «Особо чистого кварцевого стекла КС-4В» для изготовления окон мощных технологических эксимерных лазеров УФ диапазона. Полученные результаты можно использовать для оценки долговременной работоспособности проходной силовой оптики под действием лазерных излучения УФ и ВУФ диапазона, а также ионизирующих излучений, характерных для электронно-пучковых лазеров.

На исходе десятилетия установлено, что излучение KrF- и ArF-лазеров при интенсивностях около 5 $МВт/см^2$ уменьшает наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах в 1,5-2 раза. Это доказывает, что электронная и термическая “встряска“ радиационных дефектов стекол при поглощении кванта света ведет к ускорению их релаксационных процессов.

В начале второго десятилетия разработан новый способ частотного преобразования фемтосекундных лазерных импульсов на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Осуществлена генерация импульсов длительностью 72 фс на частоте первой стоксовой компоненты при ВКР в кристалле нитрата бария импульса излучения лазера на $Al2O3:Ti^{3+}$ длительностью 50 фс. Энергетическая эффективность преобразования составила 20%. Использовалась оптическая схема накачки кристалла нитрата бария двумя последовательными ортогонально поляризованными чирпированными импульсами с последующей временной компрессией импульса стоксова излучения.

Проведено экспериментальное исследование оптических схем генерации второй стоксовой компоненты при ВКР широкополосных чирпированных лазерных

импульсов в сжатых газах. Измерены энергетическая эффективность преобразования и пространственные характеристики светового пучка второй стоксовой компоненты при однократной и двукратной фокусировках излучения накачки в кювету с газом, а также в схемах с использованием кварцевого капилляра и двух газовых кювет. Максимальная эффективность преобразования во вторую стоксову компоненту достигается при каскадной генерации в оптической схеме с двумя кюветами со сжатыми газами. В такой схеме при ВКР в водороде излучение лазера на сапфире с титаном с длиной волны 0.79 мкм преобразовано во вторую стоксову компоненту с длиной волны 2.3 мкм с эффективностью 8,5%. Показана возможность получения мощных световых импульсов среднего ИК-диапазона с длительностью короче двух периодов световой волны. Показано, что применение двухимпульсной накачки ортогонально поляризованными чирпированными импульсами, а также использование программируемой акустооптической дисперсионной линии задержки позволяет получать импульсы стоксова излучения с длительностью, близкой к длительности импульса исходного лазерного излучения.

Исследован метод временной компрессии фемтосекундных лазерных импульсов на основе процесса уширения спектра при распространении импульса в газонаполненном капилляре. Проведен численный расчет временной компрессии чирпированного лазерного импульса при его распространении в плавленом кварце. Выведено соотношение между степенью компрессии и энергетической эффективностью компрессора. Показано, что максимальная степень компрессии достигается при энергетической эффективности 15 % – 30 %. Осуществлена 15-кратная компрессия лазерного импульса длительностью 290 фс с энергетической эффективностью 24 %. Исследован процесс нелинейного вращения эллипса поляризации лазерного излучения, протекающий одновременно с уширением спектра импульса при нелинейной фазовой самомодуляции в газонаполненном капилляре. Показано, что наибольшее вращение эллипса поляризации испытывают спектральные компоненты, смещенные в коротковолновую сторону относительно центральной длины волны исходного лазерного импульса. С использованием эффекта вращения эллипса поляризации осуществлено восьмикратное повышение энергетического контраста светового импульса длительностью 28 фс, полученного посредством компрессии импульса излучения иттербиевого лазера 290 фс.

В середине второго десятилетия в ЛПЛ изучено явление изменения спектров пропускания в области 380-800 нм у образцов двух политипов кристалла SiC (6H и 15R) при их облучении на воздухе импульсами электронного пучка длительностью 80 нс, с энергией электронов ~300 кэВ и плотностью энергии около 2 Дж/см$^2$. В конце облучения поглощенная доза в приповерхностной зоне толщиной 0,15 мм достигала 20 МГр.

В связи с реорганизацией ОКРФ лаборатория в 2016 г. прекратила исследования.

### 3.2.7 Лаборатория стандартов частоты (ЛСЧ)

До и после перевода лаборатории из ОКРФ в ТОП ФИАН (в 2018 г.) ею руководит лауреат Государственной премии РФ д.ф.-м.н. М.А. Губин (Рис. 3.11). В ЛСЧ продолжены работы по прецизионным оптическим измерениям, исследованиям возможностей повышения точности квантовых стандартов частоты, по разработке, созданию и применению высокостабильных лазеров, в том числе полупроводниковых.

Рис. 3.11. Сотрудники группы «Прецизионные измерения частоты» и Технопарка «Прецизионные оптические технологии» ТОП ФИАН, принимающие участие в создании высокостабильного «Метанового фотонного микроволнового генератора» со сверхнизким уровнем фазовых шумов на частотах 1 - 10 ГГц. Слева направо: Карпов Г.П., Шелковников А.С., Тюриков Д.А., Киреев А.Н., Губин М.А., Петровский М.В., Касьянов А.А., Кузьмич С.В. (стоят), Бобкова И.Р., Пазюк С.Е.

В первые годы нового столетия выполнен цикл работ по созданию диодных лазеров и их применению в квантовых стандартах частоты. В частности, показана принципиальная возможность создания компактного высококогерентного лазера, в котором согласование активной области лазера с модой типа шепчущей галереи кварцевой микросферы реализуется одним элементом - градиентной линзой со скошенной гранью. Этот элемент осуществляет и фокусировку излучения, и связь с модой шара методом нарушенного полного внутреннего отражения. Экспериментальная оценка степени сужения линии генерации по эффектам затягивания составила $10^3$ (Васильев В.В., Величанский В.Л.).

Создана первая в России магнито-оптическая ловушка (Саутенков В.А., Яровицкий А.В., Васильев В.В., Величанский В.Л., Зибров С.А.). Для охлаждения и

захвата атомов рубидия используется излучение перестраиваемых инжекционных лазеров с внешним резонатором. Реализована работа магнитооптической ловушки с обоими изотопами рубидия. Показано, что ловушка сохраняет работоспособность в широком интервале степени эллиптичности лазерного излучения. Проведено систематическое исследование факторов, определяющих контраст опорного резонанса, используемого для стабилизации частоты основного охлаждающего лазера. Вместо одного охлаждающего лазера используется система «задающий лазер - мощный ведомый лазер», работающий в режиме захвата. В результате мощность охлаждающего излучения возросла в 4 раза.

Совместно с Национальным Институтом Стандартов и Технологий (NIST, г. Боулдер, США) и Новосибирским Государственным Университетом выполнено исследование возможности создания миниатюрных атомных часов (стабильность $10^{-11}$ за сутки) на основе лямбда – резонанса в бихроматическом лазерном излучении. Для практической реализации мини часов в России продемонстрирована (совместно с ФГУП «Полюс») возможность замены инжекционные (диодных) лазеров, излучающих с поверхности, на лазеры, излучающие с края, с коротким резонатором и повышенными коэффициентами отражения зеркал резонатора (Каргопольцев С.В., Величанский В.Л.). Минимальный пороговый ток в этих лазерах составил 2 мА, что обеспечивает низкое энергопотребление разрабатываемых атомных мини-часов.

Проведено исследование эффективности заселения уровня $7P_{3/2}$ атомов цезия в двух схемах каскадной лазерной накачки $6S_{1/2}$-$6P_{3/2}$-$6D_{5/2}$-$7P_{3/2}$ и $6S_{1/2}$-$6P_{3/2}$-$8S1_{/2}$-$7P_{3/2}$, где первые два перехода происходят при поглощении лазерного излучения, а последний переход является спонтанным. Эффективность накачки исследовалась, как функция интенсивностей, поляризаций и частот двух основных и одного вспомогательного лазера для оптической накачки на уровень $6S_{1/2}$ (F=3). Зарегистрированы внутридоплеровские спектры поглощения лазеров, настроенных на переходы $6S_{1/2}$-$6P_{3/2}$ и $6P_{3/2}$-$8S_{1/2}$ при фиксированной частоте первого лазера и изменении частоты второго. Совместно с Новосибирским Государственным Университетом проведено сопоставление теоретических и экспериментальных внутри-доплеровских спектров для каскада $6S_{1/2}$-$6P_{3/2}$-$6D_{5/2}$. Установлено, что основной вклад в образование спектров дают двухфотонные переходы (Каргопольцев С.В., Величанский В.Л., Юдин В.И.).

Совместно с Гарвардским Университетом (г. Бостон, США) проводилось исследование возможности записи и воспроизведения квантовой информации в ансамблях атомов щелочных металлов. Совместно с NIST (г. Боулдер) и Техасским Университетом (г. Колледж Стэйшн, США) исследована невырожденная параметрическая генерация в среде высоковозбужденных атомов. Генерация получена при каскадном возбуждении атомов рубидия в сонаправленных пучках двух лазеров, возбуждающих переходы $5S_{1/2}$-$5P_{3/2}$ и $5P_{3/2}$ -$5D_{5/2}$ . Генерация наблюдалась на смежных переходах $5D_{5/2}$ - $6P_{3/2}$ и $6P_{3/2}$ - $5S_{1/2}$. Совместно с Техасским Университетом проведено также исследование: магнитооптических эффектов, обусловленных проявлением атомной когерентности в оптически плотных средах (в

частности, влияния динамического эффекта Штарка на нелинейный фарадеевский эффект) и групповой скорости в плотных атомных средах в условиях когерентного пленения населенностей. Совместно с 13-ым Университетом Парижа проведено исследование Ван-дер Ваальсовского взаимодействия методом селективного зеркального отражения (Зибров А.С., Саутенков В.А, Зибров С.А., Величанский В.Л., Яровицкий А.В.).

Проведен цикл работ по исследованию и оптимизации характеристик резонанса когерентного пленения населенностей в атомах $^{87}$Rb (Зибров С.А., Васьковская М.И., Чучелов Д.С., Цыганков Е.А., Величанский В.Л., Васильев В.В.). Изучены модуляционные спектры лазеров, излучающих с поверхности в СВЧ диапазоне (Зибров С.А., Васьковская М.И., Чучелов Д.С., Богатов А.П., Дракин А.Е., Васильев В.В., Величанский В.Л.). Выполнены работы по регистрации уединенного магнитного резонанса в атомах $^{87}$Rb и исследованию его характеристик (Зибров С.А., Цыганков Е.А., Васьковская М.И., Чучелов Д.С., Богатов А.П., Дракин А.Е., Васильев В.В., Величанский В.Л.– Рис. 3.12).

Рис. 3.12. В.Л. Величанский (на переднем плане) с молодыми сотрудниками, аспирантами и студентами

В эти же годы в ЛСЧ выполнена разработка принципов и методов создания эквидистантной сетки частот в инфракрасном и оптическом диапазонах с предельно низким уровнем частотных и фазовых шумов. В частности, разработаны схемы стабилизации фемтосекундного оптического синтезатора частот по компактному метановому стандарту частоты с точностью и стабильностью $10^{-14} – 10^{-15}$. Одна из схем основана на генерации суммарной частоты метанового стандарта с гетеродинным лазером (Nd:YAG), частота которого лежит в области, перекрываемой гребенкой частот фемтосекундного оптического синтезатора на основе Ti:Sa лазера. Получена генерация суперконтинуума в дырчатых (микроструктурированных) волокнах под действием излучения непрерывного фемтосекундного лазера на кристалле Ti:сапфир. Диапазон перекрываемый фемтосекундной «гребенкой» оптических излучателей с частотным интервалом 85 МГц составил более октавы (1,1 - 0,5) мкм (Крюков П.Г., Левченко А.Е., Белов А.В., Киреев А.Н., Конященко А.В., Шарков А.В., Губин М.А., Воробьев И.Л., Иванов Г.А., Чаморовский Ю.К.).

В 2004 г. были начаты работы по созданию компактных оптических часов и высокостабильных задающих генераторов СВЧ диапазона. В частности, совместно с американскими научными центрами – NIST и MIT были реализованы фемтосекундные оптические часы (и высокостабильный задающий генератор СВЧ диапазона) на основе компактного метанового оптического стандарта и фемтосекундного Ti:Sa лазера методом генерации разностной частоты 3390 нм между компонентами фемтосекундной гребёнки в нелинейном кристалле. Получена стабильность микроволновой частоты $\sim 1 \times 10^{-14}$ при времени усреднения 100 сек. При отстройке от несущей 1 Гц уровень фазовых шумов метанового оптического стандарта на 30-40 dB ниже шумов лучших коммерческих СВЧ генераторов (приведено к частоте 1 ГГц).

В 2008г. для перехода на отечественные технологии при создании надежных делителей оптических частот был разработан, совместно с НЦВО при ИОФАН, компактный фемтосекундный волоконный лазер ($\lambda$=1540 нм) для фемтосекундной метрологии. Получен спектр суперконтинуума с шириной, достаточной для стабилизации его параметров по метановому стандарту частоты и для дальнейшего использования в качестве переносчика частоты в СВЧ диапазон, а также для создания синтезатора оптических частот в ближнем (1100 – 2100 нм) ИК- диапазоне (Киреев А.Н., Конященко А.В., Крюков П.Г., Таусенев А.В., Тюриков Д.А., Шелковников А.С.).

В 2011 г. совместно с промышленным предприятием разработаны и изготовлены первые действующие образцы уникального моноблочного He-Ne/$CH_4$ стандарта частоты на 3390 нм, пассивная стабильность резонатора в котором повышена на 2 порядка. Получены сигналы реперных спектральных линий молекулы метана с относительной шириной $10^{-9}$ и рекордным отношением сигнал/шум (Шелковников А.С., Киреев А.Н., Тюриков Д.А.).

По тому же направлению выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований величины частотных сдвигов в $HeNe/CH_4$ оптическом стандарте частоты, вызванных изменением фазы и формы пространственного распределения лазерных полей в резонаторе и интерференцией слабых отражений (рассеяний) волн ортогональных поляризаций от элементов резонатора.

Полученные результаты соответствовали мировому уровню и доказывали реальность создания аппаратуры и методов, обеспечивающих относительную стабильность квантовых стандартов частоты на газовых ячейках $10^{-14}$-$10^{-15}$, при погрешности переноса стабильности из оптического в СВЧ диапазон $10^{-16}$ -$10^{-17}$.

Результаты предлагалось использовать:

- в фундаментальной метрологии, в частности, в Институте метрологии времени и пространства ФГУП ВНИИФТРИ (пос. Менделеево Московской обл.) в новом Государственном эталоне времени и частоты на «фонтане» атомов цезия;
- для повышения на 1-2 порядка (до $10^{-14}$…$10^{-15}$) кратковременной стабильности (время усреднения 1 с) частоты источников СВЧ излучения и применения в контрольно –измерительной аппаратуре, калибровке и настройке перспективных радиотехнических систем;
- для фундаментальной спектроскопии путем реализации эквидистантной сетки гармонических компонент от УФ до ближнего ИК диапазона с шириной спектра излучения компонент около 1 Гц.

Показано, что при использовании разработанного в ФИАН оптико-микроволнового задающего генератора возможно радикальное (на порядок) сокращение времени выхода эталона на номинальную точность (~ $1\cdot10^{-16}$). Создаваемый генератор в значительной степени способен заменить созданные за рубежом дорогостоящие и громоздкие криогенные СВЧ генераторы, работающие при жидком гелии.

В начале второго десятилетия в ЛСЧ совместно с Лабораторией химических лазеров ОКРФ (Фролов М.П., Подмарьков Ю.П.), Лабораторией лазеров с катодно-лучевой накачкой НФО ФИАН (Козловский В.И., Коростелин Ю.В.) и молодыми сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана (Лазарев В.А., Пнев А.Б.) был создан непрерывный лазер на кристалле $Cr^{2+}$:ZnSe с оптической накачкой, перестраиваемый в области 2,3 – 2,6 мкм и работающий в режиме генерации двух аксиальных мод. Показано, что минимальная спектральная плотность шумов частоты лазера составляет не более 0,03 Гц/Гц$^{½}$. Применение такого лазера в задачах допплеровской и внутри-допплеровской спектроскопии позволяет детектировать спектральные линии поглощения газов с чувствительностью $5\cdot10^{-12}$ см$^{-1}$ и $2\cdot10^{-10}$ см$^{-1}$ соответственно (время усреднения $\tau$ = 1 с).

Непрерывный твердотельный $Cr^{2+}$:ZnSe лазер был применен для внутридопплеровской спектроскопии линий колебательно-вращательной полосы ($\nu_1+\nu_4$) метана. Зарегистрированы резонансы насыщенной дисперсии на компонентах линии R(2) в области 2.36 мкм. Параметры резонанса насыщенной дисперсии, полученные при охлаждении внутрирезонаторной метановой ячейки до

T = 77K подтвердили перспективность разработки на основе $Cr^{2+}$:ZnSe/$CH_4$ лазера оптического задающего генератора с высокой кратковременной стабильностью частоты (~$10^{-16}$ ) при времени усреднения 1 с (Киреев А.Н., Фролов М.П., Подмарьков Ю.П., Шелковников А.С., Тюриков Д.А., Лазарев В.А., Тарабрин М.К.).

В эти же годы в ЛСЧ создан вариант высокотехнологичного перестраиваемого диодного лазера с внешним резонатором, который стал активно применяться в научной работе ЛСЧ и во многих научных и учебных лабораториях в России и за рубежом. Кроме того, создан макет энергоэффективного лазерного магнитометра на атомах цезия (в ноябре 2013 года проведены успешные приемо-сдаточные испытания). Создана поверочная установка для испытаний и калибровки магнитометра в диапазоне земных магнитных полей (установка находится в павильоне ИЗМИРАН, г. Троицк).

В середине второго десятилетия в ЛСЧ впервые в России создана технология и получены первые образцы квантовых дискриминаторов на основе атомов щелочных металлов для малогабаритных атомных часов (МАЧ), имеющих широкий спектр научных и практических применений. С целью наполнения и герметизации ячеек с изотопом $^{87}$Rb для МАЧ создана конструкция и изготовлены узлы вакуумной установки. Найдены области параметров, обеспечивающих минимальный температурный сдвиг частоты макетов МАЧ при относительной нестабильности частоты $10^{-10}$ – $10^{-11}$ и времени усреднения 0,1–1000 с.

Доказана возможность регистрации уединенной, симметричной линии магнитного резонанса в атомах $^{87}$Rb при детектировании сигнала линейно поляризованным лазерным излучением на удвоенной частоте модуляции магнитного поля. Полученный результат важен для применений в квантовой магнитометрии, поскольку позволяет уменьшить ориентационную ошибку и повысить чувствительность к вариациям земного магнитного поля по сравнению с подобными характеристиками наиболее распространенных цезиевых магнитометров.

В середине второго десятилетия создана установка для измерения характеристик ядерного магнитного резонанса на изотопах $^{129}$Xe, $^{131}$Xe в сферических ячейках диаметром 20 мм. Систематическое исследование влияния технологии производства заготовок, их заполнения ксеноном и азотом позволило получить ячейки с заданными параметрами по сигналам ЯМР и временам жизни поляризации рабочих изотопов ксенона. Совместно с ООО «Атомикс» создана установка для изготовления малогабаритных ячеек кубической формы с ребром 6 мм, наполняемых изотопами 129Xe, 131Xe и азотом. На таких ячейках проведено исследование характеристик ядерного магнитного резонанса (амплитуды сигнала и времени затухания свободной прецессии) на изотопах ксенона. Полученные характеристики подтверждены независимой экспертизой, проведенной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Ячейки успешно сданы заказчику - АО «Концерну ЦНИИ» Электроприбор».

По заказу ОАО «РТИ» совместно с ООО «Новые Энергетические Технологии» и НИЯУ «МИФИ» выполнена опытно-конструкторская работа «Устройства временного и частотного обеспечения на основе малогабаритных атомных квантовых стандартов частоты». Требуемая долговременная стабильность достигнута благодаря разработанным методам подавления температурных и световых сдвигов. Создан макет атомных часов на основе когерентного пленения населенностей со стабильностью (среднеквадратичным относительным отклонением) частоты 10 МГц: $1{,}7 \cdot 10^{-11}$; $2{,}5 \cdot 10^{-12}$; $1{,}9 \cdot 10^{-12}$ при временах измерения 1, 100 и 1000 секунд, соответственно. Стабильность за 1 час и 1 сутки составила $1{,}3 \cdot 10^{-12}$ и $2{,}4 \cdot 10^{-12}$. Интерфейс прибора обеспечивает синхронизацию часов по сигналу ГЛОНАСС, генерацию дополнительных частот (5 МГц и 100 МГц) и выдает шкалу времени в нескольких форматах.

В достижение результатов внесли вклад основные исполнители Зибров С.А., Цыганков Е.А., Васьковская М.И., Чучелов Д.С., Васильев В.В., Величанский В.Л.

Для прецизионных измерений частот оптического и радио диапазонов был разработан малошумящий делитель оптической частоты в СВЧ диапазон спектра на основе фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера. Источником оптического сигнала служил He-Ne/$CH_4$ стандарт частоты. Сравнение двух фемтосекундных делителей показало, что нестабильность выходных СВЧ сигналов, вносимая делителями, составляет $10^{-14}$ - $10^{-16}$ для времен усреднения $\tau = 1$ - 100 с, что соответствует требованиям, предъявляемым к генераторам опросного сигнала в эталонах времени и частоты на основе «фонтана» атомов Cs и Rb.

В 2017 г. созданный макет транспортируемого «фотонного» задающего генератора на основе метанового моноблочного оптического стандарта частоты и фемтосекундного делителя оптической частоты был доставлен во ФГУП ВНИИФТРИ и исследован на аппаратуре Государственной. службы времени и частоты РФ. Сравнение сигналов генератора и двух активных водородных мазеров с повышенной кратковременной стабильностью частоты показало, что кратковременная стабильность «фотонного» задающего генератора на частоте 1,5 ГГц составляет $1 \cdot 10^{-14}$ (для $\tau = 1$ с). На выходной частоте 100 МГц кратковременная стабильность генератора из-за влияния имевшейся электроники была в три раза меньше, тем не менее, она значительно превышала стабильность частоты водородных мазеров, используемых в настоящее время в качестве опорных генераторов на Гос. эталоне времени и частоты.

Далее указаны результаты, достигнутые в Лаборатории стандартов частоты уже после её перевода в 2018 г. из ОКРФ в ТОП ФИАН.

В 2018-2021 гг. продолжались работы по совершенствованию «фотонного» (радио-оптического) задающего генератора на основе He-Ne/$CH_4$ оптического стандарта частоты (ОСЧ, $\lambda = 3.39$ мкм) и фемтосекундного волоконного эрбиевого ($\lambda = 1.55$ мкм) делителя оптических частот (ДОЧ), в которых участвовали Шелковников А.С., Киреев А.Н., Таусенев А.В., Тюриков Д.А., Петровский М.В. Результаты этих работ следующие:

- в делителе оптических частот снижена собственная нестабильность частоты до уровня, не превышающего $5\times10^{-15}$ (время усреднения 1 с) и продемонстрирована устойчивая суточная работа ДОЧ без сбоев частоты;

- разработан транспортируемый вариант фотонного микроволнового генератора, излучающего гребенку частот в диапазоне 1-10 ГГц с частотной нестабильностью компонент менее $1\times10^{-14}$ на временах усреднения $\tau$ = 1-1000 с. На интервале времен усреднения $\tau$ = 1-200 с нестабильность выходных частот ниже, чем у лучших водородных мазеров (100 МГц);

- на малых отстройках от несущей спектральная плотность мощности фазовых шумов выходных СВЧ сигналов в области 1-10 ГГц на 20-40 дБн/Гц ниже, чем у лучших электронных и оптоэлектронных генераторов.

Для расширения области применений высокостабильных фотонных микроволновых генераторов были проведены совместные эксперименты на радиотелескопах Института прикладной астрономии РАН (ИПА РАН), входящих в российскую систему радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). Экспериментально была доказана перспективность использования генератора пикосекундных импульсов на основе фемтосекундного лазера со стабилизированной частотой следования импульсов для фазовой калибровки приемного тракта радиотелескопов. Достигнутая чувствительность контроля временной задержки при передаче калибровочных импульсов от стандарта частоты к приемной системе радиотелескопа составила ~50 фс (при времени усреднения 1с). Отметим, что система РСДБ служит для высокоточного определения параметров вращения Земли и обеспечивает связь наземной и спутниковой систем координат для ГЛОНАСС.

Уровень разработок и результаты, полученные по прецизионным измерениям частоты, соответствуют требованиям развития частотно-временной метрологии, суб-ТГц систем связи, радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и других радиотехнических систем.

В 2018 г. разработана теория модуляционной спектроскопии резонансов когерентного пленения населенности (КПН). Получены аналитические выражения для амплитуд синфазной и квадратурной компоненты в сигнале поглощения лазерного излучения на частоте $\omega_m$, используемые для формирования обратной связи и стабилизации частоты атомных часов. Теория обобщена на случай оптически толстой среды и полихроматического излучения с произвольным набором амплитуд. Результаты согласуются как с численным решением исходных уравнений для матрицы плотности, так и с экспериментальными данными по модуляционной спектроскопии резонансов КПН в атомах $^{87}$Rb. Проведенные работы по теории модуляционных характеристик эффекта когерентного пленения, совершенствованию технологии изготовления резонансных ячеек, оптимизации их заполнения и рабочих режимов позволят улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики малогабаритных атомных КПН-часов. Разработаны новые методы заполнения щелочным металлом и буферными газами и

герметизации атомных ячеек. Проведена оптимизация параметров заполнения буферными газами и рабочей температуры ячеек.

В 2019 г. исследовано влияние давления буферного газа в ячейках стандарта частоты на основе когерентного пленения населенностей (КПН) на возможность подавления светового сдвига частоты опорного резонанса. Показано, что с ростом давления буферных газов возможность подавления сдвига (за счет создания сбалансированного спектра излучения диодного лазера при модуляции его тока накачки) уменьшается и при превышении некоторого критического значения давления становится невозможной.

Одним из основных методов стабилизации частоты в стандартах является метод экстремального регулирования. В этом методе асимметрия опорного резонанса ухудшает стабильность. В малогабаритном КПН стандарте частоты асимметрия реперной линии возникает из-за неравенства резонансных компонент лазерного излучения, которое трудно устранимо из-за нелинейного взаимодействия полей в лазере. Экспериментально реализован метод стабилизации частоты, предложенный теоретиками Института лазерной физики СОРАН, в котором асимметрия резонанса не вызывает сдвига стабилизируемой частоты. Метод основан на модуляции разности фаз резонансных компонент бихроматического излучения.

В 2020 г. разработана теоретическая модель, описывающая характеристики резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) с учетом таких параметров, как сверхтонкая структура возбужденного состояния атома, оптическая толщина атомного слоя, структура реальных модуляционных спектров лазера. Предложенная модель достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

Предложен новый метод формирования сигнала ошибки, нечувствительный к сдвигу частоты, вызванному асимметрией КПН резонанса. Используется импульсная модуляция фазы СВЧ поля вместо традиционной гармонической модуляции частоты СВЧ поля. В отличие от традиционного метода, стабилизация с помощью фазовых скачков происходит в точке, соответствующей вершине резонанса вне зависимости от модуляционных параметров. Дополнительным преимуществом предложенного метода является увеличение крутизны сигнала ошибки на 30 %.

В 2021 г. исследована зависимость частоты КПН резонанса от величины приложенного магнитного поля для двух ортогональных циркулярных поляризаций излучения. Получено, что линейный отклик частоты резонанса на флуктуации магнитного поля может быть подавлен при определенной комбинации магнитного поля (его направления и величины) и поляризации излучения.

Выполнен анализ структуры сдвигов частоты синфазного и квадратурного сигналов, используемых в обратной связи для стабилизации частоты генератора по вершине резонанса когерентного пленения населенностей. Установлено, что в случае асимметричного резонанса сигналы приобретают сдвиг частоты, который более сложным образом зависит от интенсивности, чем световой сдвиг. Предложен метод повышения крутизны сигнала ошибки при регистрации магнитного резонанса

импульсно-модулированным РЧ полем. Метод основан на регистрации изменения суммы амплитуд спектральных компонент сигнала пропускания атомной ячейки при изменении величины внешнего магнитного поля.

В достижение результатов внесли вклад основные исполнители Зибров С.А., Цыганков Е.А., Васьковская М.И., Чучелов Д.С., Васильев В.В., Величанский В.Л.

### 3.2.8 Лаборатория фотоники молекул (ЛФМ)

В 2012 г. заведующий лабораторией академик Н.А. Борисевич уехал в Белоруссию, и лабораторию возглавил к.ф.-м.н. В.А. Петухов (Рис. 3.13).

Основным направлением деятельности лаборатории являлась спектроскопия высокого разрешения сложных молекул, охлажденных в сверхзвуковой струе. Параллельно развивались и другие направления: генерация ультракоротких лазерных импульсов и импульсов сложной временной формы с помощью оптоэлектронных обратных связей, а также изучение особенностей распространения света в тонких пленках.

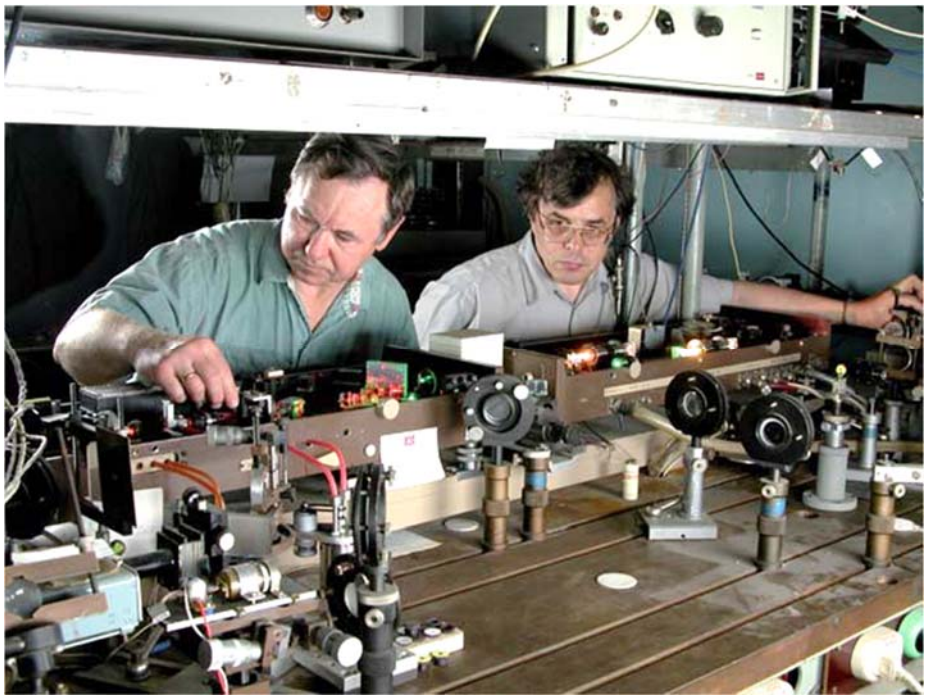


Рис. 3.13. В.А. Петухов (слева) и М.А. Семёнов на установке.

В начале первого десятилетия Горбунковым М.В, предложен и реализован метод пассивной синхронизации мод твердотельных лазеров с помощью оптоэлектронных обратных связей без использования нелинейных элементов типа пассивных затворов, керровских линз или нелинейных зеркал. а также способ генерации высокоэнергетичных моноимпульсов микросекундного диапазона при помощи внешней задержанной положительной обратной связи. Получены импульсы, превосходящие по энергии моноимпульс свободной генерации в десятки раз при максимальной длительности 20 мкс.

С помощью обратных связей и внутрирезонаторного удвоения частоты реализован режим генерации длинных (до нескольких микросекунд) цугов пикосекундных импульсов со стабилизированной амплитудой ультракоротких импульсов. Исследована динамика лазера, управляемого двумя цепями внешней обратной связи. Для комбинации двух отрицательных обратных связей продемонстрировано управление хаотическим режимом генерации. В случае комбинации отрицательной и положительной обратных связей, когда отрицательная обратная связь задержана на один проход резонатора, а положительная на два, продемонстрирован необычно широкий диапазон усиления, при котором сохраняется стабильность генерации. В режиме самосинхронизации мод комбинация отрицательной и положительной обратных связей обеспечивает существенное (более чем в 3 раза для ИАГ) сокращение длительности за счет более острой временной зависимости внутрирезонаторных потерь. Также Горбунковым М.В. с сотрудниками обнаружен и исследован эффект влияния синхронизации поперечных мод на порог генерации лазеров, найдены конфигурации резонаторов, т.н. «критические конфигурации», обеспечивающие минимальный порог.

Обнаруженный ранее эффект нелинейной стабилизации без уширения импульсов лазерного излучения при генерации второй гармоники был использован для увеличения длительности огибающей ультракоротких импульсов пикосекундного ИАГ лазера. Излучение на частоте второй гармоники состояло более чем из 8 импульсов почти одинаковой амплитуды и длительностью менее 25 пс. Это излучение использовалось для синхронной накачки перестраиваемого лазера на красителе.

Экспериментально исследованы особенности синхронизации продольных мод в лазерах на Nd-активированных кристаллах, керамике и стеклах с учетом синхронизации поперечных мод. За счет выбора длины резонатора, обеспечивающего одинаковые пороги для двух разных длин волн, реализован двухволновый Nd:YLF лазер, генерирующий одновременно на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм. Излучение этого лазера использовалось для генерации разностной частоты 1,63 ТГц в нелинейном кристалле GaSe.

В конце десятилетия разработана оригинальная архитектура лазерно-электронных рентгеновских источников на Томсоновском рассеянии, которые заполняют пробел между рентгеновскими трубками и источниками синхротронного излучения. Возможные применения Томсоновского источника рентгеновского излучения: XAFS-спектроскопия, ангиография животных небольшого размера, неинвазивная коронарная ангиография у людей. При этом предложен способ формирования излучения задающего генератора оптической системы, обеспечивающий повышенную воспроизводимость и амплитудную стабильность цугов коротких импульсов за счет комбинации положительной и отрицательной обратных связей. Численное моделирование с учетом тонкой временной структуры показало, что использование оптоэлектронной обратной связи при высокочастотной модуляции внутрирезонаторных потерь (5 ГГц, используемые в ускорителях)

позволяет сократить длительность одиночного на аксиальном интервале синхронизированного с ускорительной системой импульса Nd:YLF лазера до требуемых 15 пс (Горбунков М.В.).

Изучены спектрально-люминесцентные характеристики красителей красного диапазона спектра – DCM и родственных соединений в полимерных матрицах разного состава и установлены зависимости спектральных характеристик от структуры красителей, и полимеров. Исследовано нелинейное поглощение лазерного излучения на длине волны 532 нм фталоцианинами цинка (PcZn) и свинца (PcPb), а также порфирином цинка (PrZn), находящимися в твердой композитной матрице нанопористое стекло — полимер, при наносекундной длительности лазерного импульса. Показано, что композитная матрица, активированная органическими соединениями, пригодна для разработки нелинейных оптических элементов типа лимитеров излучения. (Петухов В.А.).

В середине второго десятилетия в ЛФМ исследованы лазерные характеристики большого количества (более сотни) новых впервые синтезированных красителей при накачке 2-й и 3-й гармониками неодимового лазера. Некоторые из этих веществ не уступают по эффективности лучшим известным красителям, превосходя их по ширине области перестройки. Проведен отбор веществ, подходящих для накачки полупроводниковыми лазерами. (Петухов В.А., Бурдукова О.А., Семенов М.А.).

Исследована генерационная способность ряда лазерных красителей при импульсной продольной и поперечной накачке голубыми и зелеными полупроводниковыми лазерами. Достигнута генерация вынужденного излучения на растворах 14 красителей в зеленой и красной областях спектра. При накачке ряда красителей, относящихся к классам родаминов и пиррометенов, получена перестройка длины волны генерации лазера на красителе в диапазоне 537-672 нм. На двух красителях (ДЦМ и кумарин 540А) получены дифференциальные КПД более 17%, а реальный КПД превысил 12%, что является наивысшим достижением для лазеров на красителях, накачиваемых полупроводниковыми лазерами. Таким образом, показано, что при диодной накачке можно получать энергетическую эффективность, сравнимую с эффективностью лазеров, накачиваемых гораздо более мощными и дорогими лазерами. (Петухов В.А., Бурдукова О.А., Семенов М.А.)

В 2018-20 г.г. проведены исследования ряда материалов в виде плотных смесей жидкостей и твердотельных микрочастиц для применения в лазерах. Осуществлена генерация направленного низкокогерентного вынужденного излучения в плотной смеси микрочастиц кристалла LiF и иммерсионной жидкости в кювете с красителем PM567. Получены импульсы излучения (20 нс, 0,7 мДж) в спектральной области около 0,57мкм с регулируемой пространственной когерентностью и видностью интерференционной картины в схеме Юнга $\gamma$ = 0,3-0,02. Генераторы данного типа могут использоваться в лазерных системах для формирования сглаженного (без спеклов) профиля интенсивности излучения на мишенях и экранах лазерных проекторов. Определены составы смесей для

использования в качестве диффузоров с малоугловым рассеянием излучения. (Сенатский Ю.В., Бурдукова О.А., Петухов В.А.).

В 2021 г. предложена концепция режима гармонической самосинхронизации мод (ГССМ), реализуемой с помощью электрооптической обратной связи в твердотельном лазере. Такой режим работы с эквидистантными импульсами, циркулирующими в резонаторе лазера, осуществляется за счет выбора задержки в цепи отрицательной обратной связи. Получены аналитические выражения для необходимой временной задержки в цепи обратной связи и длительности импульса в зависимости от параметров лазера. С помощью численного моделирования проведены оценки времени установления процесса ГССМ, длительности импульсов и предельные значения усиления, допускающие отсутствие модуляции огибающей для широко используемых Nd и Yb активных сред. Надежность, высокий предельный коэффициент усиления и низкая чувствительность к уровню усиления делает лазер ГССМ привлекательной платформой для проектирования будущего поколения многосгустковых фотоинжекторов. (Горбунков М.В.).

### 3.2.9 Лаборатория лазерной хирургии (ЛЛХ)

В ЛЛХ, руководимой до реорганизации ОКРФ в 2016 г. д.ф.-м.н. Амбарцумяном Р.В., были продолжены исследования методов лазерной терапии и механизмов влияния лазерного излучения на биообъекты, включая кровь и ткани человека, а также работы по созданию новых лазеров для медицины.

В первые два года нового столетия экспериментами Захарова С.Д. подтверждён первичный механизм терапевтического действия оптического излучения через фотогенерацию синглетного кислорода в крови больных, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями. Полученные результаты позволяли врачам обосновано выбирать спектральные и энергетические параметры лечебного воздействия света. По программе выполнения проекта МНТЦ создана лазерная установка для получения высоких концентраций синглетного кислорода в биологических объектах.

Получена зависимость выживания ***E-coli*** от дозы лазерного излучения. Экспериментально показано, что облучение ***E-coli*** различных линий, находящихся в фазе линейного роста, дозой 2-4 Дж/см$^2$ на длине волны 1,27 мкм приводит к 50 % гибели клеток, в то время как облучение покоящихся клеток не приводит к их гибели даже при 100 кратном превышении указанной дозы. Получен спектр действия излучения, вызывающего гибель клеток, который идентифицирован и отождествлен со спектром перехода молекулярного кислорода в синглетное состояние.

Совместно с НИИ педиатрии и детской хирургии Минздрава РФ Амбарцумяном Р.В. проведены исследования взаимодействия лазерного излучения с биологическими молекулами и, в частности с сывороточным альбумином человека. Обнаружено селективное по длинам волн влияние лазерного излучения на реакцию присоединения флуоресцентного зонда К-35 к альбумину, выделенному из крови больных. Методом флуоресцентных зондов экспериментально показано, что

при облучении альбумина даже вне полосы основного электронного поглощения происходят конформационные переходы, тип которых зависит от начального состояния молекул. Предложены две модели происходящих процессов, вызывающих наблюдаемые явления. В результате этих исследований разработан альбуминовый тест, позволяющий определить тип лазера и дозировку излучения для индивидуальных пациентов. С его помощью стало возможным с вероятностью 90-95% прогнозировать результаты лазерной терапии.

В этом же НИИ проходило тестирование совместно разработанного метода определения дозы при лазерной терапии и длительности курса терапии, необходимой для индивидуального больного. Тест основан на измерении связывающей способности сывороточного альбумина, и в частности со специфическим красителем К-35 (до сего времени доза облучения определялась на основе статистики). Кроме того, в НИИ ведётся определение коэффициента корреляции показаний альбуминового теста с результатами биохимических анализов и клинических данных. Уже можно утверждать, что этот коэффициент заведомо превышает 0.85, что указывает на работоспособность и перспективность метода, область нозологии и пр. Тест был успешно применен более чем к 600 больным. Подготовлены методические указания для утверждения в Минздраве РФ.

В большом цикле экспериментальных исследований Захаровым С.Д. обнаружено явление активирования биологических систем малыми дозами оптического излучения (светокислородный эффект) и канал информационного обмена между клетками и растворенными белками (гидроконформационное взаимодействие). Прямым экспериментом показано, что активированные белки запускают активацию клеток. Процесс идёт по следующей схеме: $h\nu + {}^3O_2 \rightarrow {}^1O_2$; ${}^1O_2$ + спиновая подсистема $\rightarrow {}^3O_2$ + (спиновая подсистема)*; (спиновая подсистема)* + (клетки) $\rightarrow$ (спиновая подсистема)** + (клетки)*. Несмотря на то, что для молекулы кислорода соответствующие переходы запрещены по спину и симметрии, светокислородная активация оказывается возможной благодаря уникальной магнитной активности исходной триплетной молекулы ${}^3O_2$. Оптимальная для этого доза молекул синглетного кислорода ${}^1O_2$ в широких пределах не зависит от объема и концентрации клеток в системе. Светокислородный эффект может быть использован для интенсификации биохимических процессов в различных областях биомедицинских технологий.

На рубеже первого и второго десятилетий предложена и предварительными экспериментами подтверждена модель физических процессов при воздействии миллиметровых волн на биологические объекты. Согласно модели все биологические эффекты вызываются оптическими переходами в ближнем ИК диапазоне в растворенном молекулярном кислороде с образованием синглетного состояния. Роль миллиметрового облучения заключается в снятии запрета по спину при этих переходах. Исследована зависимость степени подавления опухолевого роста от интенсивноси лазерных импульсов на длине волны 1270 нм. Обнаружено, что чем выше доза излучения, тем сильнее подавление. Однако, в области от 0 до

100 Дж / кв. см зависимость степени подавления опухолевого роста от дозы имеет сложный характер, причём имеется оптимальная интенсивность, при которой подавление максимально.

В середине второго десятилетия лабораторией (Захаров С.Д.) введено новое понятие “спектрального” загрязнения среды обитания, приводящего к увеличению частоты системных заболеваний и связанного с непланковским спектром излучения большинства современных источников освещения. Отсутствие инфракрасной компоненты приводит к резкому уменьшению числа генерируемых окси-радикалов – основного элемента иммунной системы. Предложены методы преодоления последствий действия такого загрязнения.

Экспериментально исследована реакция опухолевых тканей на лазерное облучение на длине 1268 нм, которое осуществляет фотовозбужение молекулярного кислорода. Обнаружено, что при малых интенсивностях (до 100 Вт в импульсном режиме и до 140 мВт средней мощности) облучение приводит к отеку только опухолевых клеток, не затрагивая окружающие здоровые ткани. Коэффициент селективности оценивается 20-30 единиц, то есть является весьма большим. Предложена модель процессов, обеспечивающих столь высокую селективность реакции опухолевых тканей иммунной системой.

Предложен молекулярный механизм возникновения селективности взаимодействия лазерного излучения с солидными опухолями. На основании этой модели предложен способ увеличения эффективности воздействия излучения на опухоли и осуществлено селективное воздействие излучения с длиной волны 1268 нм на солидные опухоли. Достигнуто усиление иммунного ответа физическими методами. На этой основе разработана схема использования лазерного излучения для профилактики онкологических заболеваний. Предложены лазерные процедуры для резкого уменьшения риска развития болезней, включающие: а) внутривенное облучение крови на длине волны 1268 нм для лиц с плохой онконаследственностью с целью уменьшения количества циркулирующих в крови раковых клеток; б) профилактическое облучение тумерофильных областей организма для предотвращения анкоринга циркулирующих в крови раковых клеток.

В конце второго десятилетия развит новый подход в области онкологии, рассматривающий раковые заболевания как болезнь иммунной системы, а точнее – дисфункцию её терминальной фазы. На основании такого подхода предложены методы коррекции состояния иммунной системы с целью не допуска бластогенеза. Предложена схема молекулярных процессов, происходящих при низкодозовой рентгено-терапии онкологических заболеваний, обеспечивающая высокую селективность воздействия на опухоли. Предложено использование такого типа облучения в профилактических целях, а также рассмотрены варианты, исключающие использование рентгеновского облучения.

Показано, как наблюдаемое экспериментально подавление инфекционной активности вируса табачной мозаики при воздействии малоинтенсивного

микроволнового излучения может быть объяснено в рамках классической макроскопической электродинамики.

### 3.2.10 Лаборатория рентгеновской оптики (ЛРО)

Лаборатория образована в 2004 г. и с тех пор. обязанности заведующего ЛРО исполняет к.ф.-м.н. Артюков И.А.

Лаборатория работает над решением актуальных теоретических и практических задач, связанных с разработкой и применением различных рентгенооптических и рентгенотехнических систем в медицине, биологии, материаловедении, интроскопии и нанотехнологии. Обеспечивая необходимую теоретическую поддержку в планировании и проведении экспериментов, а также в обработке полученных данных, лаборатория работает в тесном сотрудничестве с многими экспериментальными группами российских и иностранных научных организаций.

В прошлом веке сотрудниками лаборатории первыми в стране и одними из первых в мире начаты работы по разработке многослойных рентгеновских зеркал. В сотрудничестве с Харьковским Политехническим институтом (ХПИ) были созданы различные многослойные зеркала и зеркальные объективы для рентгеновского и ВУФ спектральных диапазонов на рабочие длины волн от 0,01 нм до 100 нм (Виноградов А.В., Артюков И.А.). В настоящее время многослойная рентгеновская оптика производства «ФИАН-ХПИ» успешно применяется для проведения научных экспериментов во многих лабораториях США, Японии, Италии, Израиля, Швеции и др. стран.

Среди наиболее важных и приоритетных достижений лаборатории многослойной рентгеновской оптике особенно следует отметить следующие разработки.

Впервые в мире был создан рентгеновский микроскоп на основе объектива Шварцшильда с пространственным разрешением 100 нм на длине волны 18,5 нм (т.н. диапазон «экстремального ультрафиолета», используемый в современной микролитографии). Эта работа выполнялась совместно с ИОФАН и ХПИ. В дальнейшем, для рабочей длины волны 4,5 нм в 2009 г. была изготовлена новая двухзеркальная рентгенооптическая система с прецизионным градиентным многослойным покрытием, обеспечивающим согласование спектрально-угловых характеристик зеркал с субангстремной точностью (Артюков И.А.).

Разработан уникальный малогабаритный рентгеновский спектрометр, в качестве дисперсионного элемента которого используется новый тип дифракционных решеток на основе срезов многослойных структур (Винорадов А.В., Фещенко Р.М.).

Отдельной темой исследований в лаборатории являлся поиск пар материалов для изготовления отражающего многослойного покрытия для ранее неосвоенного спектрального диапазона длин волн 35-50 нм. Для этого был предложен новый метод измерения оптических констант химически активных элементов и соединений,

таких как скандий, представляющих особый интерес в качестве материалов слоёв зеркал для этой области спектра. С его помощью были впервые определены оптические константы скандия, титана, лантана и тербия, наиболее перспективных для использования в качестве компонентов многослойных покрытий (Виноградов А.В., Попов Н.Л.).

В результате указанных исследований в лаборатории вскоре были созданы оптические элементы и системы с многослойными Sc/Si покрытиями, которые успешно использовались вместе с созданным в США капиллярным лазером на длину волны 46,9 нм в исследованиях по абляции материалов, рефлектометрии, интерферометрии плотной плазмы и т. п. В сотрудничестве с Университетом штата Колорадо (CSU, США) на основе этой оптики был создан малогабаритный ВУФ-микроскоп, позволяющий получать динамические изображения в реальном масштабе времени с пространственным разрешением 30-50 нм, удостоенный национальной премии США «R&D100 Award» в 2008 г. Следует отметить, что открытая совместно с Теоретическим отделом ФИАН комбинация пар материалов скандий-кремний является в настоящее время общепринятой структурой при изготовлении многослойных отражающих покрытий для спектрального диапазона 35-50 нм (Артюков И.А., Виноградов А.В. – Рис. 3.14).

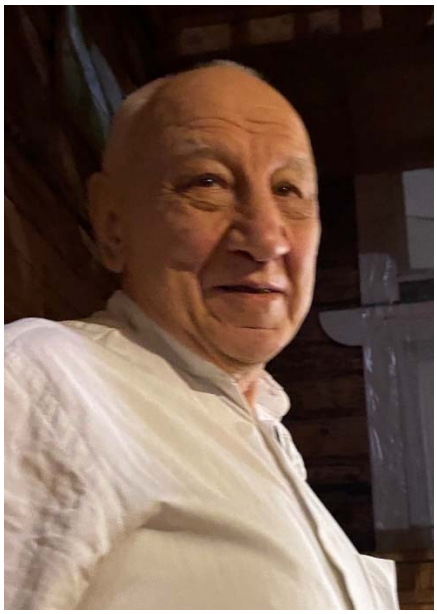


Рис. 3.14 А.В. Виноградов

В 2005-2010 г.г. в лаборатории рентгеновской оптики была сформулирована новая концепция рентгеновской микроскопии в спектральном диапазоне «углеродного окна» - метода исследования углеродосодержащих материалов, в т. ч. биологических объектов на длинах волн прозрачности углерода 4,5 – 5 нм. Разработанные новые многослойные покрытия с нанометровыми слоями Co/C позволили провести в ФИАН эксперименты по получению изображений биологических объектов с лазерно-плазменным источником, подтвердившие

высокий контраст различных органических соединений и тканей при их химической фиксации гистологического типа (Артюков И.А., Виноградов А.В., Фещенко Р.М.).

В течение всего периода существования лаборатории здесь активно проводились теоретические исследования в областях, связанных с решением фундаментальных и прикладных задач рентгеновской оптики. Так, в лаборатории впервые сформулировано точное прозрачное граничное условие для временного уравнения Шрёдингера для прямоугольной и гиперпрямоугольной вычислительной области в свободном пространстве. Полученное условие используется для изучения временной эволюции как одночастичных, так и многочастичных квантовых систем (Фещенко Р.М.).

В конце второго десятилетия в рамках исследования процессов взаимодействия мощных лазерных импульсов с электронным пучком лазерно-электронного (томсоновского) рентгеновского источника была изучена пространственно-временная структура сфокусированного лазерного излучения и были получены соответствующие точные решения уравнений электромагнитного поля. Позднее была впервые получена релятивистски-инвариантная формула для полного вектора спина электромагнитного импульса и показана связь квантовых операторов рождения и уничтожения фотонов и спинового углового момента по четырёхмерному импульсу. С помощью точного решения уравнений Максвелла с конечной энергией были исследованы свойства электромагнитных пучков, не связанные с приближениями параксиальности и монохроматичности, что дало возможность рассмотреть короткие одно- и полупериодные импульсы (Виноградов А.В., Попов Н.Л., Фещенко Р.М.).

Для решения задач безлинзовой оптики в лаборатории были разработаны методы решения обратной задачи восстановления амплитудно-фазовых изображений при наклонном положении объекта относительно оптической оси. На основе этих методов была создана компьютерная программа с использованием различных алгоритмов восстановления фазы («phase retrieval»). В программе был реализован также метод расширенной итеративной птихографии (Extended Ptychography Iterative Engine), позволяющий одновременно восстанавливать поля объекта и освещающего объект пучка. Выполненные с помощью этой программы численные эксперименты определили основные требования к степени временной и пространственной когерентности различных рентгеновских источников с точки зрения их эффективного применения в птихографии. В частности, для энергии фотона 10 кэВ и разрешения ~ 10 нм было установлено, что восстановление фазово-амплитудной структуры объекта проходит без заметных артефактов только при ширине спектральной линии излучения источника до 0,01 % (А.В. Виноградов, Н.Л. Попов).

В лаборатории была предложена новая оптическая схема рентгеновского микроскопа для исследования объектов при скользящих углах падения, которая позволяет снять ограничения, связанные с низкой отражательной способностью исследуемых образцов в рентгеновском диапазоне. Разработанный в ходе этой работ

быстрый алгоритм расчета дифракции от наклонного объекта с помощью дискретного преобразования Фурье (FFT) позволил существенно сократить время компьютерных вычислений рентгенооптических систем микроскопии, литографии и птихографии (Виноградов А.В., Бусаров А.С., Попов Н.Л.).

В результате моделирования контраста изображений биообъектов было показано, что для исследования белковых наноструктур в гистологических тонких срезах без добавления контрастирующих веществ методами абсорбционной рентгеновской микроскопии наиболее эффективным является монохроматическое излучение с длинами волн 7-14 нм (Попов Н.Л.).

Лаборатория совместно с лабораторией фотоники молекул КРФ и Отделением ядерной физики и астрофизики ФИАН и в сотрудничестве с НИИЯФ МГУ им. Д.В.Скобельцына в начале 2000-х годов инициировала в нашей стране исследования, направленные на создание спектрально-яркого рентгеновского источника на основе обратного комптоновского (томсоновского) рассеяния. Были разработаны модель и методика расчёта параметров такого лазерно-электронного источника для генерации рентгеновского излучения с энергией фотонов 25–50 кэВ. Созданный в лаборатории программный код может быть интегрирован в известную рентгенооптическую программу SHADOW с целью моделирования выходных параметров рентгеновского пучка и фокусирующих рентгенооптических систем в опциях практического применения источника в материаловедении, медицине и ядерной фотонике. Проведенные расчёты и численное моделирование подтвердили возможность создания такого томсоновского источника на современном уровне развития технологий ускорительной и лазерной техники (Артюков И.А., Виноградов А.В., Попов Н.Л., Фещенко Р.М., Шведунов В.И.).

Был также рассмотрен и проанализирован ряд практических применений томсоновского источника. В частности, были сформулированы оптимальные требования к электронным пучкам и лазерным системам при создании источника для проведения разностной ангиографии в режиме реального времени. Для динамического исследования ячеек памяти на фазовых переходах была разработана специальная схема томсоновского рентгеновского источника с коротким, пикосекундным импульсом. По результатам перечисленных работ впервые в России защищена кандидатская диссертация по томсоновским рентгеновским лазерно-электронным генераторам (Артюков И.А., Виноградов А.В., Попов Н.Л., Фещенко Р.М., Шведунов В.И.).

В настоящее время одним из важных направлений исследований лаборатории рентгеновской оптики является развитие и применение методов рентгеновской микроскопии и микротомографии с использованием как синхротронных, так и лабораторных источников.

Методами рентгеновской микротомографии на синхротронах PETRA-III (ФРГ) и ELETTRA (Италия) были исследованы десятки образцов углеродных композитных материалов и нанокомпозитов. Сравнение полученных трехмерных моделей с результатами акустической микроскопии позволило сделать вывод об

эффективности и комплиментарности такого комплексного подхода для неразрушающего исследования внутренней структуры данных образцов. Использование специально разработанного испытательного стенда непосредственно на рабочей станции канала синхротрона позволило наблюдать за ростом внутренних микротрещин при увеличении механической нагрузки, что создало новую экспериментальную базу для разработки и проверки математических моделей разрушений композиционных слоистых материалов с целью повышения их прочности и разработки новых материалов для авиации и судостроения (Артюков И.А., Букреева И.Н.).

В 2019-2021 гг. с помощью методов синхротронной рентгеновской микроскопии и флуоресцентного микроанализа в лаборатории были получены изображения и химический состав образцов тканей миокарда и поперечно-полосатых мышц на клеточном уровне (исследования мышц проводились совместно с РНИМУ им. Н.И. Пирогова). Это позволило подтвердить гипотезу о существовании депозитов натрия в межклеточном пространстве и по-новому взглянуть на проблемы диагностики и лечения сердечных заболеваний (Артюков И.А., Виноградов А.В., Фещенко Р.М.).

С 2004 г. лабораторные микротомографы типа SKYSCAN также успешно применялись для получения трёхмерных изображений микроструктур различных оптически непрозрачных объектов. Среди исследованных образцов можно назвать: натуральные и искусственные алмазы, керны нефтеносных пластов, образцы плацентарной ткани, металлические оболочки макетов микротвэлов, повреждённые графитовые стрежни, многослойные оптические волокна, осколки костной ткани, лазерные мишени и т. п. Таким образом, в исследованиях использовались оба типа рентгеновских источников: синхротроны (для получения динамических изображений объектов с короткими временами экспозиции с высоких соотношением сигнал/шум) и лабораторные микротомографы (для осуществления стандартных рентгеновских исследований большого числа объектов). При этом для обработки рентгеновских изображений, полученных на микротомографах типа SKYSCAN, была разработана оригинальная компьютерная программа шумоподавления, основанная на алгоритме «анизотропной диффузии» с внутренним контролем параметров. Эта программа позволила методом рентгеновской микротомографии расширить исследование структур объектов с малым рентгеновским контрастом, например, малоплотных мишеней для лазерного термоядерного синтеза (Артюков И.А., Букреева И.Н.).

Сотрудники лаборатории внесли существенный вклад в развитие отечественной и мировой рентгеновской оптики. Развитие рентгеновских источников следующего поколения с высокой яркостью и когерентностью открывают новые возможности для дальнейшей разработки методов исследований с использованием рентгеновских лучей.

### 3.2.11 Лаборатория инновационных лазерных систем (ЛИЛС)

Лаборатория создана при реорганизации Отделения КРФ в 2016 г в результате слияния Лаборатории химических лазеров и Лаборатории применения лазеров, тематику которых она в значительной степени унаследовала. Заведующим ЛИЛС был назначен к.ф.-м.н. Юрышев Н.Н., до этого работавший в лаборатории химических лазеров. Уже в 2018 г. лаборатория была переведена в Троицкое обособленное подразделение ФИАН, по месту её местоположения и проживания основной части сотрудников.

Достижения прежних двух лабораторий – химических лазеров и применения лазеров в период до 2016 г. описаны выше. Достижения ЛИЛС в 2016 г. и после, несмотря на утрату её принадлежности к Отделению КРФ, тоже будут указаны (см. далее), поскольку ЛИЛС в большой степени продолжает начатые ранее работы. В Лаборатории проводятся исследования спектральных и лазерных характеристик кристаллов $A_2B_6$ (ZnSe, ZnS, CdSe, CdS и др), легированных двухвалентными ионами переходных металлов (Cr, Fe и др.), разрабатываются на их основе лазеры среднего ИК диапазона (2-6 мкм) и изучаются возможности их применения в научных и прикладных исследованиях. Разрабатываются способы и устройства для эффективной генерации лазерных импульсов фемтосекундной длительности и исследуются возможности их применения в различных областях науки и техники (Рис. 3.15).

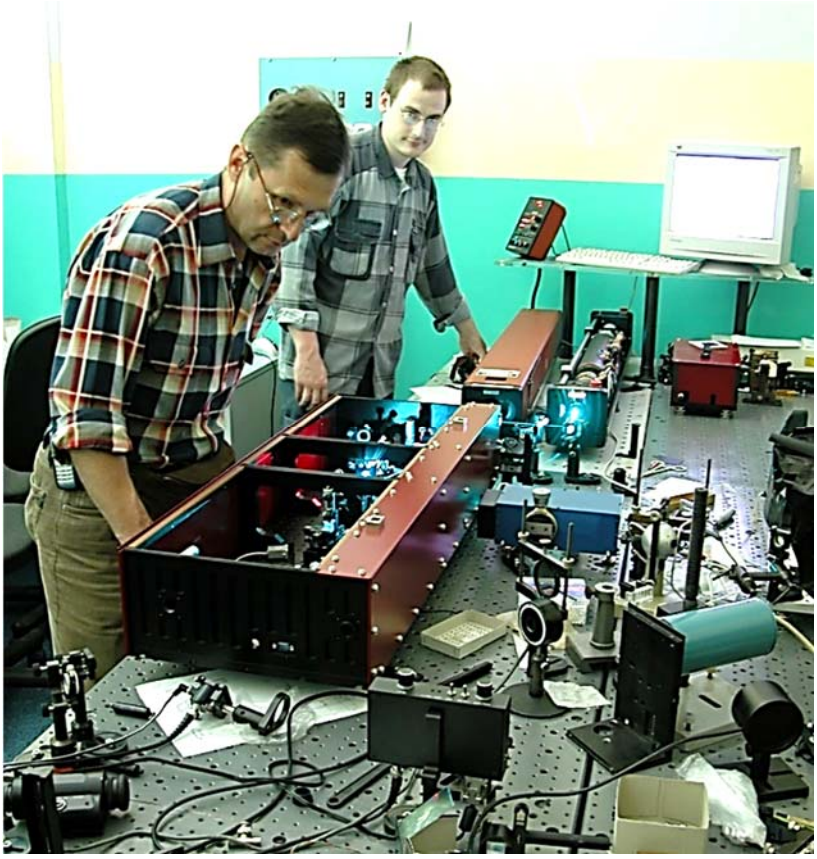


Рис. 3.15. В.С. Пазюк и А.П. Сергеев настраивают фемтосекундный лазер.

В 2016 г. в ЛИЛС проведено экспериментальное исследование фемтосекундного комбинационного лазера на сжатом водороде с накачкой излучением лазера на сапфире с титаном, работающего с частотой повторения 1 кГц. В режиме двухимпульсной накачки определены условия, соответствующие минимальному значению дисперсии распределения по энергии стоксовых импульсов. Реализована оптическая схема, позволяющая достичь долговременной стабильности средней мощности первой стоксовой компоненты с относительной вариацией меньше 2%. Получены импульсы стоксова излучения с длительностью 60 фс и энергией 0,26 мДж при эффективности преобразования 14%.

На основе эффекта нелинейной фазовой самомодуляции в газонаполненном капилляре осуществлена временная компрессия импульса фемтосекундного иттербиевого лазера при частоте повторения 100 кГц. Лазерный импульс длительностью 260 фс был сжат до 17 фс с энергетической эффективностью 40%. Средняя мощность излучения на выходе компрессора составила 2 Вт. С целью повышения временного контраста и дальнейшего сокращения длительности импульса проведен второй этап компрессии в процессе генерации второй гармоники в кристалле KDP. Получены импульсы длительностью 11 фс при эффективности 35%.

Создан источник мощных фемтосекундных световых импульсов с длиной волны 1,28 мкм на основе ВКР излучения лазера на сапфире с титаном в водороде. При частоте повторения импульсов 100 Гц получены световые импульсы с энергией 3,6 мДж и длительностью 66 фс.

Изучены свойства углеводородных нанопленок, создаваемых на выходной поверхности кварцевых подложек при отжиге на них тонкого слоя трансформаторного масла излучением мощного KrF-лазера в пятне с площадью около 1 $см^2$ по схеме подвода излучения к границе стекло-масло через стекло. Экспериментально доказано, что при отжиге слоя масла на поверхности пластин КУ-1 импульсами излучения с интенсивностью 60 $МВт/см^2$ и длительностью 80 нс образуется пленка полимероподобного углерода толщиной до 40 нм. Дополнительными импульсами лазерного излучения можно уменьшать толщину пленки и менять её структуру. Верхняя граница интенсивности излучения KrF-лазера, которую можно использовать в таком процессе, ограничивается разрушением подложек ударными волнами от лазерной плазмы.

Серьёзные успехи в ЛИЛС достигнуты в развитии технологии выращивания из паровой фазы монокристаллов соединений $A_2B_6$, легированных переходными металлами, и в создании на этой основе лазеров, широко перестраиваемых в среднем ИК диапазоне (Фролов М.П. совместно с Коростелиным Ю.В. и Козловским В.И. из Лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой Троицкого обособленного подразделения – ТОП ФИАН). В результате впервые в мире были запущены лазеры на кристаллах CdSe:Cr, CdS:Cr, CdSe:Fe, ZnTe:Fe, CdTe:Fe, ZnS:Fe, с помощью которых перекрыт спектральный диапазон от 2 до 7 мкм. Достигнута рекордная энергия в импульсе в 10,6 Дж на кристалле ZnSe:Fe (длина волны вблизи 4 мкм).

Впервые запущен непрерывный лазер ZnSe:Fe. Реализована эффективная генерация импульсного Fe:ZnSe лазера при охлаждении термоэлектрическими элементами (выходная энергия 7,5 Дж, оптический КПД 30%, область перестройки 3,75-4,82 мкм). При комнатной температуре выходная энергия составила 1,2 Дж, а при температуре жидкого азота 10 Дж. Запущен лазер Cr:ZnSe в режиме фемтосекундных импульсов. Данные лазеры использованы в высокоразрешающей внутрирезонаторной спектроскопии вредных газов.

## 3.3 Исследования в Центре лазерных и нелинейно-оптических технологий

### 3.3.1 Лаборатория газовых лазеров

Заведующим лабораторией, как и руководителем Центра является д.ф.-м.н. А.А. Ионин. На рубеже второго и третьего десятилетий сотрудниками ЛГЛ Синицыным Д.В., Котковым А.А., Климачевым Ю.М., Козловым А.А., Киняевским И.О., Рулевым О.А., Сагитовой А.М. были детально исследованы выходные характеристики криогенного щелевого CO-лазера с накачкой ВЧ разрядом, работающего в режиме модуляции добротности резонатора (МДР), при различном составе рабочей газовой смеси. Обнаружено, что небольшое добавление азота увеличивает выходную мощность лазерного излучения при той же длительности импульсов. Наибольшая пиковая мощность этого CO-лазера (~ 4 кВт) была получена в газовой смеси $CO:O_2:N_2$:He с соотношением концентраций $O_2:N_2$ = 1:4, т.е. как в атмосферном воздухе. Показано, что атмосферный воздух в качестве компонента рабочей газовой смеси может применяться вместо чистого азота и кислорода без потери выходной мощности лазера. В нелинейных кристаллах $ZnGeP_2$, $BaGa_2GeSe_6$, $PbIn_6Te_{10}$ и $AgGaSe_2$ впервые экспериментально и теоретически исследована широкополосная генерация суммарных и разностных частот излучения щелевых ВЧ CO- и $CO_2$-лазеров с синхронной модуляцией добротности резонатора. Спектр суммарных частот лежал в диапазоне 3,2-3,8 мкм, а разностных в области 12-20 мкм. Реализована широкополосная генерация суммарной частоты и генерация третьей гармоники щелевого ВЧ CO-лазера с модуляцией добротности в двух кристаллах $BaGa_2GeSe_6$, (один внутри резонатора) в диапазоне 1,7–6,0 мкм. Таким образом, разработанная гибридная лазерная система перекрывает широкий диапазон длин волн от ~2 до ~20 мкм.

Методом численного моделирования внутрирезонаторного широкополосного многокаскадного преобразования частоты излучения многолинейчатого CO-лазера с МДР показано, что охлаждение нелинейного кристалла ZGP до температуры жидкого азота позволяет повысить эффективность 1-го, 2-го и 3-го каскадов преобразования в 1,4, 1,45 и 1,7 раза соответственно. Повышение интегральной (по спектру) эффективности преобразования связано с расширением полосы спектрального синхронизма для рассматриваемых процессов при охлаждении нелинейного кристалла. Кроме того, охлаждение кристалла уменьшает потери на

поглощение излучения внутри кристалла и повышает порог оптического повреждения кристалла.

Для импульсно-периодического щелевого $CO_2$-лазера с ВЧ-накачкой впервые реализован режим активной синхронизации мод. Лазерное излучение состояло из цугов, следующих с частотой 150 Гц. Внутри цуга лазерные импульсы следовали с частотой внутрирезонаторного акустооптического модулятора (27,25 МГц) и их длительность составляла ~5,5 нс. Проведенная численная оценка масштабируемости лазерной системы показала возможность создания компактного (длина резонатора лазера менее 1 м) субнаносекундного щелевого $CO_2$-лазера с синхронизацией мод. Кроме того, показано, что лазерную систему можно упростить за счет применения ВЧ источника питания, общего для возбуждения разряда в активной среде лазера и для работы акустооптического модулятора.

Группа кристаллов с квадратичной нелинейностью, а именно $AgGaS_2$, $AgGaSe_2$, $BaGa_2GeSe_6$, $CdGePAs_2$, $CdSiP_2$, GaSe, $HgGa_2S_4$, $PbIn_6Te_{10}$ и $ZnGeP_2$, была численно исследована с точки зрения возможности осуществления генерации широкополосных ультракоротких импульсов в среднем ИК-диапазоне. Для каждого из кристаллов определены оптимальная длина волны лазера накачки, ширина полосы импульса в среднем ИК-диапазоне и относительная эффективность. Экспериментально исследовано внутрирезонаторное преобразование частоты излучения CO-лазера в нелинейном кристалле $ZnGeP_2$ в условиях некритичного фазового синхронизма. Рассмотрены различные конфигурации лазерного резонатора, в одной из которых сам нелинейный кристалл служил выходным зеркалом. Осуществлена перестройка спектра преобразованного излучения в коротковолновую область за счет температурной перестройки фазового синхронизма в нелинейном кристалле. Максимальная средняя мощность генерации суммарных частот с кристаллом $ZnGeP_2$ была получена при комнатной температуре кристалла с выходным зеркалом, имеющим пропускание T ~ 10% для основной частоты, и достигала ~7.0 мВт. Отношение мощностей излучения на суммарных частотах и CO-лазера, выходящего из резонатора, составило ~16%, что выше значения, полученного с кристаллом $BaGa_2GeSe_6$ (11.5%) на той же лазерной установке.

Проведено параметрическое исследование нового щелевого ВЧ-разрядного CO-лазера. В режиме свободной генерации в основной полосе была получена средняя мощность до ~ 40 Вт, при этом спектр излучения состоял из ~15 линий в диапазоне 5,06 – 5,92 мкм. В режиме модуляции добротности резонатора на переходах основной полосы CO-лазер работал в спектральном диапазоне 4,95-7,0 мкм с импульсной пиковой мощностью до 4,5 кВт. Свободная генерация на переходах обертонной полосы молекулы CO наблюдалась в спектральном диапазоне 2,6–3,05 мкм при максимальной средней мощности ~ 6 Вт. Проведены первые эксперименты по преобразованию излучения этого лазера в нелинейных кристаллах.

Для исследований в области терагерцового излучения была создана газовая ячейка с продольным направлением оптической накачки и поперечным

зигзагообразным резонатором для ТГц излучения. Реализована генерация терагерцового $NH_3$-лазера с оптической накачкой “длинными” (~100 мкс) импульсами электроионизационного $CO_2$-лазера, причем одновременно с наносекундным разрешением измерены импульсы излучения $NH_3$-лазера и “длинные” импульсы $CO_2$-лазера-накачки. Определены длительности генерации и задержки начала генерации $NH_3$-лазера относительно начала импульса накачки в зависимости от энергии $CO_2$-лазера. Измерены длины волн терагерцового излучения $NH_3$-лазера при накачке линией 9R(30) $CO_2$-лазера: 67,2 мкм; 83,8 мкм и 88,9 мкм.

В совместных работах с А.Н.Напартовичем и И.В.Кочетовым (ТРИНИТИ) проведен расчетный анализ возможности достижения генерации в газопроточном электроразрядном кислород-йодном лазере при его возбуждении поперечным щелевым ВЧ-разрядом для различных условий прохождения компонентов газовой смеси $CF_3I$:$O_2$:He по газовому тракту: в дозвуковом потоке без охлаждения стенок канала и с охлаждением различных участков стенок канала до 100 К. Предполагалось, что активная среда формировалась двумя способами: 1) все компоненты газовой смеси одновременно проходили через зону ВЧ-возбуждения; 2) кислород и гелий проходили через зону ВЧ-разряда, а йодид-содержащий компонент (смесь $CF_3I$:He) вводился через инжектор, расположенный ниже по потоку газа от зоны разряда. Расчеты показали принципиальную возможность достижения режима лазерной генерации в реализуемых на экспериментальном стенде условиях.

Киняевским И.О., Ковалевым В.И. и др. в простой оптической схеме с одним проходом излучения оптоволоконного лазера на ионах иттербия через кристалл $BaWO_4$ (концентрация примесей ~0.02 ат%) впервые получена высокая энергетическая эффективность нестационарного ВКР для ультракоротких лазерных импульсов. Для Стоксова смещения частоты 925 $см^{-1}$ она достигала ~20%, причём в режиме значительного уширения спектра импульса, возникающего вследствие эффекта фазовой самомодуляции (ФСМ), то есть эффекта, традиционно считающимся негативным для ВКР преобразования. Однако в представленных условиях ФСМ сыграла положительную роль. Когда уширение ФСМ достигало Стоксовой частоты кристалла, оно действовало как затравочное излучение для ВКР, тем самым, повышая его эффективность. Были исследованы нелинейные эффекты фазовой самомодуляции и вынужденного комбинационного рассеяния в кристалле $BaWO_4$ при его накачке лазерными импульсами длительностью 0,3 пс и длиной волны 515 нм. Обнаружено, что уширение Стоксова крыла в кристалле $BaWO_4$ в 2 раза шире, чем у антистоксова крыла, причем первое демонстрирует ступенчатый рост с увеличением энергии импульса. Эти результаты являются первым наглядным свидетельством следующих фактов: (1) вынужденное комбинационное рассеяние света с достаточно высокой эффективностью преобразования в Стоксовы компоненты замедляет спектральное уширение, вызванное фазовой самомодуляцией; (2) механизм Керровской нелинейности, ответственный за фазовую самомодуляцию в $BaWO_4$, носит ориентационный характер. Коэффициент

нелинейного преломления и время его затухания для кристалла $BaWO_4$ были определены из этих экспериментальных данных.

Разработана и экспериментально продемонстрирована простая методика широкополосного преобразования частоты излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера в средний ИК-диапазон. Методика базируется на эффекте собственного сдвига частоты излучения в красную область при филаментации лазерного импульса в воздухе и последующей внутриимпульсной генерации разностной частоты в кристалле $LiGaS_2$. Спектр излучения разностной частоты простирался от 8,5 до 13,5 мкм на уровне e-2. Длительность ограниченного преобразованием импульса среднего ИК-диапазона составила 47 фс, эффективность преобразования по энергии – до $5x10^{-4}$.

Зворыкиным В.Д., Устиновским Н.Н. и Шутовым А.В. были экспериментально исследованы механизмы многофотонной ионизации атмосферного воздуха и его основных компонентов импульсами УФ излучения ($\lambda$=248 нм) субпикосекундной и наносекундной длительности. Обнаружено, что во влажном воздухе основной вклад в фотоионизацию дает резонансно-усиленная многофотонная ионизация (REMPI) содержащегося в воздухе водяного пара. Измерены эффективные сечения многофотонной ионизации входящих в состав воздуха $N_2$, $O_2$ и $H_2O$. Показано, что при увеличении влажности воздуха пиковая концентрация электронов в плазменном канале филамента возрастает, а интенсивность излучения, наоборот, падает; линейные размеры филамента (по заданному уровню концентрации электронов) увеличиваются во влажном воздухе в 2-3 раза по сравнению с сухим.

Разработана оптическая диагностика распространения фронта абляции и ударной волны в конденсированных и малоплотных пористых мишенях при воздействии УФ излучения KrF лазера ГАРПУН, основанная на использовании электронно-оптической камеры (ЭОК) и шлирен-схемы с подсветкой от капиллярного разряда или импульсного Nd:YAG лазера. Измерены скорости роста кратера в полиметилметакрилате (оргстекле) для 100 нс импульсов излучения с энергией до 60 Дж в условиях двумерного гидродинамического движения вещества, когда результирующая глубина кратера (до 1 мм) значительно превышает диаметр пятна фокусировки (~ 150 мкм). Аналогичные каналы с аспектным отношением длины к диаметру до 1000 были также получены в стекле К8 (с глубиной проникновения УФ излучения до десятков микрон) при облучении последовательностью импульсов KrF лазера (1–3 мДж, 25 нс, пиковая интенсивность $10^8$–$10^9$ Вт/см$^2$). Полученные каналы представляют интерес для ускорения электронов в лазерной плазме.

Исследована динамика формирования узконаправленной конической эмиссии с длиной волны 828 нм при двух-фотонном возбуждении состояния 6p $[1/2]_0$ в Xe мощными импульсами KrF лазера (10 мДж, 200 фс). На основании измерений и теоретического анализа показано, что процесс развивается в два этапа: вначале при четырёх-волновом смешении двух фотонов УФ лазерного излучения, ВУФ и ИК

фотонов генерируется быстрая ИК компонента с длительностью ~1 пс (ограниченной временным разрешением ЭОК), которая служит затравкой для последующего усиления на инвертированном переходе $6p^2[1/2]_0 \rightarrow 6s^2[3/2]_1^o$ с длительностью импульса ~20 пс.

В 2021 г. в лаборатории ГЛ рассмотрены различные способы нелинейной компрессии 20-нс узкополосных импульсов электроразрядного KrF лазера в диапазон субнаносекундных и пикосекундных импульсов на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Брюэллена (ВРМБ), вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и четырех-волнового смешения (ЧВС) с последующим усилением импульсов с крутым передним фронтом в KrF усилителях. ВРМБ-компрессия в сжатом $SF_6$ позволила сократить длительность импульсов до 100–600 пс, а в ацетоне и фторсодержащих жидкостях до 30–150 пс. Последовательное ВКР-преобразование и ЧВС в метане позволяет сжимать импульсы до нескольких пикосекунд.

Мамаевым С.Б. и Широких А.Г. была исследована люминесценция эксимера $Xe_2Cl^*$ при оптическом возбуждении импульсами излучения XeCl-лазера ($\lambda$ = 308 нм) с различной энергией смесей $Cl_2$ с Xe при высоких давлениях. Показано, что коэффициент усиления малого сигнала в $Xe_2Cl$-усилителе может достигать ~1.3 × $10^{-1}$ $см^{-1}$ в смеси $Cl_2$ с Xe при парциальных давлениях 4 мм рт. ст. и 9 атм соответственно и при плотности потока возбуждения $10^{26}$ фотон·$см^{-2}$·$с^{-1}$. Исследована деградация рабочей смеси в кювете по люминесценции и поглощению накачки. Проведены работы по формированию пучка накачки с измерениями профиля и пространственной эволюции пучка. Выполнена отбраковка дихроичных зеркал на 500 нм по пропусканию на 308 нм. Определена лучевая прочность диэлектрического покрытия зеркал. Исследовано прохождение импульса накачки через рабочую среду. Проведено математическое моделирование процесса.

### 3.3.2 Лаборатория фемтосекундной нелинейной оптики (ЛФНО) Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий

В этой лаборатории, руководимой д.ф.-м.н. Л.В. Селезнёвым (Рис. 3.16), исследуются филаментация лазерных импульсов в газовых и конденсированных средах и протяженные плазменные каналы, создаваемые в воздухе и др. средах.

Было изучено влияние длительности ультракороткого УФ лазерного импульса на величину критической мощности самофокусировки. Исследованы энергетические и пространственно-угловые характеристики третьей гармоники при ее генерации в воздухе в условиях взаимодействия нескольких ультракоротких лазерных импульсов, распространяющихся в режиме филаментации. В 2020 г. проведены эксперименты по исследованию генерации терагерцового излучения плазмой одноцветного филамента. Получены угловые направленности ТГц излучения для различной начальной числовой апертуры *NA* лазерного пучка. Терагерцовое излучение в таких условиях распространяется в конус. Показано, что

увеличение числовой апертуры приводит к увеличению угла раствора такого конуса. Показано, что увеличение мощности более чем на порядок не приводит к существенному изменению пространственных характеристик генерируемого терагерцового излучения.

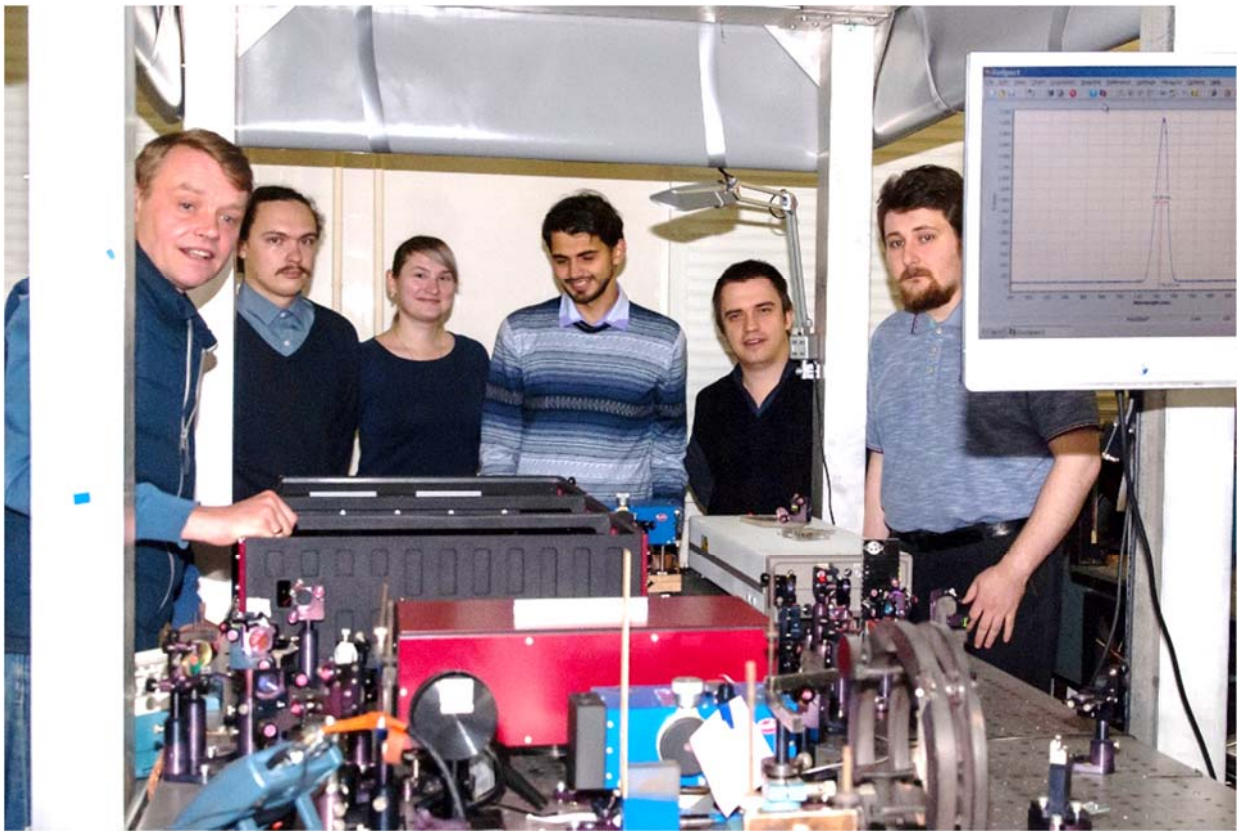


Рис. 3.16. Сотрудники Лаборатории фемтосекундной нелинейной оптики (слева направо): Л.В. Селезнёв, Г.Э. Ризаев, Д.В. Мокроусова, А.В. Корибут, Я.В. Грудцын, А.А. Рогашевский.

Экспериментально получены частотно-угловые спектры лазерного импульса после области филаментации при различной начальной числовой апертуре пучка $NA$. Энергия лазерного импульса соответствовала ~3 $P_{кр}$. При числовой апертуре больше $10^{-2}$ уширение спектра обусловлено фазовой самомодуляцией импульса на образующейся плазме, что проявляется в появлении «синего» смещения спектра на относительно больших углах (вне оптической оси). Как следует из предыдущих экспериментов, согласующихся с результатами других научных групп, в таких условиях образуется плазма с довольно большой плотностью (~$10^{18}$ см$^{-3}$ и более). При уменьшении числовой апертуры (при более мягкой фокусировке) плазма становится менее плотной, её влияние уменьшается, и при $NA < 5 \cdot 10^{-3}$ фазовая самомодуляция, по-видимому, в основном, обуславливается керровской нелинейностью, что выражается в уширении спектра в ИК область и появлении заметных локальных максимумов на оптической оси. Можно отметить, что в случае переходных значений числовой апертуры ($NA$ ~ 6-8 $\cdot 10^{-3}$) спектрального уширения

импульса практически не происходит. Кроме того, именно числовая апертура оказывает наибольшее влияние на режим распространения.

В 2021 г. в лаборатории проведено экспериментальное сравнение преобразования спектра ультракороткого лазерного импульса при его филаментации в различных газах. Показано, что распространение лазерного импульса через атомарный и молекулярный газы приводит к образованию отдельного локального максимума в длинноволновом спектральном крыле. Этот горб с красным смещением более заметен и имеет большую амплитуду при филаментации лазерного импульса именно в молекулярных газах по сравнению с атомными. Отсюда сделан вывод, что фазовая самомодуляция лазерного импульса играет решающую роль в формировании такого горба, а рамановское рассеяние в молекулярных газах увеличивает эффективность этого процесса.

Проведены эксперименты по распространению импульсов с длиной волны 744 нм длительностью 90 фс, энергией 6 мДж и слабо расходящимся волновым фронтом на расстояние более 100 м. Наблюдалось, что после области филаментации следует длинный постфиламентационный световой канал с беспрецедентно высокой интенсивностью (1 ТВт $см^{-2}$). На участке этого канала длиной 20 м энергия импульса непрерывно передается на инфракрасное крыло, образуя спектральные горбы длиной до 850 нм. На основе моделирования распространения импульсов на 100 м с разрешением 3D и временной несущей показано, что спектральные горбы указывают на формирование последовательности фемтосекундных импульсов, появляющихся в предсказуемой позиции на пути распространения.

Показано, что при одноимпульсном измерении спектрально-угловых характеристик импульса в спектре наблюдается серия смещённых в красную область максимумов, локализованных на оси пучка с расходимостью менее 0,5 мрад. В интервале 55–70 м количество максимумов и их красное смещение увеличиваются с расстоянием, а длительность импульса, измеренная автокорреляционным методом, примерно постоянна. На расстояниях от 70 м до 95 м распространение характеризуется уменьшенной расходимостью луча и неизменным спектром импульсов. Длительность импульса увеличивалась из-за нормальной дисперсии воздуха. Помимо этого, экспериментально наблюдалось индуцированное лазером дистанционное зажигание высоковольтного разряда между двумя игольчатыми электродами с межэлектродным зазором 0,5 см. Разряд инициировался вышеописанным лазерным импульсом. Для постоянного напряжения ниже порога самопробоя запуск разряда в воздушном зазоре синхронизировался с частотой следования лазера 10 Гц и происходил на расстояниях от 40 до 80 м. Экспериментально зарегистрированная и смоделированная вероятность дистанционного срабатывания составила более 80% в интервале 45–60 м от лазера и около 50% в интервале 60–80 м. Вероятность уменьшалась по мере увеличения поперечного размера постфиламентационного канала с одновременным увеличением стохастического блуждания лазерного луча.

В достижение представленных выше результатов ЛФНО внесли свой вклад к.ф.м.н. Грудцын Я.В., Ионин М.В., Корибут А.В., д.ф.-м.н. Косарева О.Г., к.ф.м.н. Мокроусова Д.В., Николаева И.А., к.ф.-м.н. Панов Н.А., Пушкарев Д.В., д.ф.м.н. Селезнев Л.В., к.ф.м.н. Федоров В.Ю., д.ф.м.н. Шипило Д.Е., Яловой В.И.

### 3.3.3 Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины (ЛЛНБ) Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий

В этой лаборатории, руководимой д.ф.-м.н. С.И. Кудряшовым (Рис. 3.17), исследуется взаимодействие лазерного излучения с веществом, включая наноструктурирование поверхностей, а также их использование в биомедицине.

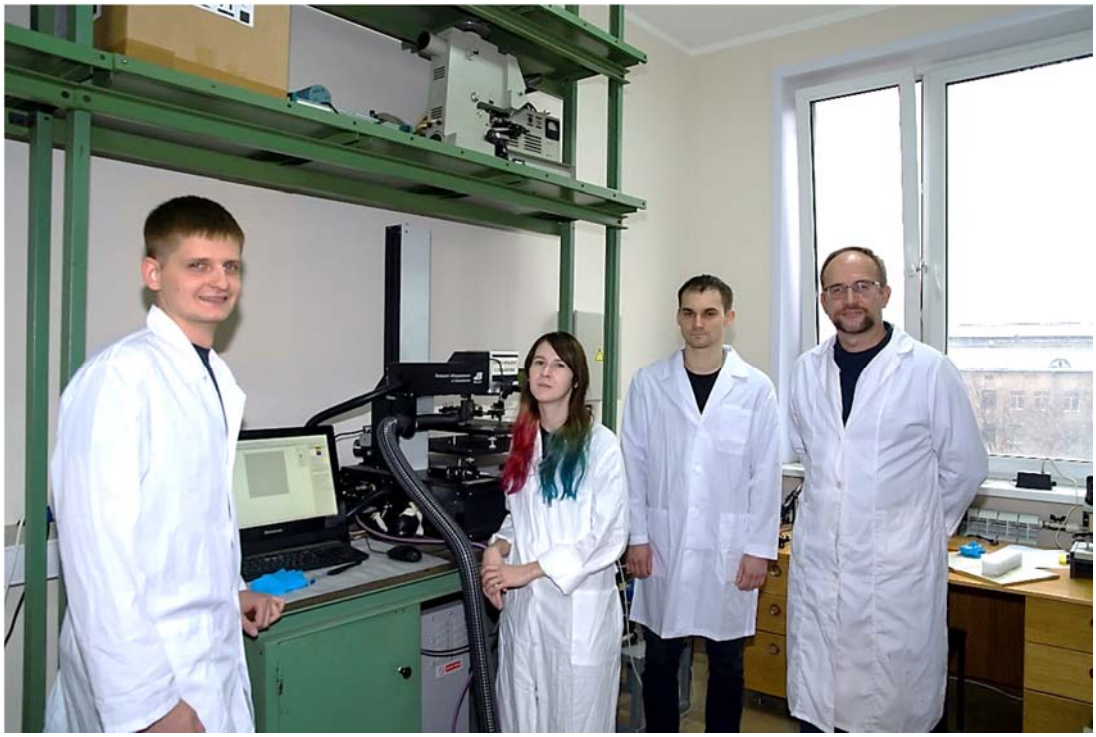


Рис. 3.17. Сотрудники Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины (слева направо): П.А. Данилов, И.Н. Сараева, Н.И. Буслеев, С.И. Кудряшов

В 2020-21 гг. были установлены физические механизмы формирования объемных двулучепреломляющих наноструктур в прозрачных диэлектриках под действием ультракоротких лазерных импульсов варьируемой (фемто- и пикосекундной) длительности, длины волны и пиковой интенсивности излучения. Обнаружено, что начальным этапом формирования наноструктур является отражение лазерных импульсов от объемной околокритической плазмы в лазерном фокусе и интерференция отраженных и падающих импульсов вдоль направления их падения, сопровождающаяся формированием стоячей электромагнитной волны с половинным периодом и плазменных нанолистов, в которых за счет плазмонного механизма происходит наноструктурирование материала.

Показано, что атомистическое микроструктурирование в объеме алмазов ультракороткими (фемто- и пикосекундными) лазерными импульсами протекает как

атомистическое повреждение кристаллической структуры материала в результате многофононной автолокализации электронов, сопровождается формированием фотолюминесцентных меток и возбуждением широкополосной характеристической фотолюминесценции примесных дефектов алмаза. Установлена роль электрон-дырочной плазмы в формировании фотолюминесцентных меток в объеме природного алмаза путем сравнения выхода динамической многофотонной фотолюминесценции рекомбинационного характера и фотолюминесценции меток, в зависимости от длительности и интенсивности падающих ультракоротких лазерных импульсов.

Установлены основные закономерности лазерно-индуцированного ударно-волнового упрочнения поверхности конструкционных материалов в режиме генерации субкритической эрозионной плазмы короткими (наносекундными) лазерными импульсами в воздухе и жидкости, исследованы структурные и механические характеристики модифицированного слоя. Лазерное сверхлегирование поверхности кремния донорной примесью серы в среде жидкого сероуглерода ультракороткими (фемто- и пикосекундными) лазерными импульсами позволило сформировать ИК-фоточувствительный p/n-элемент и исследовать его электронно-микроскопические, структурные, спектральные и электрофизические исследования.

Установлен антибактериальный эффект лазерно-генерированных наночастиц на биопленки патогенных бактерий, методом ИК-спектроскопии отмечено проявление данного эффекта. Предложен и успешно апробирован метод резонансной ИК-лазерной инактивации патогенных бактерий путем селективного воздействия на их функциональные органеллы.

В достижение представленных выше результатов ЛЛНБ внесли свой вклад к.ф.-м.н. Заярный Д.А., к.б.н. Толордава Э.Р., к.т.н. Ковалев М.С., к.ф.-м.н. Данилов П.А., к.ф.-м.н. Сараева И.Н., Смирнов Н.А., Настулявичус А.А., Буслеев Н.И., Красин Г.К., Рупасов А.Е., Шелыгина С.Н.

### 3.4 Исследования по лазерной плазме и ЛТС

После ухода из жизни Л.П. Феоктистова в 2002 г. руководителем отдела ЛТС стал А.Н. Стародуб, а в 2004 г. его сменил А.С. Шиканов, но структура отдела и тематика работ долгое время сохранялись прежними. В 2016 г. Отдел лазерного термоядерного синтеза (ОЛТС) был преобразован в Отдел лазерной плазмы (ОЛП) и его руководителем был назначен к.ф.-м.н. А.А. Рупасов.

Отдел теперь состоит из пяти подразделений - двух экспериментальных лабораторий (Лаборатории диагностики плазмы, Лаборатории воздействия лазерного излучения) и трех теоретических секторов (Сектора теории лазерной плазмы, Сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий и. Сектора теории взаимодействия излучения с веществом).

Основным научным направлением Отдела является исследование взаимодействия лазерного излучения с веществом и исследование гидродинамических, радиационных и кинетических процессов в импульсной высокотемпературной плазме для решения задач управляемого ЛТС и создания источников излучения и корпускулярных потоков с контролируемыми характеристиками.

В связи с прошедшими структурными преобразованиями ниже будут рассмотрены достижения лабораторий и секторов обоих отделов – и ЛТС, и ЛП, в период их деятельности.

### 3.4.1 Лаборатория лазерной плазмы (ЛЛП)

Лаборатория входила с 1990 г. в отдел КРФ и возглавлялась до реорганизации Отделения КРФ в 2016 г. лауреатом Ленинской премии, д.ф.м.н., профессором Г.В. Склизковым (Рис. 3.18).

Рис. 3.18. Г.В. Склизков (в центре) и коллеги (слева направо): Г.А. Вергунова, Н.Н. Демченко, С.Ю. Гуськов, Ю.А. Михайлов, Л.А. Соколова, Чекмарёв А.М., А.А. Рупасов, Н.Г. Борисенко, пришедшие поздравить его с 85-летием (2017 г.)

В этот период в ЛЛП была экспериментально показана возможность изменения пространственно-временной структуры и когерентности лазерного излучения при помощи оптических устройств пространственной фильтрации излучения, электрооптических устройств формирования заданной длительности импульса, суперпозиции частей светового импульса с программируемой задержкой и элементов амплитудной и фазовой хаотизации лазерного пучка. Была разработана схема щелевого интерферометра для измерения когерентности лазерного излучения и регистрации интерференционных картин на лазерной установке «Пико» в различных режимах работы. На этой основе с использованием ПЗС-матрицы разработано устройство для автоматизированной регистрации интерференционных картин и пространственно-временной структуры лазерного пучка. Исследованы зависимости контраста интерферограммы от плотности полос по полю матрицы и разработаны поправочные критерии для восстановления распределения интенсивности в лазерном пучке. В дальней зоне обнаружена спекловая структура, обусловленная высокой когерентностью лазерного излучения (Иванов В.А., Михайлов Ю.А. – Рис. 3.19).

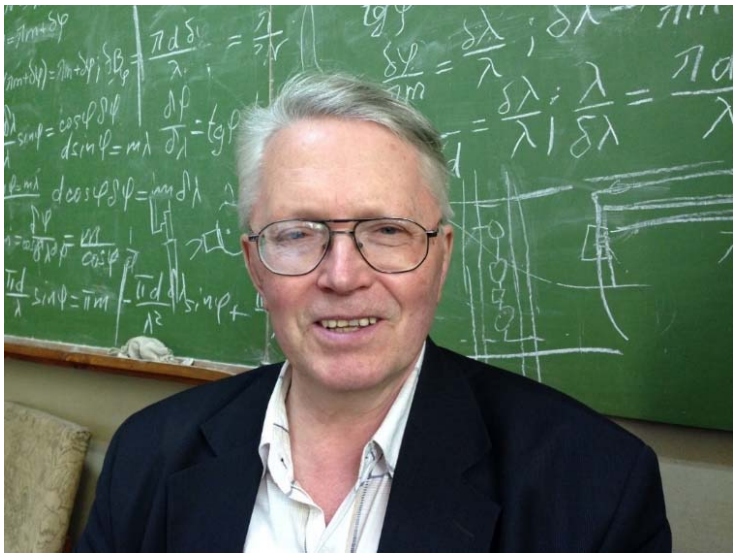


Рис. 3.19. Ю.А. Михайлов

Разработана и изготовлена система формирования лазерного предымпульса для симметризации абляционного давления при нагреве тонкостенных мишеней (толщиной 0,5-10 мкм), моделирующих мишени в экспериментах по ЛТС. Измерены параметры предымпульса: энергия 5–30 Дж, расходимость $2 \cdot 10^{-4}$ рад. Проведены исследования структуры греющего лазерного излучения на поверхности мишени (однородности облучения мишени) при варьировании длительности лазерного импульса и энергии излучения. Выполнены экспериментальные исследования однородности нагрева тонкостенных мишеней при различной пространственной структуре греющего лазерного импульса без воздействия и при воздействии

предымпульса на мишень. Продемонстрированы существенная симметризация абляционного давления и повышение эффективности нагрева тонкостенных мишеней при воздействии предымпульса.

Была разработана и реализована на установке «Пико» система контрастирования лазерного импульса для экспериментов по облучению мишеней, моделирующих малоплотные абляторы термоядерных мишеней. Система включала электрооптический затвор, фарадеевский вращатель, оптические фильтры и просветляющийся фильтр. Измеренная энергетическая контрастность составила $10^6$. Разработана и реализована система профилирования лазерного импульса, включающая систему деления пучка на части с управляемой энергией, систему ввода в тракт лазера предымпульса с регулируемой длительностью и энергией, а также оптические устройства суммирования профилирующих пучков (Склизков Г.В., Михайлов Ю.А., Чекмарев А.М.).

. На установке «Пико» также выполнены экспериментальные и теоретические исследования количественных и спектральных характеристик генерируемых в плазме электронов с энергией 50 кэВ - 10 МэВ при воздействии на мишени лазерного излучения наносекундной и пикосекундной длительности в диапазоне плотностей потоков ($10^{13}$ – $10^{14}$) Вт/см$^2$. Выполнены исследования взрывной и аномальной эмиссии электронов из лазерной плазмы и измерены спектры вылетающих из неё заряженных частиц. Проведено исследование жесткого рентгеновского излучения, генерируемого в лазерной плазме при нагреве лазерным излучением пикосекундной и наносекундной длительности.

На установке "Пико" реализован разработанный метод измерения энергетического баланса лазерного излучения, фокусируемого на малоплотную мишень. Он показал эффективность поглощения лазерного излучения в диапазоне плотностей потока излучения $10^{13}$-$10^{14}$ Вт/см$^2$. Проведены теоретические исследования стохастических процессов при нагреве малоплотных мишеней и разработана программа численного счета. Получены данные по генерации высокоэнергичных электронов (средняя энергия и максимальная энергия электронов) при различных условиях экспериментов (энергия лазерного излучения и плотность мишеней), в которых участвовали Склизков Г.В., Михайлов Ю.А., Чекмарев А.М.

Лаборатория лазерной плазмы вошла в состав Лаборатории диагностики плазмы в 2016 г. при структурной реорганизации Отделения КРФ.

### 3.4.2 Лаборатория лазеров для термоядерного синтеза (ЛЛТС)

До реорганизации Отделения КРФ в 2016 г. лабораторией заведовал. д.ф.м.н. Сенатский Ю.В. (Рис. 3.20). В ЛЛТС решались научно-исследовательские задачи, связанные с разработкой мощных лазеров-драйверов по программе ЛТС.

Рис. 3.20. Ю.В. Сенатский

В начале 2000-х гг. в лаборатории при сотрудничестве с ВНИИЭФ (г. Саров) была продолжена разработка методов формирования распределения интенсивности в лазерных пучках с помощью аподизаторов (мягких диафрагм). Разработаны опытные образцы аподизаторов нового типа: с центрами рассеяния и на основе кювет с нелинейным поглотителем. Для формирования аподизированного профиля пропускания в диэлектрических пластинах использовалась диссипация энергии лазерного пучка на малоразмерных оптических неоднородностях (микроразрушениях), создаваемых в апертуре пластины при фокусировке на нее излучения вспомогательного лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме. Изготовлены пластины-аподизаторы с апертурами от 2 до 100 мм.

Проведены испытания опытных образцов развязок аподизаторов на мощной йодной лазерной установке «Искра-5» во ВНИИЭФ и на неодимовых лазерных установках на стекле и кристаллах Nd:YAG в ФИАН. С помощью пластины-аподизатора с центрами рассеяния в апертуре сформирован пучок йодного лазера диаметром 100 мм с супергауссовым профилем распределения интенсивности по сечению при плотности энергии на оси пучка около 0,4 Дж/см$^2$. В лазерах на неодимовом стекле и на кристалле Nd:YAG при использовании кюветы-аподизатора осуществлена селекция поперечных мод резонатора и получена одномодовая генерация как на основном, так и на нескольких высших типах колебаний (Быковский Н.Е., Зубарев И.Г., Пятахин М.В., Сенатский Ю.В., Шелоболин А.В.).

В начале 2000-х годов в лаборатории совместно с сотрудниками ИОФАН продолжены экспериментальные исследования активной среды - кристалла Yb:YAG (с использованием для его накачки лазеров на центрах окраски). В образцах Yb:YAG с 20% концентрацией активатора был достигнут уровень инверсии до 10 Дж/см$^3$, что свидетельствовало о возможности использования этой активной среды для получения мощных лазерных импульсов. Получена генерация наносекундных

импульсов на переходах 1,03 и 1,05 мкм иона Yb. Зарегистрированы особенности спектров генерации иттербия в пластинах из кристалла Yb:YAG и иттербиевого стекла в условиях высокой интенсивности накачки (до 5 ГВт/см$^2$) импульсами длительностью 20 нс излучения лазера на центрах окраски LiF:$F_2$+ при фокусировке на площадку Ø250 мкм. Ширина спектра составила до 200 Å в Yb:YAG и до 500 Å в иттербиевом стекле. Обнаруженная квазипериодическая структура пятен генерации вдоль щели спектрографа сопоставлена с пространственным периодом осцилляций термоупругих напряжений и градиента показателя преломления, возникающих в образцах кристалла и стекла в области выделения энергии накачки (Сенатский Ю.В., Быковский Н.Е.).

В период с 2002 до 2011 г. Сенатский Ю.В. во время нескольких командировок принял участие в работах по лазерам на Yb:YAG и Nd:YAG керамике, проводившихся в Институте лазерной науки (ИЛН) Университета электро-коммуникаций в Токио, Япония. Проведены измерения нелинейного показателя преломления в кристаллах и керамике YAG, а также в оксидной керамике на основе кристаллов $Y_2O_3$, $Sr_2O_3$, $Lu_2O_3$. Показаны преимущества (по сравнению с лазерными стеклами) возможного использования кристаллов и керамики Yb:YAG с высокой концентрацией активатора в качестве активной среды мощного лазера-драйвера импульсно-периодического режима работы для целей ЛТС.

Совместно с коллегами из ИЛН для Yb:YAG и Nd:YAG лазеров на кристаллах и керамике с диодной накачкой были разработаны новые методы селекции скалярных и векторных мод Лагерра – Гаусса, получена генерация на отдельных скалярных и векторных модах Лагерра – Гаусса различных порядков. Предложено профилирование накачки в активной среде при использовании распределений интенсивности, возникающих в зоне Френеля дифракции пучка накачки на круглой диафрагме. Такой способ профилирования накачки (а значит и инверсии в активной среде) был применен в Nd:YAG лазере на керамике для селекции мод Лагерра – Гаусса. При накачке 20 нс импульсами на длине волны 0,53мкм была получена генерация на ряде кольцевых скалярных мод Лагерра – Гаусса вида $LG_{pm}$ (p-радиальный, m-азимутальный индекс) при p=0 и азимутальными индексами в диапазоне от 1 до 240. Предложен и реализован в экспериментах метод селекции скалярных мод Лагерра-Гаусса при перестройке параметров резонатора, содержащего линзу со сферической аберрацией. В лазере на керамике Yb:YAG с полупроводниковой накачкой (непрерывный режим, 1-30 мВт) получена генерация на модах в виде кольцевых структур с центральным максимумом или центральным минимумом (число колец достигало 10-12). Сопоставление пространственно-угловых характеристик пучков с кольцевыми структурами со свойствами семейства мод Лагерра-Гаусса позволило классифицировать сформированные пучки как скалярные моды Лагерра-Гаусса вида $LG_{pm}$ с различными сочетаниями радиального и азимутального индексов. Центральный максимум соответствовал значению m=0. Осуществлена генерация в непрерывном режиме нескольких десятков скалярных

мод $LG_{pm}$ низших и высших порядков с индексами: p=0-12, m=0-28; m=7-28, p=5-10 (m>p); на ряде мод при p>m генерация получена впервые.

На экспериментальной базе Института лазерной науки были выполнены также исследования по векторным лазерным модам. Предложен и проверен в экспериментах метод селекции векторных мод Лагерра-Гаусса при использовании в резонаторе лазера Yb:YAG с непрерывной мощностью до 60 мВт линзы со сферической аберрацией и двояко преломляющей пластинки из одноосного кристалла. Осуществлена генерация векторных мод Лагерра-Гаусса низших и высших порядков с радиальной и азимутальной поляризацией с числом колец от 1 до 10, причём, ряд мод высшего порядка получен впервые (Сенатский Ю.В.).

В период с 2012 по 2015 г. в лаборатории были выполнены исследования механизма разрушений поверхности кристалла YAG под действием наносекундных лазерных импульсов с широким спектром. Исследование с помощью оптического профилометра кратеров, возникших в кристалле YAG при облучении 20-30 нс импульсами лазера на центрах окраски $LiF:F^{2+}$ (интенсивность $10^9$−$10^{10}$ Вт/см$^2$, спектр излучения 0,89−0,95мкм), свидетельствовало о пластической деформации материала в процессе лазерного воздействия. Предложен механизм, объясняющий деформацию поверхности кристалла в результате смещения точечных дефектов решетки по направлению лазерного пучка при ВРМБ и ВКР излучения накачки (Сенатский Ю.В., Быковский Н.Е.).

На основе анализа экспериментальных данных по лазерному пробою межэлектродного промежутка разработана модель пробоя газовой среды, учитывающая волноводные свойства возникающего плазменного канала. В рамках модели волна пробоя связывается с распространением бегущей электромагнитной волны в предварительно сформированном цилиндрическом плазменном волноводе (А.В. Шелоболин).

Проанализированы полученные ранее в ФИАН, ГОИ и рядом зарубежных исследователей результаты экспериментов с просветляющимися под действием 20-50 нс лазерных импульсов (интенсивность $10^7$-$10^8$ Вт/см$^2$) оптическими затворами на алюминиевой пленке (толщина 0-0,1 мкм). Показано, что механизмом, обеспечивающим высокую скорость просветления пленки, является переход металл-диэлектрик в расширяющемся под действием излучения слое алюминия. (Сенатский Ю.В.)

Лаборатория лазеров для термоядерного синтеза вошла в состав Лаборатории диагностики плазмы в 2016 г. при структурной реорганизации Отделения КРФ.

### 3.4.3 Лаборатория диагностики плазмы

Лаборатория, которой до 2016 г. заведовал лауреат Государственной премии, д.ф.-м.н., профессор А.С. Шиканов, а с 2016 г. заведует лауреат Государственной премии, к.ф.-м.н. А.А. Рупасов (Рис. 3.21), продолжает исследования по диагностике рентгеновского, оптического и корпускулярного излучения высокотемпературной сверхплотной плазмы для целей ЛТС.

Рис.3.21. А.А. Рупасов

Для диагностики мягкого рентгеновского излучения плазмы разработан рентгеновский спектрограф, основным элементом которого является созданная пропускающая дифракционная решетка с периодом 1,4 мкм. Спектрограф позволяет обеспечить широкий спектральный диапазон регистрации от единиц до сотен ангстрем и пространственное разрешение до 50 мкм. С использованием такого рентгеновского спектрографа в совместных экспериментах. на установке капиллярного разряда “CAPEX-2” в Институте физике плазмы Академии наук Чешской Республики в 2004 г удалось зарегистрировать высокую интенсивность линии лазерного перехода в Ne-подобном аргоне (46,9 нм), возбуждаемого по электронно-столкновительной схеме создания инверсии в плазме капиллярного разряда. Она существенно превышала интенсивности других спектральных линий в широком диапазоне (10-60 нм), что явилось на тот момент рекордным достижением, поскольку в экспериментах других научных групп регистрируемый спектральный диапазон был существенно уже: 46-49 нм у J.J.Rocca, 42-53 нм у A.Ben-Kish, 42-48,8 нм. у A.Ritucci (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А.).

Аналогичный спектрограф был использован в совместных экспериментах по исследованию динамики сжатия мегаамперного Z -пинча на гигантской установке «Ангара-5-1» (совместно с ТРИНИТИ, г. Троицк), когда были получены интегральные по времени спектрограммы излучения пинча в мягком рентгеновском диапазоне от 15 до 150 Å. Для обеспечения необходимого спектрального разрешения использовалась дополнительная щель, установленная вблизи пинча и направленная параллельно штрихам решетки. (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А.).

В начале первого десятилетия в лаборатории был разработан источник рентгеновского излучения на основе вакуумного диода с лазерно-плазменным

катодом, характеризующийся размером излучающей области 250 мкм и спектральной яркостью $10^{21}$ фотонов/см$^2$·с·ср.·кэВ ($10^{11}$ рентгеновских квантов в импульсе длительностью 10 нс) в диапазоне К-линий титана (4,5 кэВ) в режимах формирования катодной плазмы лазерным излучением пико- и наносекундной длительности. Исследованы особенности динамики быстрых, со скоростью нарастания тока $\leq 10^{11}$ А/с) лазерно-индуцированных вакуумных разрядов с относительно небольшими значениями амплитуды тока ($\leq 10$ кА), напряжения ($\leq 20$ кВ) и энергии накопителя (20 Дж). Выявлены два различных, разнесенных во времени и пространстве типа плазменных неустойчивостей. Установлено, что первый тип неустойчивостей реализуется в начальной стадии разряда и обусловлен наличием пинчевых структур во фронте расширяющейся в вакуум катодной струи. Второй тип неустойчивостей возникает на вершине или на спаде тока и сопровождается генерацией жесткого ($\geq 100$ кэВ) тормозного излучения из прианодной области (Романов И.В., Коробкин Ю.В.).

Позже совместно с ИПМ им. М.В. Келдыша была предложена математическая модель и методика численного анализа процессов, протекающих в плазме разряда, при его инициировании на катоде лазерным импульсом. Модель описывает в R-Z геометрии формирование плазменной межэлектродной перемычки в предположении свободного разлета лазерной плазмы, а также МГД эффекты (пинчевание и др.), обусловленные прохождением по плазме электрического тока. Модель учитывает эффекты, связанные с двухтемпературностью, нестационарностью ионизации, выносом вещества с поверхности катода током и потерями энергии на излучение. Уже первые вычислительные эксперименты показали удовлетворительное согласие полученных характеристик пинча с экспериментом. Показано, что формирование микропинчёвой структуры в катодной струе происходит преимущественно в веществе, испаренном лазерным импульсом при поджиге разряда. В динамике рассчитаны пространственные распределения электронной плотности, температуры плазмы струй, а также аблированной лазерным излучением массы мишени. Показано, что при весьма скромных значениях энергии и интенсивности лазерного пучка (~ 400 мДж и ~ $10^9$ Вт/см$^2$) формируются струи с временем жизни в несколько десятков наносекунд и максимальной плотностью ~$10^{19}$ см$^{-3}$ и $10^{21}$ см$^{-3}$, соответственно (Романов И.В., Коробкин Ю.В., Кологривов А.А.).

В целях выяснения влияния плотности мощности и диаметра фокального пятна лазерного пучка на характер токопрохождения и процесс пинчевания плазмы с помощью рентгеновской фрейм-камеры исследован процесс формирования токо-плазменной оболочки разряда. Показано, что наряду с массой вещества, аблированной лазером с поверхности катода, характер разлета лазерной плазмы существенным образом влияет на динамику плазмы разряда в целом. На начальной стадии развития разряда профиль его токо-плазменной оболочки соответствует профилю лазерной плазмы, сформированному в процессе ее разлета. Уменьшение плотности мощности лазерного пучка путем его расфокусировки приводит к

изменению характера разлета лазерной плазмы из сферического в струйный, что создает протяженную область повышенной плотности на оси разряда. В свою очередь это приводит к повышению стабильности токопрохождения и создает условия для более эффективного пинчевания плазмы.

Далее была исследована пространственная структура излучения плазмы вакуумного лазерно-индуцируемого разряда малой мощности в EUV и мягком рентгеновском спектральных диапазонах. Исследованы рентгеноспектральные (на длинах волн 25 – 450 Å) характеристики излучения плазмы вакуумного разряда (энергия накопителя ≤ 45 Дж), инициируемого на Fe- катоде излучением неодимового лазера с плотностью мощности до $5 \cdot 10^{12}$ Вт/см$^2$, На основе модели столкновительно-излучательного равновесия и разработанной методики показано, что основная доля энергии излучения (> 80%) в экспериментальных спектрах обеспечивается относительно холодной периферийной плазмой с температурой не более 10 эВ и плотностью $5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$.

Экспериментально установлено, что понижение плотности мощности лазерного излучения при его расфокусировке приводит к увеличению выхода излучения плазмы во всем спектральном диапазоне и изменению структуры спектра в коротковолновой области. Согласно модельным расчетам, это изменение обусловлено увеличением температуры и плотности спинчеванной плазмы разряда до величин 160 эВ и $3 \cdot 10^{21}$ см$^{-3}$ , соответственно. Экспериментально показано, что вакуумный пинчевой разряд малой мощности с лазерным поджигом может эмитировать пучок аномально ускоренных электронов. Установлено, что в режиме неустойчивого токопрохождения при инициировании разряда лазерным импульсом с энергией в несколько мДж (когда процесс пинчевания плазмы разряда слабо выражен) достигаются наибольшие энергии электронов. Превышение энергии электронов (в «хвостах» спектрального распределения) над потенциалом источника тока составило 9-10 раз (Романов И.В., Кологривов А.А.).

Для проведения совместных с Отделом физики высоких плотностей энергии ФИАН исследований спектрального состава излучения (в диапазоне длин волн 10-600 Å) гибридного Х-пинча, в котором разряд формируется из одной короткой проволочки, натянутой между двумя массивными конусообразными электродами на электроразрядной установке БИН (ток 270 кА, время нарастания тока 100 нс, напряжение 400 кВ), был также применен спектрограф с пропускающей дифракционной решеткой и регистрацией спектра на рентгеновскую фотопленку УФ-4 и на новый тип детектора - флуоресцентную запоминающую пластину. Обнаружены горячие излучающие точки (от 1 до 5 в различных разрядах), локализованные вдоль пинча (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А., Кологривов А.А.).

В последующих совместных с ОФВПЭ ФИАН экспериментах сравнивались радиационные характеристики гибридных и стандартных (две скрещенные проволочки) рентгеновских Х-пинчей в диапазоне VUV на малогабаритной электроразрядной установке КИНГ (ток 200 кА, время нарастания тока 190 нс, напряжение 45 кВ). Показано, что гибридный Х-пинч является наиболее

эффективным источником VUV-излучения в более коротковолновой области спектра (около 20 Å), тогда как стандартный Х-пинч имеет максимум излучения в более длинноволновой области вблизи 50-60 Å. Для спектроскопических исследований разработан компьютерный итерационный алгоритм реконструкции спектров рентгеновского излучения плазмы, регистрируемых с помощью спектрографа с пропускающей дифракционной решеткой. Алгоритм позволял выделить спектр первого порядка дифракции от накладывающихся спектров более высоких порядков. Тем самым удалось решить задачу реконструкции истинного спектра, не имеющую аналитического решения (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А., Кологривов А.А.).

В 2021 г., как продолжение данной тематики в совместных с ОФВПЭ ФИАН экспериментах, проведены исследования МР и ВУФ излучения тонких плоских алюминиевых фольг и проволочек, взрывающихся при электрическом разряде на установке КИНГ. Для регистрации спектров использовалась 4-х секторная микроканальная пластина с определенным временным интервалом между секторами, а в качестве диспергирующих элементов спектрографа использовались два участка (100 мкм) протяженной (2 см) пропускающей дифракционной решетки, выделенные дополнительной поперечной щелью. Тем самым впервые удалось обеспечить в одном срабатывании разряда одновременно спектральное, пространственное и временное разрешения при регистрации ВУФ и МР излучения. Эксперименты показали, что при взрыве фольги образуется одиночный интенсивный источник МР/ВУФ излучения с испускаемой энергией в диапазоне 10-20 Дж и мощностью до 100 МВт в диапазоне энергий квантов от 30 до 250 эВ. В то же время мощность излучения при взрыве фольги оказалась примерно в два раза выше мощности при взрыве проволочек сопоставимой массы (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А., Кологривов А.А.).

Проведены совместные с ИОФРАН экспериментальные исследования спектров мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы, создаваемой на лазерной установке на неодимовом стекле «Камертон» (длина волны 0,53 мкм, энергия ~ 1–4 Дж, длительность импульса ~ 70 пс). Использовались твердотельные мишени из различных материалов: Al, Si, Ti, Cu, Ta и W. Для проверки правильности результатов проведен детальный расчет спектральных характеристик плазмы по компьютерной программе PrismSPECT. Было установлено хорошее соответствие между значениями электронной температуры, полученными в расчетах по программе, и результатами оценки температуры по ионизационным состояниям плазмы, рассчитанным в рамках соотношений столкновительно-излучательной модели. Анализ спектров показал, что для использования лазерной плазмы в качестве источника излучения в спектральной области «водяного окна» (23–44 Å) лучше всего подходят мишени из тантала, вольфрама или титана (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А., Кологривов А.А., Стучебрюхов И.А.).

Впервые, совместно с научным центром ENEA, Фраскати, Италия проведены измерения излучения, отраженного от лазерной плазмы для мишеней из вспененного

материала с низким Z. Использовался лазер АВС на неодимовом стекле (50 Дж, 2 нс, 1.06 мкм) и мишени из пористого полипропилена с начальной плотностью, большей критической (3 мг/см$^3$), а также мишени из твердых материалов того же химического состава. На основе разработанной модели отражения излучения от плазмы и экспериментальных измерений отраженного излучения с временным разрешением развита методика и определено время гомогенизации лазерной плазмы, которое является важнейшим параметром для практического использования пористых низкоплотных слоев в перспективных мишенях для термоядерного синтеза (Рупасов А.А.).

Проведен численный анализ стохастического ускорения электронов лазерной плазмы, вызываемого случайным изменением фазы силы, действующей на электрон. Основным источником случайности является случайное пространственное распределение электромагнитных полей в фокальной области многомодового лазерного излучения. Характерная частота случайного изменения фазы при максимальном эффекте находится в области 0,25-0,5 от частоты излучения неодимового лазера. Предложена удобная для расчетов модель волнового пакета с учетом излучательных переходов иона неодима. Рассчитана зависимость средней энергии релятивистских электронов от плотности потока в диапазоне $10^{15}$-$10^{18}$ Вт/см$^2$. Найдена зависимость средней энергии электронов от времени в течение лазерного импульса в виде аппроксимационных формул. Рассмотренный стохастический механизм нагрева электронов может развиваться только при длительности импульса порядка или более 1 пс, в том числе и при наносекундных длительностях (Склизков Г.В., Михайлов Ю.А.).

Для исследования электронной эмиссии лазерной плазмы при потоках фокусируемого излучения до $10^{14}$ Вт/см$^2$ наносекундной длительности предложена схема регистрации энергетического спектра электронов. Предложен алгоритм обработки экспериментальных данных, позволяющий восстановить спектр быстрых электронов в момент максимальной интенсивности. Проведены предварительные эксперименты по калибровке схемы измерения энергии электронов и временной корреляции тока эмиссии и интенсивности излучения в течение лазерного импульса. Зарегистрировано максимальное напряжение, возникающее в области фокусировки, соответствующее энергии электронов в десятки кэВ, что существенно превышает тепловую энергию ~ 200 эВ (Склизков Г.В., Чекмарёв А.М.).

Получена генерация направленного низкокогерентного излучения в плотной смеси микрочастиц кристалла LiF и иммерсионной жидкости с красителем PM567. При накачке кюветы с частицами в резонаторе получены импульсы излучения (20 нс; 0,7 мДж) в области длин волн около 0,57 мкм с пространственной когерентностью $\gamma \approx 0{,}1$, которые могут применяться в системах скоростной фотографии, в лазерных проекторах. Задающие генераторы данного типа могут использоваться в лазерных системах после усиления для формирования сглаженного (без спеклов) профиля интенсивности излучения на мишени, в лазерной технологии (Сенатский Ю.В., Бурдукова О.А., Петухов В.А.).

Рассмотрен механизм вынужденного радиального рассеяния в оптических средах лазерного излучения наносекундной длительности с широким спектром и вызванные им специфические разрушения в поверхностных слоях оптических сред, наиболее ярко проявляющиеся в средах с низким порогом фазового перехода. Эти разрушения являются результатом пластической деформации поверхности под действием сходящихся акустических волн, образующихся в результате радиального рассеяния. Показано, что вынужденное радиальное рассеяние может быть ответственно за лазерное разрушение интерференционных зеркал, и предложен механизм его возбуждения в тонких слоях (Быковский Н.Е.).

На основе нелинейной плазменно-волноводной модели электрического пробоя газов рассмотрена пространственная структура гигантских голубых джетов в верхних слоях атмосферы. Предложены лазерные аналоги для таких волн, объяснена коническая эквидистантная по азимуту структура между лучами гигантского джета на базе полусферического резонатора $TEM_{02}$ и $TEM_{03}$. Оценены необходимые параметры поля и плотности ионизации, обеспечивающие этот процесс: E ~10 В/см и $n_e > 10^7$ см$^{-3}$. На основе модели установлены требования к диагностике волн в верхних слоях атмосферы. Предложены аналоги для рассмотрения грозовых явлений в нижней атмосфере (Шелоболин А.В.).

Выполнены эксперименты и теоретический анализ результатов регистрации пространственной структуры плазмы моноимпульсного скользящего разряда в неоне при напряжении питания ниже и равном пороговому для искрового пробоя газа. Оказалось, что в межэлектродном промежутке сосуществуют два типа разряда в течение одного импульса питания. Один из них – разряд незавершенного типа инициируется волной ионизации газа, возникающей при подаче на межэлектродный промежуток импульсного напряжения и распространяющейся в газе вблизи поверхности диэлектрика от высоковольтного электрода к заземленному. Второй – слаботочный диффузный разряд типа тлеющего, который замыкает межэлектродный промежуток. Теоретическое представление о незавершенном скользящем разряде развивается во многих работах на протяжении ряда лет и продолжает совершенствоваться в настоящее время. Тлеющий разряд постоянного тока также хорошо известен. Однако сочетание обоих типов в одном импульсе скользящего разряда ранее не наблюдалось, тем более при разрядных промежутках до 10 см (Трусов К.К.).

Применительно к проблеме ускорения ионов в кластерной плазме, нагреваемой лазерным излучением ультракороткой длительности импульса, развита аналитическая гидродинамическая теория, позволяющая описать динамику разлета сгустка плазмы и энергетический спектр ионов. Проанализированы эффекты поля разделения заряда в тонких фольгах, нагрева мишени обратным током и ускорения ионов в условиях генерации быстрых электронов лазерным импульсом. С использованием двумерного численного моделирования изучено ускорение ионов в зависимости от параметров плазмы и лазера при воздействии мощных лазерных импульсов с длительностью порядка нескольких периодов лазерного поля и

размером фокального пятна порядка длины волны света на твердотельные мишени в условиях формирования предплазмы. Теоретические и численные результаты применены для объяснения результатов экспериментов по взаимодействию коротких лазерных импульсов с фольгами (Быченков В.Ю., Брантов А.В.).

С использованием Фоккер-Планковского моделирования изучена релаксация горячего лазерного пятна и предложена практическая формула для описания нелокального переноса, что позволило объяснить формирование протяженных крыльев в температурном профиле, обнаруженных экспериментально. Найдено приближенное квази-автомодельное решение кинетического уравнения для электронов в неоднородной плазме с заданным уравнением состояния. Используя аналитическую теорию и трехмерные кинетические расчеты, обнаружен эффект самоорганизации плазмы, возникающей в результате развития вейбелевской неустойчивости, характерной для плазмы, образованной воздействием коротких импульсов рентгеновского излучения на газовые среды (Быченков В.Ю., Брантов А.В.).

С помощью численного моделирования методом «частица в ячейке» и теоретических моделей исследован механизм стохастического ускорения и нагрева электронов длинным (пикосекундным) лазерным импульсом в плазме докритической плотности. Изучен процесс формирования широких энергетических спектров электронов в совместно действующих лазерных и плазменных полях. Показано, что процесс рассеяния электронов на турбулентных плазменных колебаниях, возникающих в результате развития неустойчивости при вынужденном комбинационном рассеянии в направлении лазерного импульса, играет определяющую роль в механизме формирования высокоэнергетичных хвостов ускоренных электронов.

С использованием трехмерного численного моделирования был проведен сравнительный анализ ускорения протонов из различных мишеней (тонкие фольги, аэрогели, газовые мишени) при их облучении фемтосекундными мощными лазерными импульсами с энергией порядка 2 Дж, отвечающей уже существующим лазерным установкам, и с энергией 20 Дж, отвечающей строящимся лазерным системам. Были найдены оптимальные параметры плазменных мишеней, приводящие к генерации протонов с максимальными энергиями, и показано, что острая фокусировка лазерного излучения на поверхность тонкой фольги, приводящая к большей величине интенсивности, является оптимальной для ускорения ионов. При этом максимальная энергия протонов, генерируемых лазерным импульсом с энергией 2 Дж, достигает 65 МэВ, а повышение энергии лазера до 20 Дж дает возможность получать энергетические пучки протонов с энергией более 200 МэВ (Быченков В.Ю., Брантов А.В., Бочкарев С.Г.).

Проведен теоретический анализ целесообразности использования тонких мишеней с микроструктурированной поверхностью для увеличения максимальной энергии ионов, ускоряемых из таких мишеней короткими лазерными импульсами. Показано, что при энергии лазерного импульса меньше нескольких Дж подобные

мишени могут быть использованы для увеличения эффективности конверсии лазерной энергии в энергию горячих электронов. Последнее позволяет значительно увеличить ускоряющее ионы квазистатическое электрическое поле и тем самым поднять энергию ускоренных ионов более, чем в два раза. Однако с ростом энергии лазерного излучения эффективность использования структурированных мишеней для ускорения ионов падает. Так, для лазерного импульса с энергией порядка 3 Дж структурированные мишени уже не дают выигрыша в максимальной энергии ускоренных ионов по сравнению со случаем использования плоской фольги с оптимальной толщиной. Исследовано поглощение интенсивных коротких лазерных импульсов тонкими фольгами различной толщины.

На основе решения линеаризованного кинетического уравнения с интегралом столкновений в форме Ландау развита теория переноса заряженных частиц для малых потенциальных возмущений в полностью ионизованной плазме, свободная от каких-либо ограничений на характерные временные и пространственные масштабы возмущений. Вычислены ионные потоки, пригодные для произвольной частоты ион-ионных столкновений и позволяющие описывать пространственно-временной нелокальный перенос в плазме. Полученные коэффициенты ионного переноса использованы для вычисления парциального вклада ионов в продольную диэлектрическую проницаемость столкновительной плазмы, которая оказывается пригодной для всего диапазона частот и волновых векторов (Быченков В.Ю., Брантов А.В., Бочкарев С.Г.).

Совместно с МЛЦ МГУ экспериментально показано ускорение электронов до МэВ-го уровня энергий в кластерах криптона при их облучении фемтосекундным импульсом релятивистской интенсивности и обнаружен рост энергии частиц при удлинении импульса с 50 до 120 фс. Изучено ускорение электронов в плазменном канале, образующемся при воздействии мощного сверхкороткого импульса (50 фс) на пред-плазменный градиент на поверхности твердотельной мишени. На основе развитых алгоритмов и разработанных подходов проведена интерпретация экспериментальных данных, полученных при интенсивности лазерного излучения на мишени свыше $10^{18}$ Вт/см$^2$ с использованием времяпролетного спектрометра с магнитной сепарацией и масс-спектрометра Томсона (Савельев-Трофимов А.Б., Иванов К.А., Мордвинцев И.М.).

Проведены совместные с МЛЦ МГУ исследования влияния пьедестала усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) на генерацию гамма излучения из плазмы при облучении релятивистским лазерным импульсом плоской металлической мишени. Был получен многократный рост выхода гамма излучения из плазмы в сложном режиме взаимодействия, когда поверхность мишени предварительно подвергается воздействию интенсивного наносекундного импульса ($>10^{12}$ Вт/см$^2$). При большом времени задержки между фемтосекундным импульсом и наносекундным предымпульсом (когда преплазма успевает разлететься в вакуум) воздействие пьедестала УСЛ приводит к дополнительной ионизации, повышению электронной концентрации и формированию преплазменного слоя с параметрами,

благоприятными для эффективного поглощения фемтосекундного импульса и увеличения количества горячих электронов, генерирующих гамма-излучение (Савельев-Трофимов А.Б., Иванов К.А., Рупасов А.А.).

С применением структурированных мишеней из вспененного дейтерированного пластика было экспериментально (совместно с МЛЦ МГУ) продемонстрировано повышение эффективности термоядерной DD реакции синтеза при их облучении лазерным импульсом с пиковой интенсивностью около $2x10^{18}$ Вт/см$^2$. Зарегистрировано вплоть до $7x10^4$ нейтронов на один Джоуль вложенной энергии, что вдвое больше, чем для плоского дейтерированного пластика. Предположительно воздействие импульса на мишень с пониженной средней плотностью приводит к росту глубины поглощения и объемному разлету плазмы, в которой вероятность реакции возрастает. Исследовано влияние масштаба столбиков на структурированной поверхности кремниевой мишени на параметры плазмы, формируемой при воздействии на мишень высококонтрастного фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью $2\times10^{18}$ Вт/см$^2$. Показано, что облучение мишени со столбиками субволнового размера (~100 нм в диаметре) обеспечивает значительный (до 250 кэВ) прирост температуры горячих электронов плазмы и их числа по сравнению с получаемыми в случае плоской мишени. Обнаружено, что при этом выход жесткого рентгеновского излучения увеличивается в несколько раз. Наблюдаемый эффект предположительно обусловлен повышенным поглощением и движением частиц в сложном поле вблизи плазменных неоднородностей. (Савельев-Трофимов А.Б., Иванов К.А., Мордвинцев И.М.).

Выполнен (совместно с МЛЦ МГУ) феноменологический анализ термодинамических параметров импульсной сверхзвуковой газовой струи в коническом сопле, установлены условия конденсации и формирования крупных кластеров криптона, образующихся при фазовых переходах в процессе адиабатического расширения газа через сопло в вакуум. Определено фазовое состояние формирующихся в струе крупных кластеров (субмикронные капли) с числом мономеров $\sim10^7$. Получен высокий выход рентгеновских фотонов из кластерной наноплазмы, инициированной фемтосекундным лазерным излучением релятивистской интенсивности I. Установлено, что при $I \approx 3\times10^{18}$ Вт/см$^2$ наноплазма крупных кластеров криптона излучает широкополосный рентгеновский спектр в области 5–100 кэВ (Савельев-Трофимов А.Б., Иванов К.А., Рупасов А.А.).

В лаборатории ранее был разработан трехканальный поляроинтерферометр, который широко использовался в качестве активной лазерной диагностики высокотемпературной плазмы. Прибор имеет три канала диагностики: теневой, интерференционный и поляризационный, которые создавались зондирующим лазерным лучом в оптическом тракте прибора, что позволяло измерять скорость расширения и форму плазменного облака, пространственный профиль концентрации электронов и структуру спонтанных магнитных полей в подкритической области плазмы. Позже была продемонстрирована возможность модификации схемы этого поляроинтерферометра, позволяющая проводить

зондирование плазмы с фемтосекундным временным разрешением и получать при этом чёткую интерференционную картину высокотемпературной плазмы. Для этого было разработано и добавлено в оптическую схему специальное устройство на основе двух миниатюрных поворотных зеркал с микрометрической регулировкой положения, которое компенсировало задержку одного интерферирующего пучка по отношению к другому в плоскости регистрации. На это оригинальное устройство был оформлен и получен патент. В результате проведенных измерений на модифицированном поляроинтерферометре были зарегистрированы чёткие интерференционные изображения плазмы с временным разрешением 50 фс и построен профиль электронной концентрации пзазмы тестового объекта – лазерной искры в воздухе с таким временным разрешением (Рупасов А.А., Болховитинов Е.А.).

### 3.4.4 Лаборатория воздействия лазерного излучения (ЛВЛИ)

ЛВЛИ образована в 2004 г. и включает группу сотрудников, ранее работавших в Отделе ЛТС. Руководит лабораторией к.ф.м.н. А.Н.Стародуб (Рис. 3.22).

Рис.3.22. Участники конференции О.Н. Крохин и А.Н. Стародуб

В лаборатории разработана новая концепция построения мощных импульсных лазеров для целей ЛТС, и запущен лазер, основанный на генерации и усилении излучения с управляемой степенью когерентности и позволяющий при существенном упрощении оптической схемы кардинальным образом решить проблемы согласования системы лазер – мишень и достижения высокой однородности облучения ее поверхности. Для экспериментальной проверки концепции впервые разработана и создана одноканальная лазерная установка «Канал-2» на неодимовом стекле с управляемой функцией взаимной когерентности

(Рис. 3.23). При длительности импульса 2 нс и апертуре пучка 60 мм достигнут уровень выходной энергии лазера 150 Дж и рекордное значение плотности потока энергии излучения 9,3 Дж/см$^2$ (при коллимации пучка в нелинейный кристалл, а на выходе из усилителей до 5 Дж/см$^2$). Относительная простота оптической схемы установки, снижение требований к точности изготовления оптики, комплектность установки в целом и возможность ее эксплуатации в помещении второго – третьего класса чистоты значительно снизили затраты на единицу выходной энергии лазера. Для системы формирования и контрастирования лазерного импульса разработаны и изготовлены поляризаторы на основе пленочных покрытий с большей лучевой прочностью и корпуса для них взамен поляризаторов на кристаллах. Разработан и изготовлен разрядник с лазерным поджигом с улучшенными характеристиками. Разработан и изготовлен стенд для проверки и отбора ламп накачки задающего генератора и усилителей. Модернизирована система модуляции добротности (Федотов С.И., Осипов М.В., Пузырёв В.Н., Якушев О.Ф.).

Рис.3.23 Лазер с управляемой когерентностью излучения Канал-2 (система управления)

Исследовано воздействие наносекундного лазерного излучения на твердотельные мишени из Gd, Al и сплава Gd + Al. Эксперименты были направлены на изучение пространственного, спектрального и временного распределения интенсивности рентгеновского излучения, формируемого лазерной плазмой мишеней. Проведены оценки электронной температуры образуемой плазмы, эффективности конверсии лазерного излучения в рентгеновское излучение, определены размеры излучающих областей. Установлено, что пространственное распределение жесткого рентгеновского излучения практически соответствует размерам фокального пятна лазерного излучения на мишени, в то время как область свечения плазмы в ВУФ спектральном диапазоне имеет общий размер, превышающий размеры фокального пятна в несколько раз. Проведено сравнение изображений плазмы мишеней из Gd, Al и их сплава.

Изучение рентгеновских спектров и ионного состава созданной плазмы указывает на формирование многозарядной плазмы с электронной температурой порядка 100 эВ, которая соответствует оцененной теоретически температуре, необходимой для возбуждения ионов Gd, излучающих в области 6,6 - 6,7 нм. Установлено, что интенсивность рентгеновского излучения увеличивается с ростом интенсивности греющего излучения и уменьшается с увеличением его длительности. Исследованы также спектры излучения алюминиевой лазерной плазмы в мягком рентгеновском диапазоне (30-70 Å). Сравнение экспериментальных и расчетных спектров дало удовлетворительное согласие (Осипов М.В., Пузырёв В.Н., Якушев О.Ф).

На установке «Канал-2» выполнены эксперименты по взаимодействию лазерного излучения наносекундной длительности (длина волны 1,06 мкм, плотность потока излучения $10^{12}$-$10^{13}$ Вт/см$^2$) с мишенями из различных материалов (Fe, Cu, $(C_2H_4)n$, ТАС) и проанализировано изображение лазерной плазмы в собственном оптическом излучении. Исследованы нелинейные процессы, происходящие в областях критической и четверти критической плотностей плазмы. Получены изображения лазерной плазмы на частотах $\omega_0$ лазерного излучения и гармоник 2 $\omega_0$, 3/2 $\omega_0$, 5/2 $\omega_0$. Исследованы пространственные характеристики областей излучения и оценены энергии указанных гармоник, а также спектры излучения лазерной плазмы на основной частоте неодимового лазера $\omega_0$ (~ 1060 нм) и на частотах гармоник 2 $\omega_0$ (~ 530 нм), 3/2 $\omega_0$ (~ 706 нм), 5/2 $\omega_0$ (~ 424 нм) для мишеней из полиэтилена, меди и бериллия (Осипов М.В., Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Фроня А.А. – Рис. 3.24).

Рис.3.24. Д.Б. Чарелишвили, М.В. Осипов, В.Н. Пузырёв и А.А. Фроня обсуждают проведение эксперимента на установке. Канал-2.

На установке «Канал-2» проведена серия экспериментов по определению гидродинамической эффективности с применением метода баллистического маятника. В качестве мишеней использовались сплошные пластины из алюминия Al и меди Cu. Длина маятника составляла 145 мм, масса без мишеней 6,2 г, масса с мишенью 7,2 г. Основные параметры лазерного излучения в проведенных экспериментах были следующие: длина волны 1,06 мкм, длительность импульса по полувысоте 2,5 нс, ширина спектра 26 Å, расходимость пучка 1,4 мрад, энергия лазерного импульса около 10 Дж, плотность потока мощности при фокусировке на поверхность мишени ~ $10^{13}$ - $10^{14}$ Вт/см$^2$. Установлено, что в указанных условиях коэффициент гидродинамической эффективности изменялся от 2,4% до 3%. При этом для более легких мишеней он был меньше, чем в случае более тяжелых мишеней. (Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н.).

Проведены эксперименты по изучению ионного состава плазмы мишеней из гадолиния и алюминия, а также пенной мишени с 10-процентным содержанием меди. Зарегистрированы ионные спектры плазмы для указанных мишеней, определены ионные составы, построены зависимости суммарного ионного заряда и количества электронов в плазме от энергий ионов в приближении сферического разлета плазмы. С помощью цилиндра Фарадея измерено распределение суммарного ионного заряда во времени. Показано, что при увеличении энергии греющего излучения суммарный заряд и количество заряженных частиц растут с увеличением удельной плотности образованной плазмы, а также возрастает количество высокоэнергетичных ионов. В случае мишени из гадолиния при значении энергии лазерного импульса 7 Дж максимальная степень ионизации составила $Gd^{+10}$, а при энергии 20 Дж – $Gd^{+16}$ (Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Якушев О.Ф.).

В конце второго десятилетия проведена серия экспериментов по взаимодействию излучения неодимового лазера наносекундной длительности на основной частоте с малоплотными мишенями из триацетата целлюлозы (ТАЦ). Показано, что такое взаимодействие приводит к генерации второй гармоники в возникающей плазме. Это подтверждает формирование в плазме областей с критической плотностью электронов для исследуемых типов мишеней. Спектр второй гармоники имеет уширенную форму для малоплотных мишеней. Для мишеней из ТАЦ он практически постоянен в течение времени импульса греющего излучения, но для мишеней ТАЦ-Cu он расширяется за время импульса. Это позволяет полагать, что турбулентность в плазме, генерируемой лазерным излучением, обусловлена возбуждением коротковолновых плазменных волн.

При интенсивности лазерного излучения $10^{12}$-$10^{14}$ Вт/см$^2$ происходило полное разрушение ТАЦ мишеней. Зарегистрировано проникновение значительной доли падающей энергии через плазму мишени, что свидетельствует о том, что в таких мишенях поглощается малая доля энергии греющего излучения. Однако доля энергии, прошедшей через плазменный слой мишени, зависит от многих факторов – как от параметров мишени, так и от параметров лазерного излучения. Выявленные зависимости указывают на нелинейный характер поглощения и отражения лазерного

излучения в плазме ТАЦ мишеней. По результатам калориметрических измерений выявлена обратная зависимость прошедшей через мишень энергии от плотности мишени, её толщины и погонной массы. Диаграммы направленности рассеянного вперёд и прошедшего через плазму излучения на основной частоте продемонстрировали, что основная доля излучения распространяется в телесный угол, который практически соответствует углу фокусировки (Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Фроня А.А.).

Получены спектры мягкого рентгеновского излучения плазмы при воздействии на плоскую твердотельную бериллиевую мишень лазерного импульса с параметрами: длительность по полувысоте 2,5 нс, число поперечных мод в генераторе ~1000 и ширина спектра излучения ≈ 26 Å. При плотности потока лазерного излучения на мишени $5{,}3 \times 10^{13}$ Вт/см$^2$ зарегистрированы линии вплоть до Be IV (1s-9p), а также континуум плазмы, причём наиболее интенсивные линии спектра находились в области 60 – 80 Å. В рамках модели локального термодинамического равновесия проведены расчёты спектров МРИ бериллиевой плазмы в программе INDAHAUS с применением кода FLYCHK. Хорошее согласие расчетного спектра с экспериментальным было получено при численном моделировании со значением средней электронной температуры плазмы 130 эВ и электронной плотности $\sim 10^{20}$ см$^{-3}$ (Кологривов А.А., Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Якушев О.Ф.).

В 2021 г. в лаборатории проведена серия экспериментов по взаимодействию наносекундного лазерного излучения с малоплотными мишенями, а также с твердотельными мишенями пониженной плотности. Исследовано влияние состава и параметров мишеней на кинетические свойства возникающей плазмы. Зарегистрированы спектры излучения исследуемой плазмы в рентгеновском, вакуумном ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Проведены расчёты по восстановлению спектра мягкого рентгеновского излучения из спектрограмм, полученных с помощью спектрографа с пропускающей дифракционной решёткой.

### 3.4.5 Сектор теории лазерной плазмы (СТЛП)

Сектор образован в 1979 году. Его руководителем вплоть до начала 2016 г. был лауреат Ленинской и Государственной премий, д.ф.-м.н., профессор В.Б. Розанов (1932–2019 гг.), а после него сектором заведует д.ф.-м.н., профессор Гуськов С.Ю. (Рис. 3.25 и Рис. 3.26).

В 2001-2021 гг. сектор ТЛП успешно продолжал исследования в области теории фундаментальных процессов лазерной плазмы, включая поглощение лазерного излучения, радиационные, гидродинамические и электродинамические процессы в мишенях различной структуры; в области перспективных методов термоядерного зажигания мишеней с инерциальным удержанием; в области теории сжатия и термоядерного горения сферических мишеней при облучении импульсом лазерного излучения и лазерно-индуцированного излучения, включая вопросы

устойчивости сжатия и распространение волн термоядерного горения и детонации; в области физики высоких плотностей энергии при воздействии на вещество мощных потоков лазерного и лазерно–индуцированных излучений и в других областях.

Рис. 3.25. В.Б. Розанов (2012 г.)

Рис. 3.26. С.Ю. Гуськов (2018 г.)

В области физики мишеней лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) исследования проводились с целью исследования как традиционных, так и поиска новых методов зажигания. В 2001 г. был предложен новый метод прямого зажигания предварительно сжатой термоядерной мишени ЛТС при воздействии на неё потока легких ионов лазерной плазмы (Гуськов С.Ю.). В основе метода лежит известный принцип разделения во времени процессов сжатия и нагрева топлива, что позволяет более чем на порядок повысить коэффициент термоядерного усиления по сравнению с традиционными методами искрового зажигания. Теоретически обоснована возможность генерации плазменного импульса с интенсивностью $10^{19}$–$10^{20}$ Вт/см$^2$ и длительностью в несколько десятков пикосекунд при воздействии мощного короткого лазерного импульса на тонкую мишень-генератор, которая располагается вблизи термоядерной капсулы. Генерация плазменного потока осуществляется в результате теплового взрыва мишени-генератора при ее нагреве в процессе многократных пролетов быстрых электронов, в энергию которых трансформируется энергия лазерного импульса. Преимущество использования этого метода по сравнению с использованием пучка лазерно-ускоренных быстрых электронов состоит в упрощенной процедуре транспортировки пучка, а по сравнению с использованием пучка ионов, ускоряемых самосогласованным электрическим полем на границе расширяющейся плазмы – в значительно более высокой (более, чем в 3 раза) степени преобразования энергии лазерного импульса в энергию пучка, которая за счет пондеромоторного эффекта может достигать для плазменного потока 60-70%.

После разработки концепции мишени «Лазерный парник» в 1994-1995 года (Гуськов С.Ю., Розанов В.Б.) в секторе начались активные исследования физических процессов в малоплотном, объёмно структурированном поглотителе мощного лазерного импульса. Была построена теория взаимодействия тераваттного лазерного импульса с частично гомогенизированной плазмой объёмно структурированного вещества и, в частности, пористого вещества с плотностью, большей и меньшей критической плотности образующейся плазмы (Гуськов С.Ю.). Установлен эффект уменьшения скорости волны ионизации с ростом длительности процесса гомогенизации и эффект увеличения давления лазерной плазмы пористого поглотителя по сравнению со случаем однородного вещества той же плотности. Эти эффекты имеют принципиальное значение для использования пористых сред в качестве поглотителя лазерного излучения в мишенях ЛТС. Создана гидродинамическая программа расчёта взаимодействия мощного лазерного излучения с пористым веществом, в которой коэффициент поглощения излучения, уравнение состояния и транспортные коэффициенты являются пространственно-временными функциями степени гомогенизации плазмы (Р.А. Яхин, 2019). Экспериментальные исследования взаимодействия лазерного излучения с пористым веществом (при активном участии сектора) проводятся сегодня во многих институтах в России и за рубежом - в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров), лаборатории инерциального синтеза (лазер АВС) ENEA, Фраскати (Италия), на лазере PALS в Праге (Чехия)и в других. Итогом этих работ стало обоснование возможности сжатия и эффективного термоядерного горения мишеней «Лазерный парник» при малом числе облучающих пучков – 2, 6, 8, 12 (С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, П.А. Кучугов, В.Б. Розанов, Р.В. Степанов, Р.А. Яхин, 2003). Реализация этой возможности является исключительно важной в практическом смысле, поскольку позволяет существенно упростить схему ЛТС.

К концу первого десятилетия был разработан комплекс многомерных математических программ для расчетов сжатия мишеней ЛТС в реальной трехмерной конфигурации облучения лазерными пучками. Проведен анализ экспериментов по сжатию мишеней на лазере Искра-5 (РФЯЦ ВНИИЭФ) и получено согласие с измерениями выхода нейтронов и рентгеновских обскурограмм сжатых мишеней (Демченко Н.Н., Кучугов П.А., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Яхин Р.А., 2010 г.). Подтверждена возможность повышения сжатия мишени за счет выбора конструкции и/или условий облучения, что важно для создания многопучковых мегаджоульных лазерных установок. На основе этих программ в секторе ведутся комплексные расчётно-теоретические исследования по моделированию нагрева, сжатия и горения мишеней ЛТС различной конструкции при прямом облучении мишени лазерными пучками и облучении потоком лазерно-индуцированного излучения (непрямое облучение). Создана обширная база данных характеристик термодинамического состояния вещества и спектральных коэффициентов поглощения излучения, позволяющая анализировать эксперименты на установках мегаджоульного уровня.

Одним из наиболее важных результатов стало предложение схемы двухслойной мишени с полностью испаряемым аблятором при прямом облучении импульсом излучения второй гармоники Nd-лазера с энергией 1-2 МДж, в условиях облучения на мегаджоульной установке проекта РФЯЦ-ВНИИЭФ (Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Кучугов П.А., Розанов В.Б., Яхин Р.А., 2015 г.). Показано, что мишень такого типа с относительно низким (6-10) аспектным отношением слоя DT-льда способна обеспечить при искровом зажигании коэффициент усиления 20-30. По усовершенствованной программе RAPID и вновь созданной программе SEND (Демченко Н.Н.) проведены расчеты и анализ однородности облучения мишени и построены карты распределения поглощенной энергии при различных геометриях облучения мишени конечным числом лазерных пучков. Это позволило перейти к расчёту коэффициента усиления мишени в условиях её неоднородного нагрева. На основании двумерных расчётов применительно к мегаджоульной лазерной установке проекта РФЯЦ-ВНИИЭФ (192 лазерных пучка, вторая гармоника Nd-лазера) установлены допустимые пределы наиболее опасных типов нарушения симметрии облучения (случайный дисбаланс энергии лазерных пучков и расположения их оптических осей относительно центра мишени, сдвиг мишени из области фокусировки пучков, разновремённость воздействия пучков), при которых может быть достигнуто зажигание мишени – получение термоядерной энергии, превышающей вложенную лазерную энергию (Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Кучугов П.А., Розанов В.Б., Яхин Р.А, 2017-2020 гг.). Показано, что наибольшее негативное влияние оказывает сдвиг мишени из области фокусировки пучков. Допустимый предел сдвига составляет около 2 % от радиуса мишени, в то время как допустимый предел дисбаланса энергии лазерных пучков и расположения их осей – 10%.

Итогом этих исследований стало обоснование принципиального утверждения о том, что быстрое зажигание – нагрев предварительно сжатой мишени пучком быстрых электронов или ионов – способно обеспечить горение несимметрично сжатых мишеней ЛТС с эффективностью, близкой к горению симметрично сжатых мишеней (Гуськов С.Ю., Кучугов П.А., Розанов В.Б., Яхин Р.А, 2017 г.). Показано, что для условий современного эксперимента с энергией около 2 МДж в 192 лазерных пучках, при которых зажигание мишени может не достигаться по причине недостаточной симметрии сжатия, выполнение указанного критерия обеспечивается при нагреве пучком быстрых электронов с энергией 20 кДж, радиусом 20 мкм в течение 20 пс. В результате быстрое зажигание может оказаться необходимым звеном всей концепции ЛТС в условиях, когда достижение сферически-симметричного сжатия мишени сопряжено с чрезмерными техническими затратами.

Одним из важных результатов в области поиска схем перспективных мишеней ЛТС стало предложение об использовании однослойной мишени из гидридов изотопов водорода легких металлов, без привлечения криогенной техники (Гуськов С.Ю., Меркульев Ю.А., 2013 г.). Установлено, что перспективы применения некриогенных мишеней связаны с использованием BeDT и $Li_2Be_2D_3T_3$ гидридов, а

также амино-борана в схеме быстрого зажигания при сжатии плазмы мишени до 1000 г/см$^3$ и выше. В этом случае энергия зажигания может быть снижена до значений около 100 кДж. Ещё один важный результат в этой области состоит в предложении и теоретическом обосновании наименее энергозатратного подхода к зажиганию безнейтронной ядерной реакции $p+^{11}B \rightarrow 3\alpha+8{,}62$ МэВ (Гуськов С.Ю., Корнеев Ф.А., 2017 г.), который состоит в: (1) создании замагниченной pB-плазмы с энергией частиц около 0,5-1,0 МэВ и плотностью, в 3-5 раз превышающей критическую, во внутренней полости сферической или цилиндрической оболочки за счет воздействия пикосекундного петаваттного лазерного импульса через вводной канал на внутреннюю поверхность оболочки и (2) сжатии плазмы до плотности, в несколько раз превышающей плотность твердого бора, и удержании такой плазмы при воздействии на внешнюю поверхность оболочки наносекундного тераваттного лазерного импульса. Необходимые для зажигания параметры лазерных импульсов составляют: энергия плазмообразующего импульса 50 кДж, интенсивность $10^{20}$ Вт/см$^2$, длительность 15 пс, радиус пучка 36 мкм; энергия сжимающего импульса 4,1 МДж, интенсивность $5\cdot10^{13}$ Вт/см$^2$, длительность 30 нс.

На основании расчётно-теоретических исследований динамики мишеней ЛТС прямого облучения определены характеристики излучения термоядерных частиц из мишеней, предназначенных для современных экспериментов по зажиганию лазерным импульсом с энергией около 2 МДж (С.Ю. Гуськов, В.Б. Розанов, 2018 г.). Показано, что протяженный участок интегрального по времени спектра нейтронов, рассеянных на ядрах плазмы, в диапазоне энергии от 13,5 МэВ до 0,3 МэВ содержит около 12 % общего числа нейтронов ($2{,}9\cdot10^{18}$ частиц). Учет нейтронного излучения в указанном спектральном диапазоне имеет важное значение для определения добавочной радиационной нагрузки на элементы термоядерного реактора.

Значительное место занимали исследования одного из перспективных методов зажигания мишеней прямого облучения – зажигания сфокусированной ударной волной, которая генерируется на конечной высокоэнергетичной стадии лазерного импульса (Гуськов С.Ю., Кучугов П.А., Яхин Р.А, 2018-2021 гг.). В рамках этих исследований была построена теория переноса энергии лазерно-ускоренными электронами, в энергию которых преобразуется значительная часть лазерной энергии на стадии генерации зажигающей ударной волны. Теоретически предсказан и обоснован в гидрокинетических численных расчётах эффект «блуждания» лазерно-ускоренных надтепловых электронов в короне сферической мишени ЛТС, за счёт которого лишь незначительная доля этих частиц участвует в нагреве сжимаемой части мишени. Эффект существенным образом снижает негативное влияние генерации быстрых электронов на сжатие и, как следствие, на коэффициент усиления мишени искрового зажигания и мишени ударно-волнового зажигания. С учётом этого эффекта впервые рассчитаны зависимости коэффициента усиления мишеней искрового и ударно-волнового зажигания от температуры лазерно-

ускоренных электронов и степени конверсии лазерной энергии в энергию этих частиц.

Установлены допустимые для зажигания интервалы изменения характеристик быстрых электронов. В частности, установлен диапазон изменения температуры лазерно-ускоренных быстрых электронов – 70-80 кэВ, обеспечивающей наиболее высокий коэффициент усиления мишени ударно-волнового зажигания, а также установлен эффект сохранения высокого коэффициента термоядерного усиления при значительном уменьшении энергии лазерного импульса (в 1,3-1,5 раз). Впервые установлен допустимый для зажигания предел нарушения однородности распределения поглощённой лазерной энергии в мишени, предназначенной для зажигания сфокусированной ударной волной в условиях облучения на лазерной установке мегаджоульного класса российского проекта. Этот предел – 3.2 % значительно ниже значения 5%, установленного ранее для мишени традиционного искрового зажигания. Результаты служат обоснованием экспериментов по ударно-волновому зажиганию на установке мегаджоульного уровня энергии Российского проекта.

Исследования в области непрямого сжатия лазерно-индуцированным излучением были посвящены широкому кругу вопросов начиная от интерпретации результатов экспериментов на крупнейшем в настоящее время лазере NIF (Ливерморская лаборатория США, энергия 1,5 МДж излучения третьей гармоники Nd-лазера) до развития схем мишеней непрямого сжатия. Одним из наиболее важных результатов стали установленные на основе расчётов по программе радиационной гидродинамики РАДИАН значения верхней граничной энергии спектра лазерно-индуцированного излучения для различного рода абляторов термоядерной капсулы непрямой мишени, при которых обрезание высокоэнергетичной части спектра фотонов приводит к достижению степени сжатия ДТ-плазмы, необходимой для зажигания (Вергунова Г.А., Розанов В.Б., 2017-2018).

В области физики фундаментальных процессов мишеней ЛТС основное место занимали исследования гидродинамических неустойчивостей и лазер-плазменного взаимодействия. В середине первого десятилетия был выполнен большой цикл исследований развития неустойчивостей Релея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова, включая стадию турбулентного перемешивания тяжелого и легкого слоев (Кучугов П.А, Лебо И.Г., Розанов В.Б., Шумский С.А., Яхин Р.А.). Основная цель этих исследований состояла в разработке методики прогнозирования турбулентного перемешивания на основе информации о начальных данных, о спектрах и амплитудах возмущений. Для её решения была создана обширная расчетная база данных (порядка 250 расчетов) по программам, тестированным в экспериментах на ударных трубах. Предложена и разработана уникальная методика обработки расчетных данных, основанная на вейвлет-представлении и анализе результатов и нейрокомпьютерной классификации данных (с помощью карт Кохонена). На этой основе разработана программа, предсказывающая результаты поздней стадии

перемешивания по информации о начальных данных. Исследования проводились совместно с ИММ РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск), РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров).

В кооперации с экспериментальной группой ЦНИИМАШ проведены исследования воздействия короткого (около 1 пс) высокоинтенсивного (порядка $10^{18}$ Вт/см$^2$) лазерного импульса на различные мишени на лазере «Неодим» (Демченко Н.Н., Розанов В.Б., Яхин Р.А., 2016-2018 гг.). Была разработана гидродинамическая программа на основе совместного решения уравнений гидродинамики и уравнений Максвелла для случая высоких потоков лазерного излучения, учитывающая релятивистские поправки – RAPID-SP. Установлены оптимальные условия для генерации в плоской мишени проникающего излучения - нейтронов, гамма-квантов, рентгеновского излучения, в том числе для случая использования спин-ориентированного термоядерного горючего при различных вариантах предимпульса. Установлен механизм нагрева ионов в ударной волне, возникающей под действием пондеромоторного давления основного импульса в надкритической области плазмы, созданной предымпульсами. Показано, что нейтроны рождаются, в основном, в надкритической плотной плазме, которая нагревается ионной тепловой волной. Время генерации нейтронов определяется остыванием плазмы за счет гидродинамического разлета и составляет несколько десятков пикосекунд. За время разлета плазмы успевает произойти изотропизация функции распределения дейтронов. При этом угловое распределение DD-нейтронов становится изотропным, что соответствует данным экспериментов.

Выполнены расчётно-теоретические исследования передачи энергии к твёрдой мишени от гидротепловой волны, образованной при воздействии наносекундного лазерного импульса тераваттной мощности на слой пористого вещества лёгких элементов с плотностью 5-20 мг/см$^3$ в условиях экспериментов на установке «Луч» ((РФЯЦ-ВНИИЭФ) при энергии лазерного импульса второй гармоники излучения Nd-лазера в диапазоне 200-600 Дж. Установлено, что в течение первых 300-400 пс доля лазерной энергии, которая передаётся ударной волне в твёрдой мишени через пористый поглотитель излучения, на 20-30% выше, чем при обычной абляции твёрдой мишени (Гуськов С.Ю., Яхин Р.А., 2021 г. ). Результаты служат обоснованием экспериментов по облучению сферических мишеней, предназначенных для термоядерного зажигания, на установке мегаджоульного уровня энергии Российского проекта.

Построена аналитическая модель вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в лазерной плазме плоской мишени при взаимодействии двух электромагнитных волн и инициируемой ими акустической волны - CBET (CrossedBeamEnergyTransfer) эффекта (Демченко Н.Н., 2021 г.). На основе численных расчётов системы уравнений Максвелла и уравнений гидродинамики получена зависимость степени подавления CBET-эффекта от ширины спектра и числа гармоник лазерного излучения. Результат служит основой нахождения условий облучения сферической мишени конечным числом лазерных пучков, обеспечивающих подавление CBET-эффекта.

В области физики высоких плотностей энергии лазер-плазменного взаимодействия основные направления исследования связаны с воздействием на вещество лазерно-индуцированных пучков электронов и ионов. Получено точное решение кинетического уравнения в общем релятивистском случае для функции распределения быстрых электронов с произвольным начальным спектром, испытывающих кулоновское торможение в полупространстве полностью ионизованной плазмы (Гуськов С.Ю., 2015 г.). Установлен критерий генерации сильной ударной волны в полупространстве твердого вещества при облучении его границы потоком быстрых электронов максвелловского спектра, характерного для лазер-плазменного ускорения частиц. Показано, что энергия зажигающего пучка электронов с максвелловским спектром в 2 раза превосходит энергию зажигающего пучка моноэнергетических электронов.

Развита модель генерации плоской квазистационарной ударной волны при воздействии на вещество лазерно-ускоренных быстрых электронов максвелловского спектра (Гуськов С.Ю., 2012-2014 гг.). Показано, что генерация пучка быстрых электронов, необходимого для возбуждения ударной волны с давлением за фронтом в несколько Гбар, удовлетворяющей требованиям эксперимента по исследованию уравнения состояния вещества, может быть обеспечена при воздействии на мишень наносекундного импульса Nd-лазера с энергией около 10 кДж (Гуськов С.Ю., Кучугов П.А., 2020-2021гг.). Развита модель генерации плоской квазистационарной ударной волны при воздействии на вещество лазерно-ускоренных быстрых ионов (Гуськов С.Ю., Корнеев Ф.А., 2019 гг.). Установлено, что при нагреве вещества пучком быстрых протонов давление ударной волны примерно в 2 раза ниже, чем при нагреве мишени образующим их пучком лазерно-ускоренных электронов, однако время формирования ударной волны в 6-7 раз меньше, чем при воздействии пучка быстрых электронов. Тем самым энергия лазерного импульса, которая требуется для генерации мощной ударной волны при нагреве пучком протонов, значительно меньше, чем при нагреве пучком быстрых электронов, образующих этот поток протонов.

Найдено аналитическое решение, описывающее изотермический разлет в вакуум внешнего слоя шара, при котором масса слоя, нагреваемого при постоянной мощности источника энергии, увеличивается при неизменной поверхностной плотности слоя, остающейся равной произведению начальных значений глубины прогрева слоя и его плотности вплоть до момента времени, когда разлет охватывает всю массу шара (Гуськов С.Ю., 2016 г.). Решение является ключевым для двух задач инерциального термоядерного синтеза (ИТС): (1) ударно-волнового зажигания мишени ЛТС при нагреве мишени потоком быстрых электронов, ускоренных в поле мощного лазерного излучения, и (2) сжатия мишени тяжёло-ионного синтеза при облучении потоком высокоэнергетичных ионов.

Предложена программа экспериментов на лазерной установке PALS (первая и третья гармоники излучения йодного лазера, энергия 600 Дж, длительность импульса 300 пс, Научный центр PALS, г. Прага, Чешская республика), и на

основании расчётно-теоретического анализа проведена интерпретация результатов этих экспериментов, посвящённых исследованию генерации магнитных полей, обусловленных током быстрых электронов и обратных разрядных токов в лазерной плазме плоских мишеней. Построена модель и выполнены двумерные численные расчёты генерации тока быстрых электронов и магнитного поля в условиях острой фокусировки лазерного пучка на плоскую мишень. Обоснована генерация тока быстрых электронов до 700 кА с энергиями частиц около 50 кэВ и плотностью около $4 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$, а также возбуждаемого этим током магнитного поля с напряжённостью до 30 МГ при интенсивности лазерного излучения $10^{16}$ $Вт/см^2$ (Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Корнеев Ф.А., 2017-2019 гг.).

Развита теория эффекта «шепчущей галереи» в релятивистской оптике при воздействии лазерного импульса с петаваттной мощностью на искривлённую поверхность внутренней полости мишени. Эффект подтверждён в совместном эксперименте с учёными Института лазерной инженерии Университета г. Осака (Япония) и Института мощных лазеров и приложений Университета г. Бордо (Франция). Использовались мишени цилиндрической формы из меди, имевшие продольную щель для ввода лазерного пучка. Радиус мишени составлял 500 мкм, а интенсивность лазерного импульса - $10^{19}$ $Вт/см^2$ при длительности 1,5 пс. Обнаруженная особенность эффекта «шепчущей галереи» в релятивистской оптике состоит в распространении лазерного пучка с релятивистской интенсивностью в результате его многократного взаимодействия с замагниченной приповерхностной плазмой внутренней полости мишени, которое сопровождается пространственно-периодической генерацией быстрых электронов. При этом напряжённость поля составляет нескольких десятков килотесла (Гуськов С.Ю., Корнеев Ф.А., 2018 г.).

Предложен новый способ генерации сверхсильных магнитных полей с использованием фемтосекундных лазерных импульсов, основанный на возбуждении мощных разрядных токов в облучаемой лазерным импульсом мишени. Показано, что магнитное поле при достаточно большой индуктивности мишени существует на временах, на порядок и более превосходящих длительность исходного импульса, и может достигать величин в несколько килотесла и более (Корнеев Ф.А., 2019 г.).

Предложен способ создания источников нейтронного, жёсткого рентгеновского и гамма излучений с предельной для лабораторных условий яркостью на основе нагрева пучком релятивистских лазерно-ускоренных быстрых электронов твёрдой мишени, размер которой (50-100 мкм) меньше, чем длина торможения пучка в предельное число раз, при котором ещё не наступит тепловой разлёт. В численных расчётах для пикосекундного импульса Nd-лазера с энергией 8 кДж и интенсивностью $10^{19}$ $Вт/см^2$ нейтронный выход составил около $10^{12}$ DT-нейтронов, что в пересчёте на 1 Дж лазерной энергии близко к лучшему результату, полученному в экспериментах на лазере NIF (США) с энергией 1,8 МДж в 192 пучках. Расчётные интенсивности источников жёсткого рентгеновского и гамма излучений составили, соответственно, около $10^{18}$ и $10^{16}$ $Вт/см^2$ (Гуськов С.Ю., Кучугов П.А., 2020--2021 гг.).

Установлен эффект экстремально большого сжатия вещества за фронтом ударной волны за счёт быстрого радиационного охлаждении её периферийной части через границу с тепловым поршнем, образованным нагревом релятивистскими лазерно-ускоренными электронами. Сжатие вещества в периферийной области волны кратно превышает сжатие на её фронте. При интенсивности импульса основной гармоники Nd-лазера $10^{18}$-$10^{19}$ Вт/см$^2$ плотность таких металлов, как алюминий и медь в периферийной области ударной волны с давлением 5-10 гигабар достигает значений (40-70) г/см$^3$ (Гуськов С.Ю., Кучугов П.А, 2020--2021 гг.). Эффект имеет принципиальное значение для постановки лабораторного эксперимента по исследованию уравнения состояния сверхсжатых металлов в области квантовых поправок.

Установлен эффект усиления поля разделяющихся зарядов за счёт накопления лазерно-ускоренных быстрых электронов в дебаевских слоях на границах тонкой мишени, в которой время осцилляции электрона меньше длительности ускоряющего лазерного импульса (Гуськов С.Ю., 2020 г.). Это новый эффект физики плазмы, суть которого состоит в том, что одновременное нахождение различных частей банча электронов в дебаевском слое приводит к росту в нём со временем концентрации электронов, уменьшению толщины слоя и, как следствие, к увеличению напряжённости поля разделяющихся зарядов по сравнению с толстой мишенью. Эффект объясняет аномально высокую степень трансформации лазерной энергии в энергию быстрых протонов (10-15%) в экспериментах по воздействию фемтосекундных лазерных импульсов на фольги субмикронной толщины.

Построена теория трансформации волны тепловой ионизации в ионизующую ударную волну при воздействии лазерного импульса тераваттной мощности на сплошное и пористое вещество с плотностью, меньшей критической плотности плазмы (Гуськов С.Ю., Яхин Р.А., 2021 г.). Установлены зависимости длительности формирования ударной волны от интенсивности и длины волны лазерного импульса, а также от плотности вещества мишени. Результат служит основой для выбора и оптимизации параметров малоплотного поглотителя лазерного излучения термоядерной мишени, выравнивающего неоднородности её нагрева конечным числом лазерных пучков.

Исследован нелинейный отклик мишеней типа разомкнутого кольца на облучение интенсивным коротким лазерным импульсом в режиме релятивистских интенсивностей и длительностей импульсов от десятков фс до единиц пс. Показано, что за счёт разрядных процессов в кольцевой мишени генерируются сильные импульсные нестационарные токи, которые могут либо образовывать квазистационарную самосогласованную структуру с созданными ими же магнитными полями, либо служить источником мощного, направленного, квазимонохроматического терагерцового излучения (Корнеев Ф.А., 2021г.).

Построена модель рассеяния излучения тераваттного лазерного импульса в пористом веществе лёгких химических элементов, основанная на временной зависимости уменьшения глубины геометрической прозрачности частично-

гомогенизированной плазмы (Гуськов С.Ю., 2020 г.). Модель объясняет результаты экспериментов по измерению временной зависимости доли рассеянного лазерного излучения в плазме пористого вещества и обеспечивает расчёт времени гомогенизации такой плазмы. Результат является основой расчёта поглощённой лазерной энергии в малоплотном пористом поглотителе перспективных типов мишеней ЛТС, выравнивающем неоднородности её нагрева конечным числом лазерных пучков.

Работы сектора были поддержаны многими грантами РФФИ и РНФ, а также грантами международных научных фондов с участием учёных США, Японии, Франции и Чехии.

### 3.4.6 Сектор лазерно-плазменной физики высоких энергий (СЛПФВЭ)

Этот сектор в Отделе лазерной плазмы был создан в 2016 г. на основе теоретической группы, работавшей в Лаборатории диагностики плазмы с 1995 г. Заведующий сектором – д.ф.-м.н., профессор В.Ю. Быченков.

Сектор ведет теоретические исследования и проводит кинетическое численное моделирование по проблемам лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и взаимодействия сверхмощных коротких лазерных импульсов с плазмой. Основные направления исследований Сектора: неклассический перенос, аномальное поглощение, неустойчивости, кинетика лазерно-нагретых частиц (применительно к плазме ЛТС); лазерное ускорение электронов и ионов из различных мишеней, вторичное электромагнитное излучение в диапазоне от терагерцового до гамма и вторичные плазменные поля, модели для лабораторной астрофизики, расчетно-теоретические основы ядерных, медико-биологических и диагностических приложений лазерного света с экстремальными параметрами (применительно к взаимодействию сверхмощных лазерных импульсов с веществом). По второму направлению, зародившемуся только с появлением лазеров релятивистской интенсивности (вторая половина 90-х годов), сотрудники Сектора, будучи тогда членами научной группы Лаборатории диагностики плазмы, благодаря своим теоретическим работам, начавшимся в 1998 г., фактически оказались пионерами в этой захватывающей области исследований.

Для своей работы Сектор использует современное научно-техническое обеспечение:

- Трехмерные параллельные релятивистские коды Мандор и VSim (Ворпал) для описания взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом и код GIANT-4 для моделирования воздействия на вещество потоков лазерно-ускоренных заряженных частиц и вторичного электромагнитного и корпускулярного излучения;
- Постоянно развиваемый высокопроизводительный вычислительный кластер (по состоянию на конец 2021 г. состоит из 50 вычислительных нодов двух типов: (1) 20 вычислительных серверов с процессорами 2×AMD Opteron 6300 Series (2×16=32 ядер на нод) с максимальной частотой 3.2 ГГц и 128 Гб оперативной

памяти, (2) 30 вычислительных серверов с процессорами 2×Xeon® Silver 4216 (2×32=64 ядер на нод) с максимальной частотой 3.2 ГГц и 64 Гб оперативной памяти. Общее число ядер составляет 2560. Также сервер содержит систему хранения данных с общим объемом памяти около 150 Тб).

Сотрудники Сектора (Рис. 3.27) работают по совместительству и образуют костяк Лаборатории физики плазмы, созданной в 2011 г. госкорпорацией РОСАТОМ во ВНИИА им. Н.Л. Духова в рамках организованного там Центра фундаментальных и прикладных исследований (ЦФПИ). Еще раньше, в 2009 г., по инициативе Сектора (тогда еще группы) соглашением, подписанным академиками О.Н. Крохиным и В.А. Садовничим, была учреждена совместная ФИАН-МГУ научно-исследовательская лаборатория «Релятивистской лазерной плазмы». Она создана для подготовки научных кадров и проведения фундаментальных исследований по взаимодействию световых полей релятивистской интенсивности с веществом, включая разработку теории, выполнение экспериментов, проведение численного моделирования, создание новых методов диагностики и диагностических устройств (со-руководители Лаборатории: от ФИАН – д.ф.-м.н., профессор В.Ю. Быченков и от МГУ **–** д.ф.-м.н., профессор А.Б. Савельев-Трофимов**).**

Рис. 3.27. Сотрудники Сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий (слева направо): С.Г.Бочкарев, Д.А. Гожев, И.И. Метельский, О.Е. Вайс, А.В. Брантов. На переднем плане – заведующий сектором В.Ю. Быченков. 2019 г.

В первые годы после создания, в Секторе был предсказан новый эффект лазерного ускорения ионов – их ускорение интенсивным «медленным» светом в однородных низкоплотных мишенях (Быченков В.Ю., Брантов А.В., Ковалев В.Ф.,

Говрас Е.А.). Основная идея состоит в первоначальном замедлении падающего лазерного импульса у фронтальной поверхности мишени и последующем ускорении импульса по мере распространения внутри мишени. Это позволяет эффективно захватить и синхронизировать движения лазерно- инициированного ускоряющего электрического поля и ионов. Эффективность предложенной модели ускорения подтверждена с помощью трехмерного численного моделирования для современных лазерных систем петаваттного уровня. Также, с использованием такого моделирования были исследованы различные режимы ускорения электронов из твердотельных и низкоплотных мишеней. Показано, что для достижения значительного выхода электронов мульти-МэВной энергии целесообразно создавать контролируемую преплазму, причем ее размер является основным параметром, характеризующим температуру и число горячих электронов, определяющих выход генерируемого ими рентгеновского излучения и его жесткость (Быченков В.Ю., Брантов А.В., Лобок М.Г.). Применительно к горячей плазме ЛТС, была построена модель аномального поглощения, связанного с возникновением большой эффективной частоты столкновений за счет ионно-звуковых флуктуаций, возбуждаемых неустойчивостью обратного тока, а также – с резонансным преобразованием электромагнитных волн в электронные плазменные колебания на таких флуктуациях вблизи критической плотности (Быченков В.Ю.).

В дальнейшем проводимые исследования по-прежнему шли в русле разработки физических эффектов применительно к лазерно-плазменному взаимодействию для экстремального света и ЛТС. Найдено аналитическое решение задачи об адиабатическом разлете лазерно-нагретого горячего цилиндрического шнура для плазмы с холодными и горячими электронами и несколькими сортами ионов. Получены аналитические выражения для энергетических спектров двухкомпонентной плазмы, состоящей из основной массы тяжелых ионов и легкой ионной примеси. Данное решение представляет интерес для лазерного источника нейтронов и интерпретации экспериментальных данных по радиальному ускорению ионов короткими лазерными импульсами. В последствии, лазерное ускорение ионов в цилиндрической геометрии получило аналитическое описание для кумуляции частиц в трубчатом световом канале/фокусе. Дана оценка эффективности генерации нейтронных вспышек лазерным импульсом в области фокуса при цилиндрической кумуляции ионов. (Ковалев В.Ф., Быченков В.Ю.)

Развита теоретическая модель, описывающая разлет плазменного слоя в вакуум при произвольном значении температуры электронной компоненты плазмы. На основании сравнения с известными предельными режимами, квазинейтрального разлета и кулоновского взрыва, а также с результатами одномерного электростатического моделирования, продемонстрирована хорошая точность предлагаемой модели в описании спектрально-энергетических и пространственных характеристик ионов, ускоряемых при разлете плазмы. Описана процедура получения связи характеристик ускоренных ионов с параметрами лазерного импульса и мишени применительно к качественным предсказаниям и описанию

результатов численного кинетического моделирования, а также экспериментов по лазерно-плазменному ускорению ионов. (Говрас Е.А., Быченков В.Ю.).

Предложена новая схема и разработана модель генерации сверхсильного магнитного поля под действием ультракоротких интенсивных лазерных импульсов в специально сконструированных мишенях. Выполненное трехмерное моделирование предсказывало генерацию сверхсильного квазистационарного магнитного поля в объеме порядка сотен кубических микрон фемтосекундным лазерным импульсом. Качественные оценки показывали, что продолжительность существования магнитного поля, создаваемое в рассмотренной миниатюрной конструкции может достигать десятков пикосекунд, что на много порядков больше, чем длительность лазерного импульса. (Брантов А.В., Быченков В.Ю., Корнеев Ф.А.)

В связи с обсуждаемой проблемой лабораторного моделирования астрофизических процессов в плазме с помощью мощных ультракоротких лазерных импульсов, на основе численного моделирования и развитой теоретической модели изучены процессы самоорганизации релятивистской двухпотоковой электрон-ионной плазмы: (1) нелинейные стадии филаментации электронных и ионных токов в плазме, (2) генерация магнитных полей и их эволюция. Показано, что обнаруженные магнитные диполи формируются в результате пинчивания и разрыва ионных филаментов, а также последующего перезамыкания магнитных силовых линий. Изучен процесс нагрева электронов и ионов в процессе филаментации, а также генерации немаксвелловских распределений частиц вблизи точек разрыва токовых филаментов – областей зарождения магнитных диполей. (Бочкарев С.Г., Быченков В.Ю.)

В связи с отсутствием прогресса в теоретическом описании хорошо известного эффекта резонансного поглощения лазерного излучения в неоднородной плазме Сектор в течении ряда лет работал над этой проблемой. В результате, была развита аналитическая теория нелинейного резонансного поглощения электромагнитного излучения в неоднородной плазме с учетом релятивистской нелинейности возбуждаемого плазменного поля в окрестности критической плотности плазмы, что существенно продвигает границу теоретического описания резонансного поглощения лазерной плазмой в область высоких интенсивностей лазера. Получен коэффициент нелинейного резонансного поглощения в зависимости от четырех лазерно-плазменных управляющих параметров: лазерной интенсивности, масштаба неоднородности плазмы, ее температуры и угла падения лазерного излучения на плазму. Продемонстрирован нелинейный эффект подавления амплитуды поля плазменного резонанса и нелинейного «отключения» резонансного поглощения с ростом лазерной интенсивности. Также разработана аналитическая теория генерации высших гармоник лазерным импульсом при таком нелинейном плазменном резонансе, которая демонстрирует формирование медленно спадающего, степенного типа, спектра высших лазерных гармоник и их

спектральную модуляцию, являющуюся уникальной особенностью релятивисткой нелинейности. (Метельский И.И., Ковалев В.Ф., Быченков В.Ю.)

В последние годы Сектор работал над новыми задачами лазерно-плазменного взаимодействия, которые имеют перспективы различных приложений для лазеров нового поколения высокой энергетики нс-диапазона и большой мощности в фс-импульсах с высоким контрастом, большой частотой следования, стабильностью параметров, повышенной интенсивностью за счет посткомпрессии и т. п.

Среди таких задач важное место занимала проблема достижения максимально возможного заряда кильватерно-ускоренного сгустка электронов с полным зарядом от десятков до сотен МэВ при использовании лазерных импульсов мощностью от сотни ТВт до ПВт уровня, что представляет интерес для радиационно-ядерных приложений. Здесь впервые удалось идентифицировать наиболее перспективный режим распространения лазерного импульса, и прежде всего в плазме околокритической плотности, – режим релятивистского самозахвата. Дано теоретическое обоснование последнего и показано, что он может быть реализован в неоднородной плазме, что, в той или иной мере, всегда имеет место в эксперименте. В режиме самозахвата дифракционная расходимость уравновешивается релятивистской нелинейностью, позволяя распространение импульса в плазме на расстояние, во много раз превосходящее длину Рэлея при практически неизменном диаметре лазерного луча. Предсказанные большие заряды генерируемых электронных сгустков мульти-нК уровня, открывают путь к созданию эффективных источников гамма-излучения, позитронов и фотоядерных частиц.

На основе самосогласованного многомерного численного моделирования с использованием PIC и GEANT4 кодов выполнен расчет выхода гамма-излучения МэВного диапазона, фотоядерных нейтронов и элементарных частиц (электрон-позитронных пар и пионов). На основе численных расчетов с визуализацией облучаемых объектов обоснована возможность использования режима релятивистского самозахвата для глубокой радиографии в плотных тяжелых средах и для электронной радиотерапии в биоткани. Большой общий заряд ускоряющихся электронов обуславливает их эффективное бетатронное излучение. Проведенное трехмерное моделирование продемонстрировало как движение ускоренных электронов приводит к генерации рентгеновского излучения с энергией фотонов (0,1 –1) МэВ, низкой расходимостью и высокой яркостью, что является рекордными параметрами. В силу важности и большого объема упомянутых работ, здесь были привлечены достаточно большие силы Сектора (Быченков В.Ю., Лобок М.Г., Брантов А.В., Ковалев В.Ф., Вайс О.Е.).

Характеризация лазерных импульсов сверхвысокой интенсивности, и прежде всего для установок, только сейчас вводящихся в эксплуатацию или строящихся, требует нетрадиционных диагностик. В этой связи, разработаны теоретические основы нового метода диагностики параметров (и прежде всего интенсивности) релятивистски сильных лазерных импульсов на основе прямого ускорения электронов и протонов для практически используемых систем острой фокусировки.

Он основан на измерениях углового и спектрального распределения частиц, непосредственно ускоренных лазерным импульсом, сфокусированным в разреженный газ. Описание всех 6 компонент лазерного импульса, сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом, велось с помощью интегралов Стрэттона–Чу. Это позволяет моделировать пучки с различными пространственно-временными профилями, включая случай фокусировки в дифракционный предел. Была проанализирована взаимосвязь характеристик распределения электронов и протонов с параметрами лазерного импульса. Аналитические и численные результаты обосновывают новый метод лазерной диагностики.

Рассмотрен круг задач, связанный с интересным явлением стохастического лазерного нагрева электронов в сложных электромагнитных полях. В частности, к этому относится случай, отвечающий интерференции нескольких перекрывающихся релятивистски интенсивных пучков пикосекундного лазерного излучения вблизи границы плазма-вакуум. Для идентификации стохастического механизма нагрева и ускорения электронов был применен метод тестовых частиц, позволяющий описать траектории в заданных ЭМ полях, а также квазилинейная теория, позволяющая предсказывать эволюцию функции распределения частиц по импульсам в процессе стохастической диффузии для частного, но важного случая динамики частиц в двух встречных волнах. Показано, что процесс набора энергии происходит в два этапа: первичный процесс медленного стохастического нагрева и следующий за ним быстрый этап регулярного ускорения при резонансном взаимодействии частицы с одной из волн рассматриваемого волнового пакета. Спектры электронов хорошо описывается экспоненциальным распределением с температурой, существенно превосходящей пондеромоторную энергию, что качественно согласуются с результатами экспериментов. Стохастический механизм ускорения также хорошо проявляется при умеренных лазерных интенсивностях, например, в случае взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса с инновационным объемно-нагреваемым микроструктурированным покрытием мишеней, в виде многочисленных субмикронного диаметра волосков. В такой прозрачной, но высокой средней плотности, среде электроны испытывают хаотическое движение в сложных полях – лазерного импульса, падающего, рассеянного и отраженного, а также квазистационарных электростатическом и электромагнитном микрополях.

Проведенное трехмерное численное моделирование позволяет оптимизировать геометрические характеристики микроструктурированного покрытия для достижения максимальных поглощения лазерного излучения и энергии горячих электронов. С помощью метода ляпуновских показателей дано объяснение появлению суперпондеромоторных частиц как результат блуждания в сложных лазерно-плазменных полях, которое также обуславливает генерацию рентгеновского излучения. Как показало выполненное PIC-GEANT4 моделирование, данный дизайн мишени применим и для создания компактного источника термоядерных нейтронов с использованием фемтосекундных мульти-

мДж лазеров, допускающих высокую частоту повторения импульсов. (Бочкарев С.Г., Гожев Д.А., Быченков В.Ю., Брантов А.В., Тихончук В.Т.).

Сделан существенный шаг в понимании физики генерации мощных переходных поверхностных токов и эмиссии интенсивных униполярных терагерцовых импульсов при вылете с поверхности плазменных/металлических мишеней лазерно-нагретых электронов. Показано, что переходное излучение, возникающее при пересечении релятивистским электронным сгустком границы мишень-вакуум, имеет форму униполярного электромагнитного импульса, распространяющегося в вакуум и, как поле поляризации, распространяющееся вдоль границы мишени. Соответственно, генерируется импульс поверхностного тока (в скиновом слое), движущийся почти со скоростью света и с полным зарядом, равным заряду вылетевшего сгустка. Распространение такого зарядового поверхностного сгустка неоднократно наблюдалась в экспериментах, но только в проведенной расчетно-теоретической работе получило свое объяснение. Развитая впервые теория ближнего поля переходного излучения позволила также предположить, что экспериментально наблюдаемые импульсы лазерно-инициируемого переходного излучения терагерцового диапазона имеют именно униполярную форму, предсказываемую теорией, что ставит перед экспериментом задачу получения соответствующих данных в целенаправленных измерениях. (Брантов А.В., Куратов А.С., Быченков В.Ю., Ковалев В.Ф., Алиев Ю.М.)

Для условий ЛТС с прямым облучением, в области критической плотности плазменной короны, где происходит лазерное поглощение, возникают большие градиенты электронной температуры, приводящие к нелокальному теплопереносу вглубь мишени, который может давать предпрогрев плазмы перед фронтом тепловой волны, влияющий на адиабатичность сжатия. Так как условия загорания мишени требуют определенного режима сжатия, возникает необходимость понимания насколько эффект нелокальности требуется учитывать в расчетах динамики мишеней. Расчеты, проведенные с нелокальной моделью переноса, развитой в Секторе, продемонстрировали определенное снижение эффективности сжатия мишеней прямого облучения и деградацию параметров плазмы в момент зажигания, по сравнению с результатами расчетов с классической локальной моделью теплопереноса. Это свидетельствует о необходимости создания более сложной гидродинамической модели для ЛТС расчетов с включением в нее последовательного, более строгого, учета кинетических эффектов. (Глазырин С.И., Брантов А.В., Быченков В.Ю.)

Сектор выполнял не только расчетно-теоретические работы фундаментального, предсказательного характера или по интерпретации опубликованных в литературе данных, не имевших удовлетворительного объяснения, но также целенаправленные исследования, проводившиеся в тесном контакте с экспериментаторами, например, работающими на лазерных установках Центра ультрабыстрых оптических исследований – CUOS (Мичиганский университет, США), Отделения европейской лазерной инфраструктуры – ILI-Alps

(Сегед, Венгрия), Институт науки и технологии – GIST (Кванджу, Южная Корея), Международного лазерного центра МГУ и др. Так, для экспериментов в GIST (Южная Корея) по взаимодействию сверхмощных и высококонтрастных лазерных импульсов со сверхтонкими фольгами дано теоретическое объяснение сильной модуляции экспериментально наблюдаемых спектров ускоренных ионов поверхностной примеси благодаря тому, что высокий лазерный контраст предотвращает расширение плазмы на тыльной стороне, обеспечивая сильное разделение различных по массе ионных компонент (Быченков В.Ю.).

Для экспериментов, проведенных в Исследовательском центре Сакле (Франция), по лазерному нагреву CO2 кластеров дано много лет отсутствовавшее объяснение и подтверждение проведенным численным моделированием качественно разных ионных спектров в случаях фемтосекундного облучения основной и второй гармоникой лазерного света, основанное на сильно отличающемся контрасте для этих случаев (Быченков В.Ю., Брантов А.В., Бочкарев С.Г.). Наблюдавшийся в экспериментах CUOS (США) захват электронов длинной микропроволкой, облучавшейся коротким лазерным импульсом, и генерация ионов МэВной энергии с ее конца были объяснены разработанной в Секторе теорией и выполненным численным моделированием возбуждения быстрого поверхностного поля и тока. Предложенная диагностика лазерного импульса была апробирована интерпретацией данных эксперимента, выполненного в МЛЦ МГУ, по воздействию фемтосекундного лазерного импульса, фокусируемого в газообразный гелий под низким давлением в пятно размером, близким к дифракционному пределу. Расчетные спектрально-угловые характеристики напрямую ускоренных электронов оказались в хорошем согласии с экспериментальными данными, что позволяет судить о высокой надежности и хорошей точности предложенного метода диагностики.

В последнее время достигнут существенный прогресс на пути увеличения интенсивности фемтосекундных импульсов путем их укорочения после окончательного формирования в цепи стретчер-усилитель-компрессор. Эта технология, получившая название посткомпрессии, продемонстрировала возможность получения 10 фс импульсов ПВт уровня (ИПФ РАН) и поставила вопрос о возможности получения практического преимущества от использования таких коротких импульсов, получаемых без увеличения полной энергии. В рамках сотрудничества с ИПФ РАН по этой проблеме, Сектор провел поисковые исследования по взаимодействию экстремально короткого (~10 фс) лазерного импульса релятивистской интенсивности с тонкими фольгами, как правило используемыми для ускорения ионов, с кластерной средой для ее эффективного нагрева и с плоской мишенью, для генерации сверхинтенсивных поверхностных токовых импульсов. В первом случае были выявлены условия, приводящие к максимальной энергии ионов, и показано, что возможно ее увеличение по сравнению с более длинными импульсами той же энергии при условии не ухудшения остроты фокусировки лазерного света (Брантов А.В., Быченков В.Ю.).

Во втором случае, найдены условия согласования параметров кластерной среды и лазерного импульса, при которых для заданной энергии лазера выход горячих электронов оказывается максимальным, что благодаря их рециркуляции вблизи микрокластеров с перескоком на соседние микрокластеры приводит к эффективному излучению синхротронного типа (Гожев Д.А., Брантов А.В., Быченков В.Ю). В третьем случае, генерация переходных поверхностных электромагнитного поля и тока, вызваны практически мгновенным возникновением поля разделения зарядов вследствие облучения мишени сверхкоротким лазерным импульсом, приводящим к быстрой электрической поляризацией мишени с высокой проводимостью. (Брантов А.В., Быченков В.Ю, Куратов А.С.)

В настоящее время Сектор развивает свои направления исследований и решает новые задачи в лазерной физике высоких энергий, сотрудничая с институтами РАН и РОСАТОМ, а также мировыми лазерными лабораториями. Ежегодно Сектор организует и проводит Секцию «Экстремальный свет» в рамках конференции: International Conference on Ultrafast Optical Science ("UltrafastLight").

### 3.4.7 Сектор теории взаимодействия излучения с веществом (СТВИВ)

После Ю.В. Афанасьева сектором с 2001 г. заведует к.ф.-м.н. Канавин А.П. Основные направления проводимых Сектором исследований включают: взаимодействие лазерного излучения с веществом, лазерные технологии, теоретические основы нанофотоники и оптические свойства нано- и метаматериалов. В Секторе ведутся работы, связанные с физикой взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с веществом, в том числе применительно к развитию лазерных технологий прецизионной обработки материалов. Развивается теория оптических свойств широкого класса нано- и метаматериалов, включая их использование при создании приборной базы плазмонной наноэлектроники и нанофотоники и в биомедицинских приложениях. Проводятся также исследования по такой фундаментальной проблеме квантовой радиофизики, как свойства фотонов и их взаимодействия с квантовыми объектами (О.Н. Крохин).

В начале первого десятилетия в секторе развита гидродинамическая теория лазерной абляции металлов ультракороткими лазерными импульсами с низкой плотностью энергии (Канавин А.П.). Получено гидродинамическое обобщение двухтемпературной модели воздействия лазерного излучения на металл. В рамках этой модели найдены аналитические выражения для порога плотности энергии, вызывающей абляцию материала, от его теплофизических характеристик. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными. Исследована зависимость порогов лазерной абляции материалов от длительности лазерного импульса. В диапазоне пико- и фемтосекундных длительностей определены параметры импульса излучения, отвечающего наименьшему значению порога абляции данного металла.

Предложено самосогласованное описание кинетики электронов и фононов в металле с большим градиентом температуры электронов. Определено неравновесное распределение плотности числа фононов, сосредоточенное вблизи выделенной частоты и вытянутое вдоль оси распространения теплового потока. Показано, что «черенковская» генерация неравновесных фононов приводит к относительному подавлению электронного теплового потока. Продемонстрирована возможность быстрого разрушения решетки металла из-за генерации неравновесных фононов.

Найдена вероятность многофотонных межзонных переходов в полупроводниках под действием сильного электромагнитного поля с учетом эффектов переброса (Тимошенко В.Ю.). Показано, что учет этих эффектов приводит к значительному увеличению вероятности переходов зона-зона по сравнению со случаем, описываемым формулой Л.В. Келдыша. Определен порог пробоя полупроводников в поле ультракороткого лазерного импульса. Пороговые значения хорошо согласуются с экспериментом.

В 2000 - 2004 годах Климов В.В. с коллегами исследовали оптические свойства наночастиц различных форм (наносферы, наносфероиды, наноэллипсоиды, кластеры из наносфер, наноцилиндры, нанокубики и др.) и различного состава (диэлектрики, металлы) и влияние наночастиц на фундаментальные оптические свойства атомов, молекул и квантовых точек. На основании этих исследований установлена возможность с помощью наночастиц эффективно управлять фундаментальными процессами поглощения и испускания света. Построена физическая модель работы апертурных (SNOM) и безапертурных (ASNOM) оптических сканирующих микроскопов с отдельной молекулой в качестве объекта. Показана принципиальная возможность определения положения молекулы с нанометровым разрешением и ее ориентации в пространстве. Разработана теория спонтанного излучения атомов и молекул вблизи нанотел различной формы. Показано, что нанотела могут быть использованы для эффективного управления процессами спонтанного излучения, то есть для ускорения или замедления скоростей переходов. Особенно перспективными для этого представляются нанотела, сделанные из материалов, в которых возможно возбуждение плазмонно-поляритонных и фононно- поляритонных резонансов.

Еще одним направлением исследований было изучение возможности управления процессом когерентной передачи энергии электронного возбуждения от одного атома к другим. Разработана фундаментальная теория влияния наноокружения на процессы передачи энергии и показано, что с помощью манипуляции положениями атомов (например, с помощью иглы сканирующего микроскопа) возможно создание заданных квантовых суперпозиций нескольких атомов, что является принципиально важным для разработки квантовых компьютеров.

В 2005 г. Климовым В.В. с коллегами предсказан принципиально новый тип сильно локализованных плазмонных колебаний в системе двух близко

расположенных металлических наночастиц. Этот эффект приводит к большим (на несколько порядков величины) усилениям оптических полей в заданных заранее областях нанометровых размеров и может явиться основой для создания новых типов сканирующих наноскопов безапертурного типа, а также для создания других наноустройств, использующих нанолокализованные оптические поля.

Также Климовым В.В. теоретически исследованы в 2007 г. спектры плазмонных осцилляций в системе двух наночастиц произвольной формы и предсказано новое физическое явление - плазмонные молекулы. Они являются связанными состояниями локализованных плазмонов в кластерах наночастиц и в этом смысле аналогичны обычным молекулам. Плазмонные молекулы структурно устойчивы и характеризуются большими, сильно локализованными, электрическими полями. Плазмонные молекулы могут явиться основой для создания принципиально новых химических и биологических наносенсоров, а также полностью интегрированных оптоэлектронных наноустройств.

В начале второго десятилетия впервые в секторе ТВИВ в прямом эксперименте измерена гидродинамическая эффективность взаимодействия лазерного излучения с веществом. При энергии лазерного излучения 9,4 Дж эффективность взаимодействия его с Al мишенью составила 4,3 %. Это означает, что минимальное значение лазерной энергии, необходимое для поджига лазерного термоядерного синтеза, на порядок величины больше известных оценок. Отсюда понятно, что гибридная ядерно-термоядерная схема получения энергии более предпочтительна.

Развита самосогласованная модель схлопывания пор в металлических покрытиях при воздействии на поверхность импульсов лазерного излучения. Модель учитывает «локальное» движение жидкости вблизи произвольно выбранной поры, приводящее к затеканию жидкости внутрь поры и вызывающее изменение её размеров, а также «макроскопическое», усреднённое движение жидкости от поверхности к фронту плавления, вызванное изменением занятого жидкостью объёма. В квазистационарном приближении постоянной скорости плавления определена ширина области, в которой происходит процесс схлопывания.

Проведено теоретическое исследование и численное моделирование процессов лазерного наноструктурирования, при переносе вещества под воздействием прямых лазерных импульсов (лазерная печать). Рассмотрен процесс лазерного переноса тонкой пленки материала. Получено численное решение задачи о переносе слоя вещества при абляции материала под действием лазерных импульсов. Получена зависимость температуры на границе «конденсированное вещество – пар» и толщина аблированного слоя от времени и энергии лазерного импульса. Найдено пороговое значение энергии лазерного импульса для начала переноса вещества. Проведено сравнение рассматриваемой модели с экспериментом для процесса переноса тонкой пленки арилтриазина.

В середине второго десятилетия в секторе ТВИВ изучены оптические и плазмонные свойства наночастиц кубической и родственных форм. Развита теория

экстраординарного прохождения света через нано-отверстия в металлической пленке, расположенной на поверхности планарного метаматериала. Обнаружен эффект усиления поля вблизи одиночного отверстия. Обнаружен новый физический эффект - асимметрия прохождения света через перфорированную металлическую пленку на фотонном кристалле (оптический диод без магнитных полей). Развита теория (в том числе квантовая) спонтанного излучения атомов и молекул вблизи наночастиц из киральных метаматериалов и обосновано применение металлической плёнки с решёткой киральных отверстий в качестве поляризатора оптического излучения с заданным распределением поляризации в пространстве. Разработан метод вычисления дальних полей планарных метаматериалов из наночастиц сложной формы, развита теория флюоресценции молекул вблизи гиперболических метаматериалов

Исследована динамика электризации наночастиц благородных металлов в воде фемтосекундными лазерными импульсами. Показано, что пороги развития релеевской неустойчивости меньше порога плавления золотых наночастиц в воде. Определено пространственное распределение остаточной пористости в цикле плавление – затвердевание материала при лазерном отжиге металлических покрытий с пористыми дефектами. Показано также, что оптическая нелинейность коэффициента поглощения металлических плёнок, нагреваемых фемтосекундными лазерными импульсами, может приводить к значительному увеличению контраста поглощённой энергии по сравнению с контрастом в распределении энергии в падающем пучке.

Определены основные ограничения, касающиеся повышения достижимой скорости радиационного распада квантовой системы вблизи поверхностей плоских метаматериалов. Показано, что ни диэлектрические слоистые структуры, ни гиперболические метаматериалы не способны обеспечить повышение скорости излучательного перехода более чем в 2 раза в полупространство, содержащее эмиттер. В то же время оказалось возможным существенное увеличение радиационной скорости в противоположном направлении.

Развита теория локальной радиочастотной гипертермии, сенсибилизированной суспензией наночастиц золота и кремния в физиологических растворах электролитов. Определены условия, в которых разогрев системы определяется внедрёнными наночастицами и почти не зависит от их проводимости. Показано, что в этом случае дополнительное тепловыделение при внедрении в раствор наночастиц определяется локальным изменением проводимости среды вблизи наночастицы вследствие изменения ионного равновесия в электролите.

В конце второго десятилетия было показано существование резонанса Фано в системе, состоящей из фотонного кристалла, покрытого перфорированной металлической плёнкой. Резонанс возникает при взаимодействии оптического таммовского состояния и волноводных мод в фотонном кристалле. Он проявляется в виде узкого провала в широкой линии таммовского состояния в спектре прохождения. На основании полученных результатов предложена конфигурация

сенсора, чувствительного к изменению показателя преломления среды, прилегающей к поверхности фотонного кристалла.

На основе модели фотона как «радиационного осциллятора» поля, перемещающегося в пространстве со скоростью света и имеющего нулевую массу покоя, построена волновая функция, описывающая фотонные состояния электромагнитного поля. Показано, что что все пространство, где присутствует поле, распадается на «домены» с размером порядка длины волны излучения, внутри которых поле коррелировано, а полная энергия поля равна энергии фотона.

Проведено исследование оптических свойства волновода, сделанного из би-анизотропного метаматериала с нетривиальной топологией обратного пространства. Найдено точное аналитическое решение задачи на собственные моды для волновода с цилиндрическим сечением и детально изучены топологически защищенные поверхностные состояния (ТЗПС). Обнаружено, что ТЗПС исчезают в случае, когда радиус волновода меньше критического, из-за размерного квантования азимутального волнового вектора, а также когда диэлектрическая проницаемость матрицы, в которой размещен волновод, превышает критическое значение. Полученные результаты важны для дальнейших исследований в области создания оптических интерконнекторов.

Проведены исследования процессов растворения кремниевых наночастиц и нанонитей при их нахождении в водной среде. Показано, что кремниевые нанонити с поперечным сечением порядка 100 нм проявляют устойчивость к процессам растворения в течение ~ $10^6$ с, в то время как нанокристаллические частицы диаметром от 5 до 100 нм начинают растворяться уже после нахождения в воде в течение ~ $10^5$ с. Полученные результаты могут быть полезны для биомедицинских и сенсорных применений кремниевых наноструктур.

В 2020-2021 гг. показано, что наночастицы кремния размером больше 10 нм, получаемые лазерной абляцией и фрагментацией кристаллов кремния в воде, демонстрируют эффективную двухфотонную люминесценцию и генерацию второй гармоники, что позволяет использовать их для нелинейной оптической визуализации на поверхности клетки. Найдено распределение температуры вблизи наночастиц в физиологических растворах под действием радиочастотного нагрева. Показано, что возмущение проводимости среды, вызванной присутствием наночастицы, существенно изменяет распределение выделяющейся в среде энергии и контраст температуры наночастицы и окружающей её жидкости. Продемонстрированно, что такие частицы могут быть использованы для создания перспективных радиофармацевтических препаратов в качестве носителей и сенсибилизаторов действия радионуклидов галлия и рения для диагностики и терапии злокачественных образований.

Показано, что эффективность радиочастотной гипертермии, сенсибилизированной суспензией лазерно-аблированных наночастиц кремния в физиологических растворах, существенным образом определяется соотношением частоты радиочастотного излучения и проводимости раствора. Определена

зависимость тепловыделения от размера и концентрации наночастиц. Методом молекулярной динамики исследована абляция пористой кремниевой мишени при облучении ультракороткими лазерными импульсами. Показано, что порог начала абляции снижается с увеличением пористости, и эффект более сильно выражен для случая ультрафиолетового излучения облучении. Для длин волн, при которых возможны лишь двухквантовые процессы межзонного поглощения излучения, изучена динамика процессов поглощения, нагрева и разрушения пористого кремния. Полученные результаты полезны для лазерно-абляционного синтеза наночастиц для биомедицинских применений.

## 3.5. Исследования по оптоэлектронике

В период с 2001 г. по 2019 г. исследования по оптоэлектронике выполнялись в Отделе оптоэлектроники (ОЭ), которым заведовал лауреат Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор Компанец И.Н., удостоенный в 2014 г. почётного звания «Заслуженный деятель науки РФ». С 2011 по 2019 г. он также являлся заместителем руководителя ОКРФ.

В отдел ОЭ по-прежнему входили четыре лаборатории: инжекционных лазеров, полупроводниковых лазеров с электронной накачкой, оптоэлектронных процессоров, сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации. Однако из лаборатории ПЛЭН весной 2001 г. выделилась научная группа к.ф.м.н. Козловского В.И., перешедшая вместе с прежним руководителем отдела ОЭ Поповым Ю.М. из Отделения КРФ в Нейтронно-физический отдел ФИАН, которым заведовал в то время директор ФИАН академик Крохин О.Н. На основе этой научной группы была сформирована Лаборатория лазеров с катодно-лучевой накачкой (ЛЛКЛН). В июле 2018 года в Троицкое обособленное подразделение ФИАН были переведены Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой из ОКРФ и Лаборатория лазеров с катодно-лучевой накачкой из Нейтронно-физического отдела. В конце 2019 г. в рамках реорганизации Отделения КРФ Отдел оптоэлектроники был упразднён, и оставшиеся три лаборатории отдела структурно перешли непосредственно в Отделение КРФ

.

### 3.5.1 Лабораторией инжекционных лазеров (ЛИЛ)

Лабораторией по настоящее время заведует лауреат Государственной премии СССР, д.ф.-м.н., профессор А.П. Богатов. Основным направлением работ по-прежнему остаются исследования инжекционных гетеролазеров и возможностей их применения в мобильной и спутниковой связи.

В первом десятилетии нового столетия в лаборатории развита физическая модель и создана теоретическая база для расчета излучательных характеристик высокояркостных полупроводниковых лазеров. Полученные результаты использованы для создания мощных поперечно-одномодовых полупроводниковых квантоворазмерных гетеролазеров гребневого типа в совместных разработках

ФИАН – НИИ «Полюс». Кроме того, созданы гетеролазеры, излучающие в диапазоне 0.98 мкм, с близкой к дифракционному пределу расходимостью пучка ($M^2$ фактор оптического пучка на уровне 1.3 и менее) и мощностью излучения в непрерывном режиме свыше 200 мВт (Белкин М.А., Болтасева А.Е., Плисюк С.А.).

Определено влияние поглощения на свободных носителей на величину оптических потерь в полупроводниковых лазерах с гребневым волноводом на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs. Показано, что с увеличением тока накачки изменяется угловое положение и угловая ширина пиков в дальнем поле излучения лазера, работающего на вытекающих модах. Увеличение концентрации носителей в активных слоях сопровождается увеличением отклонения пучка по отношению к нормали грани диода и уменьшением его расходимости. Увеличение температуры волноводных слоёв по отношению к подложке приводит к уменьшению угла между осью пучка и нормалью зеркала. На основании численных расчетов определены пороги неустойчивости (филаментации) поперечного распределения интенсивности в различных конструкциях резонатора инжекционного лазера. Показано, что филаментация излучения в мощных полупроводниковых лазерах с широким контактом может приводить к 10-кратному снижению яркости излучения в них (Богатов А.П., Стратонников А.А.).

В ходе выполнения теоретических исследований излучательных характеристик мощных полупроводниковых лазерах, содержащих наклонную объемную фазовую решетку в резонаторе ($\alpha$-DFB лазер – Рис. 3.28), создано программное обеспечение для моделирования параметров оптического пучка и ватт-амперной характеристики таких лазеров.

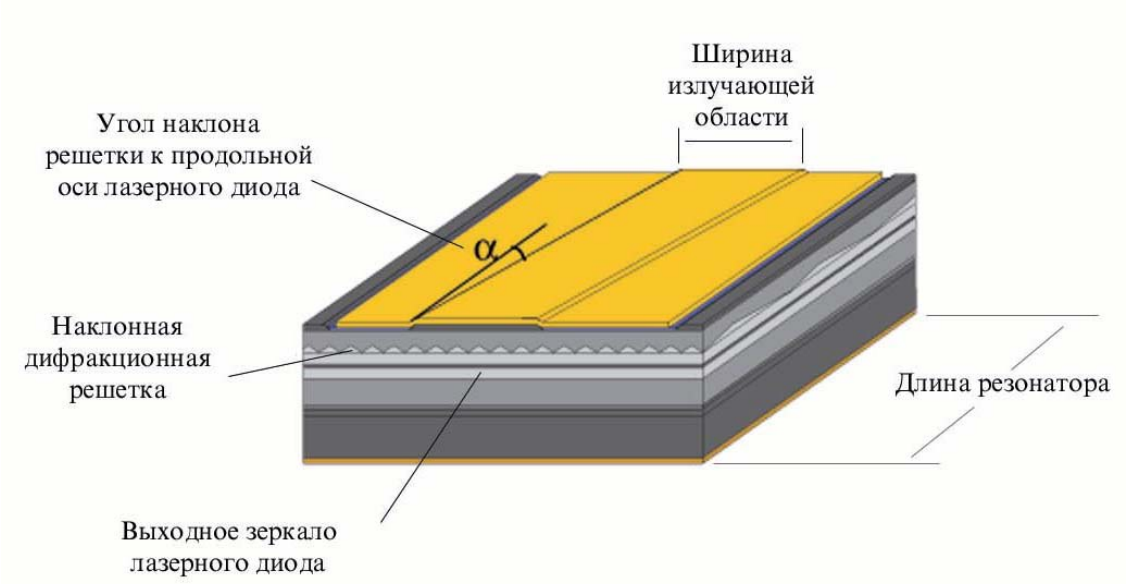



Рис. 3.28. Схема мощного инжекционного лазера со встроенной наклонной дифракционной решеткой, подавляющей возбуждение поперечных гармоник электрического поля

Расчеты с использованием созданного программного продукта легли в основу оптимизации (в рамках совместных работ) конструкции и последующего изготовления α-DFB лазеров в Институте сверхвысокочастотной техники Фердинанда Брауна в г. Берлине. Излучательные характеристики созданного α-DFB лазера (мощность излучения свыше 2 Вт в непрерывном режиме и значение $M^2$ фактора оптического пучка менее 1.8) на данный период относятся к рекордным в мировой практике для этого типа лазеров (Богатов А.П., Батрак Д.В., Дракин А.Е., Стратонников А.А.).

В начале второго десятилетия в ЛИЛ разработана физическая модель процесса катастрофической оптической деградации выходного зеркала мощного поперечно-одномодового диодного лазера, учитывающая наличие защитного покрытия выходной грани и токового ограничения вблизи нее. Проведенный на основе этой модели расчет позволил определить относительный вклад различных физических механизмов в разогрев выходной грани (Мифтахутдинов Д.Р.).

Разработана и опробована оригинальная методика измерения параметров Стокса для полупроводниковых лазеров. Экспериментально показано, что аномалии ватт-амперной характеристики диодных лазеров сопровождаются существенным падением степени поляризации излучения. Мера отклонения состояния поляризации от линейного может быть использована для характеризации качества изготовления лазера (Дьячков Н.В).

Численным моделированием показано, что основным параметром, определяющим быстродействие оптического усилителя-модулятора, является сечение для стимулированных переходов (дифференциальное усиление) в активной области. Достижимое для современных гетероструктур с квантоворазмерными активными областями значение сечения на уровне $3 \cdot 10^{-15}$ $см^2$ способно обеспечить в усилителе-модуляторе модуляцию СВЧ- сигналов с интенсивностью более 1 Вт и информационной емкостью более 20 Гбит/с (Богатов А.П., Дракин А.Е.).

Впервые получено аналитическое решение (в квадратурах) задачи о распространении квазимонохроматичского оптического сигнала в полупроводниковом усилителе, при гармонической модуляции его тока накачки. Показано, что выходное излучение имеет смешанный тип амплитудно – фазовой модуляции (Дьячков Н.В). .

Разработана система резонансной диодной накачки для мощного лазера на неодимовом стекле с запасенной энергией в активном элементе 260 Дж, усилением выше 0.08 $см^{-1}$ и относительной пространственной неоднородностью около 3 % (Богатов А.П., Дракин А.Е., Стадничук В.И.).

В середине второго десятилетия в ЛИЛ разработаны методы расчета, связывающие характеристики выходного и входного модулированного излучения оптического диодного усилителя мощности, работающего в режиме глубокого насыщения усиления. Показано, что диодный усилитель может являться конвертором амплитудной модуляции в фазовую модуляцию с достаточно широкой частотной полосой преобразования ~10 ГГц. Продемонстрирована низкая

чувствительность выходной мощности усилителя от мощности входного пучка и его высокая энергетическая эффективность. Исследованы параметры избыточных шумов, связанных со спонтанным излучением самого оптического усилителя. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность развитой теории (Богатов А.П., Дьячков Н.В., Гущик Т.И., Дракин А.Е. – Рис. 3.29).

Широкие возможности управления параметрами оптического пучка инжекционного лазера (например, состоянием когерентности) позволяют рассматривать его использование в квантовой оптике, проблемы которой также исследовались в ЛИЛ (Манько М.А.). Ею введено понятие «скрытых» квантовых корреляций для несоставных систем кудитов (частиц со спином 1/2) и показана возможность их использования в квантовых технологиях наряду с использованием квантовых корреляций в запутанных состояниях составных систем. Показано наличие «скрытых» корреляций в аналогах состояний Белла двух кубитов на примере несоставной системы 4-уровнего атома и возможность их использования в сверхпроводящих системах, основанных на джозефсоновских контактах, образующих сверхпроводящие электрические контура.

Рис. 3.29. А.Е. Дракин настраивает установку

Изучена эволюция запутанности состояния двух мод в гауссовых состояниях параметрического усилителя и предложен метод расчета характеристики запутанности с помощью вычисления энтропии дискретных матриц плотности мод составной системы. Предложен метод изучения потери информации о состоянии параметрического усилителя при огрублении приближения дискретной матрицей

плотности исходной матрицы плотности с непрерывными переменными. Показано, что метод дискретизации отвечает применению нелинейного положительного отображения (нелинейного канала) к матрице плотности состояния параметрического усилителя.

Построена минимальная система (кворум) квантайзеров и деквантайзеров, задающих функции Вигнера и томографические вероятности, определяющие квантовые состояния кудитов. Разработаны новые методы вычисления символов физических наблюдаемых и томограмм состояний кудитов. Получены новые неравенства для коэффициентов сложения спинов, для энтропии и информации в многокудитных системах и в системах, не содержащих подсистемы, обсуждены возможные применения этих неравенств в квантовых технологиях. Дана геометрическая интерпретация состояний двухуровневых и многоуровневых атомов.

Показана связь новых оптомеханических экспериментов (взаимодействие фотонов с макроскопическими зеркалами) с экспериментами П.Н. Лебедева по измерению давления света. Обсуждены возможности наблюдения аналогов динамического эффекта Казимира для фононов при использовании акустических резонаторов с вибрирующими границами. Изучена роль параметрической раскачки квантового колебательного контура на основе джозефсоновского контакта для создания квантового генератора тока.

В последние несколько лет в лаборатории предложен и смоделирован новый тип интегрированного диодного оптического усилителя для мощной лазерной системы с когерентным сложением пучков. Выполнен расчет коэффициентов усиления в элементах усилителя, при которых реализуется оптимальное когерентное сложение. Показано, что в системе с задающим одночастотным генератором предложенный вариант усилителя обеспечивает пространственное управление выходным оптическим пучком средней мощностью порядка 10 Вт (Богатов А.П., Дракин А.Е.).

Выполнен анализ диодного лазера с внешним резонатором как задающего генератора для мощной диодной лазерной системы с когерентным сложением оптических пучков. Найдены условия применимости уравнений Лэнга – Кобаяши. Определены параметры внешнего резонатора, характеризующие устойчивость одночастотного режима генерации (Дьячков Н.В).

В рамках выполненного Манько М.А. томографического подхода к описанию аналитических сигналов, квантовых состояний и электромагнитных полей в волноводах на языке распределений вероятностей получены новые информационно-энтропийные неравенства для состояний квантовых систем и разработано представление квантового супрематизма для описания скрытых корреляций. Для случая одной частицы со спином 1/2 найдены новые квантовые неравенства на площади «квадратов Малевича», соответствующие неравенствам Белла. Предложена возможность экспериментальной проверки этого квантового неравенства.

В рамках теории квантового супрематизма предложен подход к описанию состояний и их эволюции для кудитов. Получены новые неравенства, характеризующие скрытые корреляции степеней свободы в системах без подсистем, а также корреляции в системах, содержащих две или более подсистемы (несколько кубитов), включая новые неравенства для энтропий фон Неймана и Цаллиса. Разработано новое вероятностное представление квантовых состояний с использованием полиномов Эрмита и получены явные формулы нелинейного сложения вероятностей, отвечающих правилу Борна и принципу суперпозиции при интерференции квантовых состояний, допускающих экспериментальную проверку, которая также предлагается. Квантовые состояния фотонов описаны набором классических распределений вероятности дихотомных случайных величин, содержащих полную информацию обо всех свойствах состояний, включая волновую функцию (чистые состояния), матрицу плотности (смешанные состояния), интерференционные явления при суперпозиции чистых состояний. Подход продемонстрирован на примере модели колебаний осцилляторов электромагнитного поля при наличии диссипации.

Используя правило Борна, было построено представление квантовых состояний таких систем как фотоны, многоуровневые атомы, кудиты, наборы спинов, в котором состояния, записанные в виде матриц плотности, имеют матричные элементы, выражаемые через распределения вероятностей дихотомных случайных величин. В результате. принцип суперпозиции волновых функций квантовых состояний удалось сформулировать как нелинейное правило сложения распределений вероятностей. Данное правило допускает экспериментальную проверку в квантово-оптических экспериментах

В 2021 г. в рамках нового, построенного в последние годы представления квантовых состояний, являющегося альтернативой волновой функции и называемого томографическим вероятностным представлением, изучены гауссовские состояния квантовых систем с квадратичным гамильтонианом (осцилляторные системы). В явном виде получены томограммы (вероятностные распределения) таких систем и изучены их статистические свойства, описываемые на языке новой энтропии. Используя вероятностное представление квантовых состояний, разработан метод оценки температуры квантовых систем с помощью томографического вероятностного распределения для объектов, колеблющихся при взаимодействии со средой.

Изучена связь различных представлений квантовых состояний, задаваемых квазивероятностями типа функции Вигнера, функции Хусими и распределения Глаубера-Сударшана с другими видами представлений типа оптических и симплектических томограмм. В формализме квантайзеров-деквантайзеров получены явные выражения распределения вероятностей, задающих состояния четных и нечетных кодов Шредингера. Предложен и разработан метод исследования поведения квантовых объектов, движущихся с учетом неинерциальности

ускоренных систем отсчета, а также обсуждено и изучено влияние нелинейностей при взаимодействии таких квантовых объектов.

Выполнено моделирование оптического спектра диодного лазера с вертикальным резонатором (VCSEL) в режиме прямой модуляции тока накачки в диапазоне частот 1÷5 ГГц для целей метрологии (Богатов А.П., Дракин А.Е, совместно с сотрудниками группы Величанского В.Л. из ЛСЧ).

Получены новые экспериментальные результаты по пространственному и спектральному распределениям интенсивности излучения в интегрированных диодных излучателях (диодных линейках с брэгговским зеркалом). Полученные данные свидетельствуют о перспективности таких излучателей для оптической накачки газов щелочных элементов (Гущик Т.И.).

### 3.5.2 Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (ЛПЛЭН)

Лабораторией заведовал лауреат Государственной премии СССР, д.т.н., профессор А.С. Насибов, но в 2018 г. она стала лабораторией Троицкого обособленного подразделения (ТОП), поскольку расположена на Троицкой площадке ФИАН. Кроме того, в связи с уходом в нейтронно-физический отдел ФИАН в 2001 г. научной группы Козловского В.И., специализирующейся на технологии изготовления лазерных экранов электронно-лучевых трубок, основными задачами лаборатории ПЛЭН стали исследования технологии прямого лазерного переноса вещества, воздействия убегающих электронов газового диода с взрыво-эмиссионным катодом на полупроводниковые мишени из соединений $A_2B_6$, разработка оптического элемента для модуляции добротности лазеров, а также продолжающаяся разработка лазерных аппаратов и их использование для медицины и технологий.

В первом десятилетии нового столетия существенные успехи в лаборатории достигнуты в области разработки новых лазеров для медицины (рук. группы Пономарёв И.В.). На основе базового модуля лазеров на парах меди и золота разработаны, сертифицированы и прошли апробацию в ряде центральных медицинских учреждений России и за рубежом следующие лазерные аппараты (Рис. 3. 30):

1) Лазерный аппарат на парах золота («АУРАН») для лечения онкологических заболеваний. Решением Международного жюри IV Международного салона промышленной собственности аппарат награжден в 2001 г. серебряной медалью «АРХИМЕД»;

2) Лазерный аппарат на парах меди («ЯХРОМА-МЕД») для лечения кожных заболеваний. Решением Международного жюри IV Международного салона промышленной собственности аппарат награжден золотой медалью «АРХИМЕД» (2001 г.). На национальном конкурсе «Российская марка» аппарат награжден Золотым Знаком качества «Российская марка» (2002 г.). На конкурсе «Высокие технологии в медицине» Сибирской ярмарки «МИДСИБ-04» аппарат награжден

золотой медалью (2004 г.). Получено разрешение на мелкосерийное изготовление аппарата на производственной базе ФИАН;

**а**

б

Рис. 3.30. Лазеры для медицины: (а) на парах меди для лечения кожных заболеваний; (б).на парах золота для лечения онкологических заболеваний

Использование “Яхромы-Мед” позволило провести лечение более 1500 пациентов - детей в Российской детской клинической больнице с серьезными сосудистыми дефектами кожи - капиллярными ангиодисплазиями (“винными пятнами”). Установка имеет рекордные по мировым стандартам характеристики, оригинальные технические решения, защищенные патентами и авторскими свидетельствами, современный дизайн. Она проста в обслуживании и может быть использована практически в любом медицинском учреждении. Селективность, точность дозировки, уникальный спектр воздействия позволяют получать отличные клинические результаты. Лечение не требует анестезии. По данным 2009 г., сертифицированный в РФ и на Украине аппарат использован в ведущих медицинских центрах для успешного лечения более 30 000 пациентов.

3) Лазерный аппарат для офтальмологии. Совместно с кафедрой глазных заболеваний Российского государственного медицинского университета (РГМУ) и позднее с Казахским НИИ глазных заболеваний (1995-2000 г.г.) были проведены исследования по применению лазеров на парах золота и меди для лечения глазных заболеваний – отслоения сетчатки и глаукомы. Было показано, что воздействие коротких интенсивных импульсов (30-100 мкс, до 100 кВт/см$^2$) приводит к эффекту гидродинамического удара с последующей локальной деблокадой склерального синуса. Особенностью нового аппарата является благотворное влияние для лечения глазных заболеваний желтой составляющей (578 нм) спектра излучения лазера на парах меди. Разработанный аппарат не имеет отечественных и зарубежных аналогов. В 2004г изготовлен и прошел приемо-технические испытания опытный образец такого лазерного аппарата. В последующие 2005-2006 г.г. по результатам испытаний было запланировано провести доработку, изготовление промышленного образца и сертификацию аппарата, но финансированием не поддержано.

В лаборатории ПЛЭН впервые показана возможность применения лазерного излучения для прямого (без деструкции) лазерного переноса (ПЛП) вещества с прозрачного носителя на заданный объект путем фокусировки лазерного излучения на границе двух сред – твердой прозрачной для излучения и среды с высоким коэффициентом поглощения (Баграмов В.Г. – Рис. 3.31). Применение ПЛП открывает новые возможности применения лазеров в скоростной печати любыми красителями и в технологических процессах изготовления изделий микроэлектроники, альтернативных фотолитографии, включая экраны дисплеев высокого разрешения, в том числе из органических светодиодов, электронные компоненты средних размеров, микроскопические источники электропитания. Для ускорения процесса переноса и повышения пространственного разрешения элементов предложена новая методика с применением лазерного усилителя яркости на парах меди, которая экспериментально проверена для пластиковых карт и книг с цветным изображением суперобложки.

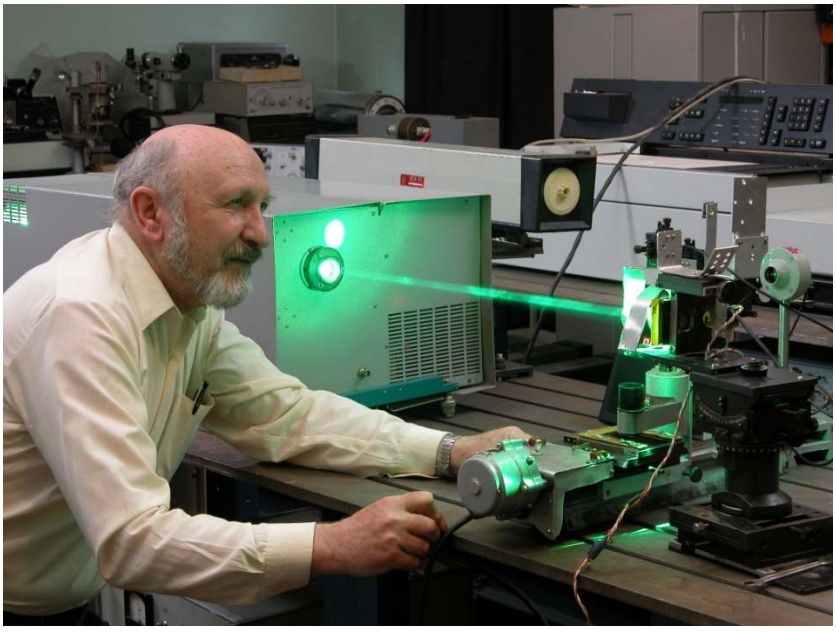


Рис. 3.31. В.Г. Баграмов проводит эксперимент (2011 г.)

В 2010 г. совместно с Институтом электрофизики УрО РАН исследовано воздействие убегающих электронов газового диода с взрыво-эмиссионным катодом на полупроводниковые мишени (ПМ) из соединений $A_2B_6$. При воздействии импульсов высокого напряжения в ПМ возникает импульсное лазерное излучение на длинах волн 440 – 520 нм, длительность которого с изменением давления от 0,1 Торр до атмосферного меняется от сотен до десятков пикосекунд. Излучение может быть использовано в медицине и при анализе переходных процессов.

Совместно с сотрудниками ИЭФ УрО РАН также создана оригинальная высоковольтная аппаратура для возбуждения полупроводников пикосекундными импульсами ($\tau = 10^{-9}$-$10^{-10}$ с, V = 200кВ, I = 1kA) электронного пучка и

электрического поля. В спектральном диапазоне 480-700 нм достигнута генерация лазерного излучения с минимальной длительностью 10 пс и максимальной мощностью до 10 кВт. На новый тип электроразрядного полупроводникового лазера оформлен патент. Впервые на таком лазере с активной средой из твердых растворов $A_2B_6$ удалось получить последовательную генерацию на нескольких спектральных линиях в видимом диапазоне спектра.

В 2013 г. создан новый тип электроразрядного полупроводникового лазера с фоконной лазерной мишенью. Применение фокона позволило развязать от высокого напряжения выходную оптику, увеличить изображение ближней зоны излучения и уменьшить расходимость излучения. Максимальная мощность излучения достигала 3кВт при длительности импульса около 1 нс.

С целью продвижения в длинноволновую область спектра (1-10мкм) разработана технология легирования монокристаллов $A_2B_6$ переходными металлами. Совместно с сотрудниками Одесского университета и ИОФАН исследованы оптические характеристики таких полупроводниковых кристаллов и показана возможность получения лазерного излучения в режиме поперечной оптической накачки полупроводника.

В середине второго десятилетия в ЛПЛЭН подготовлены и испытаны лазерные мишени (ЛМ) из тройных соединений $CdS_x Se_{1-x}$. Проведены эксперименты по накачке ЛМ пикосекундным разрядом. Грани пластин ориентированы ортогонально направлению распространения разряда. Такая конструкция ЛМ позволила значительно (до 10 кВт) увеличить мощность лазерного излучения в желто –зеленой области спектра.

Получена генерация пикосекундного лазерного излучения в диапазоне 520-700 нм. Исследована зависимость интенсивности излучения от длины волны. Максимальная интенсивность ($1{,}25 \cdot 10^6$ Вт/см$^2$), достигнутая в зеленой области спектра, монотонно снижалась в желто-зеленой области (~ 20%) и снова возрастала в красной до уровня ~ $0.9 \cdot 10^6$ Вт/см$^2$. Значение полученной интенсивности излучения открывает перспективы создания компактных пикосекундных полупроводниковых источников излучения большой мощности ($10^6 – 10^7$ Вт).

Разработаны и испытаны элементы новой конструкции газового диода с полупроводниковой ЛМ для комбинированного возбуждения полупроводников газовым разрядом и убегающими электронами. Создан стенд для исследования динамики лазерного излучения в пикосекундном диапазоне. При возбуждении полупроводниковых мишеней из сульфида кадмия субнаносекундным электронным пучком впервые получена интенсивность $10^7$ Вт/см$^2$, рекордная для полупроводниковых лазеров подобного типа. При такой интенсивности происходит насыщение поглощения в пассивной части ЛМ, что приводит к значительному повышению эффективности (10%) излучения газового диода. Наблюдаемый эффект может быть использован для создания оптического зонда с целью исследования убегающих электронов в плазме наносекундного разряда.

Исследовано возбуждение электронным пучком многоэлементных ЛМ газового диода при изменении давления в камере от $10^{-2}$ до атмосферного. Мощность лазерного излучения при энергии электронного пучка 200 кэВ и длительности 250 пикосекунд превышала 5 МВт. Максимальная достигнутая мощность для многоэлементной полупроводниковой ЛМ из CdS составила 10 МВт.

Модернизирован лазерный аппарат на основе паров меди для медицины. Аппарат отличает микроконтроллерное управление, современный дизайн и удобный для работы врача интерфейс. Аппарат прошел все необходимые технические и клинические испытания и регистрацию в МИНЗДРАВЕ РФ. В Северо-Западном медицинском университете (С.Петербург) аппарат успешно применен для лечения базально-клеточного рака кожи. Лечение проводится бескровно, без выраженных болевых ощущений, заканчивается без образования рубца, что отвечает современным требованиям дерматокосметологии и эстетической хирургии. Создан и испытан многопозиционный сканер для медицинского аппарата ЯХРОМА-МЕД.

В период 2017-2021 г.г. в лаборатории совместно с ИОФАН создана новая волоконно – оптическая система для синхронной регистрации динамических, спектральных и энергетических характеристик источников излучения во временном интервале $10^{-10}$-$10^{-8}$ с. Одновременная регистрация характеристик излучения в различных областях исследуемого объекта обеспечивает широкие информационные возможности и удобство в работе. Полное число волоконно – оптических каналов 12, из них 9 предназначены для регистрации динамики излучения. Динамика излучения регистрируется разработанной многоканальной высокоскоростной электронно-оптической камерой с разрешением от 40 до 200 пс, в зависимости от типа и длины оптического кабеля. Максимальное разрешение спектральной аппаратуры в области 500-700 нм составляет 0,06 нм. Рассмотрены переходные процессы в электрических и оптических каналах регистрации излучения.

Показаны возможности использования системы для исследования динамики свечения вдоль канала разряда в газах и полупроводниках, возбуждаемых ультракороткими импульсами электронного пучка или электрического поля. При исследованиях одновременно регистрировались: динамика, спектр и энергия излучения. Проведен теоретический анализ влияния формы импульса тока электронов на лазерное излучение полупроводниковой мишени. Показано, что в случае синусоидального импульса минимальное значение пороговой интенсивности может быть достигнуто до окончания длительности импульса.

Начато создание нового поколения лазерных медицинских аппаратов на парах меди с персонализированной настройкой параметров облучения для обеспечения максимальной эффективности и безопасности лазерного воздействия на таргетные биомолекулы в области патологического очага.

### 3.5.3 Лаборатория оптоэлектронных процессоров (ЛОЭП)

Лаборатория, которой до конца 2019 г. заведовал д.ф.-м.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР И.Н Компанец, проводила исследования в области

оптоэлектронных методов формирования и параллельной обработки массивов информации (оптических сигналов, изображений), прежде всего с целью их ввода-вывода, отображения и распознавания. В 2019 г. ЛОЭП вошла непосредственно в состав отделения КРФ, и её заведующим стал д.ф.-м.н., профессор Е.П. Пожидаев.

В 2001-04 годах Андреевым А.Л., Пожидаевым Е.П. и Компанцом И.Н. (Рис.3.32) получено несколько результатов мирового и выше мирового уровня. Были исследованы термодинамические, электрооптические и электрические характеристики сегнетоэлектрических мезофаз, индуцированных за счёт бинарных взаимодействий жидкокристаллических и немезогенных молекул. Показана возможность чисто фазовой модуляции света в них. Разработан и изготовлен низковольтный бистабильный фазо-поляризационный модулятор света, ахроматический во всем видимом диапазоне, управляемый от компьютера (2…5 В), переключаемый за 0,3 мс (при напряжении 5 В) и способный сохранять без ограничений во времени любое из двух оптических состояний с оптическим контрастом не менее 200:1. Аналоги такого модулятора в мире на этот период отсутствовали.

Рис. 3.32. И.Н. Компанец, С.И. Торгова (сидят),
Е.П. Пожидаев (слева) и А.Л. Андреев в лаборатории

На основе физических принципов и технологических приёмов, разработанных совместно с немецкими и японскими коллегами, созданы жидкокристаллические сегнетоэлектрики (ЖКС) и низковольтные электрооптические ячейки на их основе для модуляторов света и активно-матричных дисплеев, обеспечивающие непрерывную физическую шкалу серого. В таких ячейках при амплитуде прямоугольных импульсов управляющего напряжения ±2…9 В впервые продемонстрирована модуляция света с частотой 20 кГц и пятью уровнями (битами)

серого и достигнута частота смены кадров 1 кГц, что превышало в 20 раз данный параметр у аналогов.

Совместно с Институтом физики им. Л.В. Киренского СО АН (г. Красноярск) созданы новые низковольтные (с напряжением насыщения ±5 В при чувствительности 3 В/мкм) жидкокристаллические композитные материалы для бесполяроидной модуляции света, основанной на принципе анизотропного светорассеяния. Исследованы светотехнические и вольт-контрастные характеристики композитов. Достигнуты параметры: минимальное время оптического отклика 15 мкс, оптическое пропускание до 60% с контрастом не менее 50:1. Эти результаты открывают возможность создания активно-матричных дисплеев на гибких подложках.

Показано, что эффект управляемого электрическим полем двулучепреломления существует у негеликоидальных ЖКС, обладающих объемной (собственной) бистабильностью и мультистабильностью. Изменяя амплитуду (или длительность) управляющего импульса напряжения, можно не только получать разную величину показателя двулучепреломления ЖКС (в пределах от 0,11 до 0,2), но и фиксировать ее (как и соответствующую величину светопропускания) при выключении электрического поля.

Совместно с МИФИ (Гончуков С.А.) Компанцом И.Н. предложен, разработан и запатентован вариант трехмерного дисплея с объемным экраном на основе многослойной быстродействующей жидкокристаллической (сегнетоэлектрической) среды и рассеяния в ней света (Рис. 3.33).

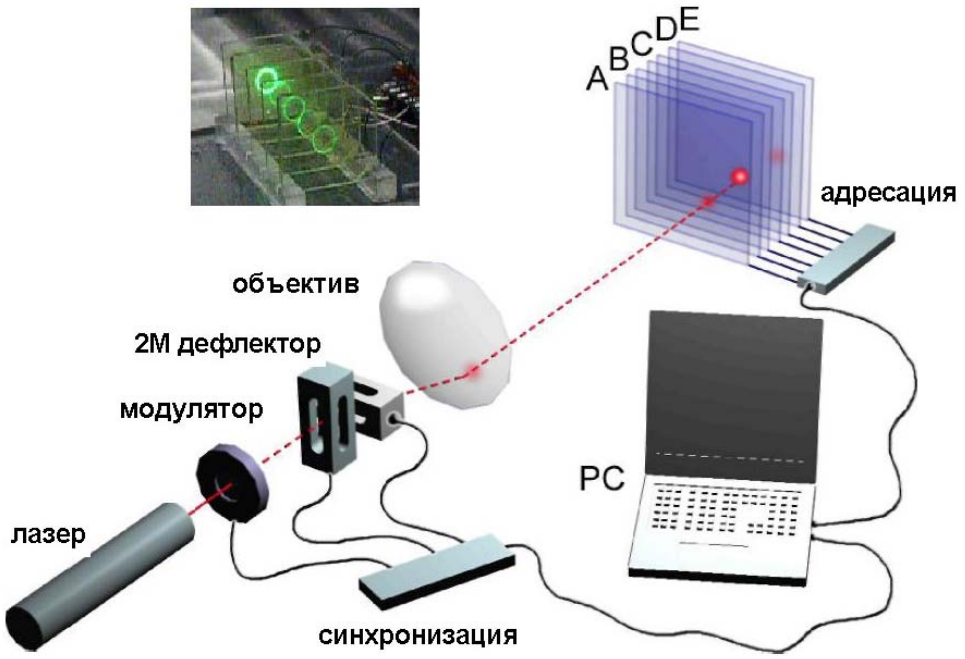



Рис.3.33. Схема экспериментальной установки 3D- дисплея с объёмным экраном, состоящим из пакета жидкокристаллических светорассеивающих модуляторов; на вставке – пример сформированного в объёмном экране светового макета 3D- объекта (отрезка трубы)

Создан экспериментальный макет дисплея и продемонстрирована его работа в реальном времени при поочередной адресации пяти слоев одновременно электрическим напряжением и световой картиной, формируемой двумерным лазерным дефлектором и представляющей собой сечение отображаемого трехмерного объекта. Достигнутое время включения-выключения рассеяния 150 микросекунд позволяло увеличить число слоев и глубину наблюдения объекта до 100 по сравнению с 20-тью у американского аналога DepthCube Z1024 3D Display компании Light Space Technology. Дисплей с объемным экраном формирует световой макет объекта и тем самым создает наиболее реалистичное изображение объекта с оглядыванием его с разных углов и расстояний многими наблюдателями одновременно. Свойство «ясновидения» обеспечивает дисплею возможность отображения и визуализации данных при решении многих важных практических задач в науке, промышленности, военном деле, а также в рекламной и развлекательной индустрии.

Предложен новый подход к синтезу мер сходства для решения проблемы различения сложных нечетких зашумленных сигналов и спектров. Он основан на объединении теории фильтрации сигналов и теории статистических решений и является дальнейшим развитием и применением метода максимального правдоподобия в статистической теории решений и метода фазо-портретных статистик, развиваемого в ФИАН (Компанец И.Н.) совместно с МГТА (Краснов А.Е.). Обоснован метод синтеза мер сходства путем линейной фильтрации образов, нелинейной фильтрации и введения матриц связности. Данный подход позволил синтезировать новый класс корреляционных мер сходства, обладающих высокой селективностью различения сигналов и спектров на фоне нестационарных помех. Он может быть использован в локации для обнаружения и распознавания объектов, в спектроскопии для различения нечетких спектров и т. п.

Впервые были разработаны методика и базовые устройства аппаратно распределенных параллельных оптоэлектронных систем многопараметрического нечеткого управления техническими объектами (Быковский А.Ю. – Рис. 3.34). Предложена архитектура составных нечетких контроллеров, созданы микроконтроллерные устройства для их "самообучения" и для управления параллельными схемами, разработаны программы и собран экспериментальный модуль отладки контроллеров. Это открывает возможность создания интеллектуальной системы нового поколения, позволяющей по единой методике построить как отдельного сложного робота в виде “коллектива” взаимодействующих подсистем, так и создать коллектив взаимодействующих робототехнических агентов, имитирующих действия группы людей.

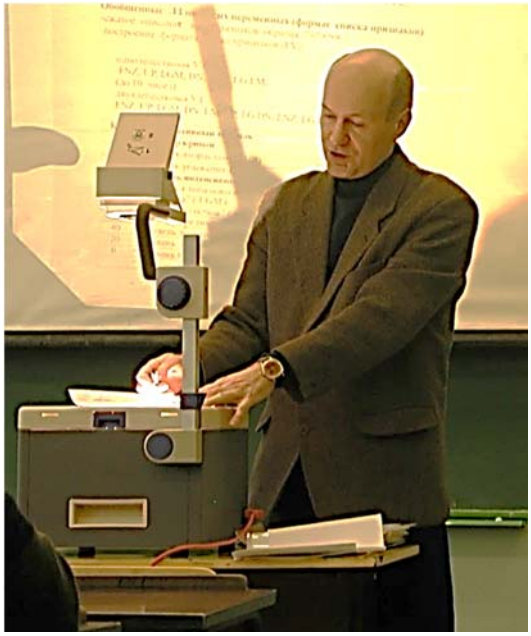


Рис. 3.34. А.Ю. Быковский выступает с докладом

Разработано устройство коррекции данных в узле перезаписываемой памяти оптоэлектронного контроллера, благодаря чему стало возможным методы так называемых генетических алгоритмов применять к многопараметрическому нечеткому контроллеру. Подготовлен вариант компьютерной оболочки для моделирования характеристик различных параметрических Т-норм. Это позволяет рассчитать выходные характеристики схемы оптоэлектронного нечеткого контроллера в случае применения различных вариантов проектируемых оптоэлектронных вентилей типа Т-норм, которые далее могут быть аппаратно установлены вместо ранее разработанных вентилей MINIMUM, MAXIMUM.

В середине первого десятилетия предложен и реализован метод получения непрерывной, безгистерезисной и запоминаемой после выключения управляющего напряжения шкалы уровней серого для матричного пассивно адресуемого жидкокристаллического дисплея нового поколения. Чтобы гистерезисные свойства ЖКС не влияли по-разному на величину управляющих электрических импульсов положительной и отрицательной полярностей, сотрудники ФИАН (Е.П. Пожидаев) совместно с коллегами из Университета Наук и Технологии Гонконга (В.Г. Чигринов) впервые создали ЖКС и ограничивающие его твёрдые поверхности со свойствами, позволившими резко увеличить коэрцитивную силу петли гистерезиса и сместить центр петли относительно нуля электрического напряжения. Теперь формирование безгистерезисной шкалы уровней серого стало возможным при управлении уровнем пропускания ячейки импульсами только одной полярности. На основе совместной разработки создан макет 64x64 элементов первого пассивно адресуемого дисплея с непрерывной шкалой серого, запоминаемой после выключения напряжения питания.

В конце первого десятилетия предложен (Компанец И.Н.) и реализован новый эффективный метод устранения спекл-шума в изображениях, формируемых лазерными проекционными системами, путем разрушения когерентности лазерного

пучка при его прохождении через быстродействующую ячейку с геликоидальным сегнетоэлектрическим жидким кристаллом, в котором при подаче последовательности биполярных электрических импульсов двойной частоты (450 и 3500 Гц) осуществляется случайная пространственно неоднородная и мелкомасштабная фазовая модуляция света глубиной ≥ пи.

Учитывая, что негеликоидальные СЖК по своей структуре наиболее близки к твердым нелинейно-оптическим кристаллам, впервые экспериментально изучена генерация разностных частот в ячейке с негеликоидальным сегнетоэлектрическим ЖК и определены условия фазового синхронизма для планарной и гомеотропной ориентации директора СЖК (Андреев А.Л.). Получена генерация шести разностных частот (соответствуют длинам волн 9.475, 7.45, 6.45, 5.9, 5.25 и 4.17 мкм) для шести линий спектра излучения аргонового лазера при выходной мощности 25 - 300 мВт и частоте модуляции излучения 5 Гц. Показано, что для СЖК с периодической структурой сегнетоэлектрических доменов (период доменной структуры 3 - 5 мкм) эффективность преобразования энергии при генерации разностных частот возрастает более чем в 1.5 раза по сравнению с эффективностью преобразования для СЖК без сегнетоэлектрических доменов. Для СЖК с периодическими деформациями смектических слоев (период ~ 5 мкм) максимальная эффективность преобразования энергии при генерации разностных частот составила около 3 % при суммарной мощности излучения на входе СЖК-ячейки порядка 125 мВт. Меньшая эффективность, чем при использовании периодически поляризованного ниобата лития, здесь компенсируется простотой технологии и малой стоимостью СЖК-ячейки.

В 2013 г. в ЛОЭП изготовлена электрооптическая ячейка со смектическим ЖКС, взаимодействие которого с поверхностью приводит к пространственно-периодической деформации смектических слоев. В такой ячейке Андреевым А.Л. осуществлена модуляция света с непрерывной серой шкалой и рекордными значениями частоты (7 кГц) и времени оптического отклика (25 мкс) при электрическом напряжении ± 1,5 В, что открывает возможность создания активно-матричных дисплеев и др. приборов с частотой кадров в несколько килогерц.

Разработаны и синтезированы новые хиральные мезогенные и немезогенные вещества из классов фторированных и лактатных производных терфенил-дикарбоновой кислоты, обладающие рекордной на сегодняшний день закручивающей способностью. В результате С.И. Торговой впервые созданы жидкокристаллические сегнетоэлектрики, шаг спирали которых порядка не превышал 50-80 нанометров. Пожидаевым Е.П. и Торговой С.И. разработаны и исследованы ЖКС, коэффициент Керра которых значительно превышает таковой у всех известных в природе материалов; в частности, он в 100000 раз больше коэффициента Керра нитробензола и в 2 раза больше, чем коэффициент Керра лучших современных образцов сегнетокерамики. Получен не чувствительный к знаку поля, безгистерезисный пороговый оптический отклик жидкокристаллического антисегнетоэлектрика.

С целью защиты информационных данных на основе аппарата дискретной многозначной логики (МЗЛ) Быковским А.Ю. разработаны оригинальные методы высокозащищенного секретного кодирования и аутентификации, позволяющие с помощью аппарата дискретной МЗЛ строить пространство случайных одноразовых ключей с размерностью более $10^{500}$ и передавать по открытым каналам связи защищенные команды в распределенной структуре взаимодействующих объектов. Для роботизированного интеллектуального агента, решающего, например, задачу маневрирования на местности. Впервые предложена методика построения многозначно-логической модели сцены, формируемой с помощью системы компьютерного зрения. Для упрощения получаемого логического выражения и сокращения времени вычислений использован алгоритм минимизации методом консенсуса. Показана необходимость решения задачи многокритериального выбора дополнительных точек функции на базе так называемого метода сужения множества Парето. Требуемая в этом случае гибкая коррекция набора критериев выбора дополнительных точек обеспечена их переключением с помощью отдельной многозначно-логической функции.

Для оптоэлектронной коммутации NxN оптических каналов Компанцом И.Н. предложен новый параллельной метод, основанный на поразрядной коммутации каналов, и два варианта его реализации в оптических волноводах: с использованием встроенных ячеек полного внутреннего отражения и фоторефрактивного эффекта в материале самого волновода. Оба варианта промоделированы на примере коммутации 8x8 каналов.

Предложена и подтверждена экспериментально (Пожидаев Е.П.) теория поверхностного потенциала жидких кристаллов, состоящих из двуосных молекул. Описан процесс возникновения двуосности спиральных наноструктур жидкокристаллических сегнетоэлектриков под действием электрического поля; разработаны физико-химические принципы управления величиной двуосности, методами молекулярного дизайна и материаловедения достигнута величина двуосности 0,055. Доказано, что эффекты би- и мультистабильности в жидкокристаллических сегнетоэлектриках являются прямым следствием двуосности надмолекулярной структуры. исследовано разрушение спиральной структуры ЖКС поверхностью, и впервые получено вырождение волнового вектора спиральной структуры под действием поверхности.

Андреевым А.Л. и Компанцом И.Н. впервые рассмотрен метод пространственно - неоднородной модуляции фазы света с использованием электрооптической ячейки, заполненной СЖК с бесспиральной (компенсированной) структурой. Использовался новый тип светорассеивающих СЖК с величиной спонтанной поляризации $P_s$ менее 50 нС/см$^2$. Изучен механизм разрушения фазовых соотношений в лазерном пучке, проходящем через ячейку, при индуцировании в ней электрическим полем мелкомасштабных случайно распределенных градиентов показателя преломления. Продемонстрировано подавление с помощью такой ячейки спекл-шума в формируемых лазером изображениях. Результаты измерения

контраста спекл-структур показали (А.Л. Андреев, И.Н. Компанец), что пространственно-неоднородный фазовый модулятор (деспеклер) на основе электрооптической ячейки с негеликоидальным СЖК имеет неоспоримые преимущества (по сравнению с использованием геликоидального СЖК), а именно: искажения в спектральном составе модулируемого излучения и остаточное светорассеяние при выключении электрического поля исключены вследствие отсутствия геликоида, а интервал частот модуляции света при напряженности электрического поля 2 В/мкм возрос вдвое – до 1 кГц, что расширяет диапазон возможных применений.

Е.П. Пожидаевым и С.И. Торговой разработаны СЖК с рекордно малым двулучепреломлением (0,07), что позволяет упростить технологию изготовления дисплейных ячеек за счёт перехода с толщины ячеек 1,5 микрометра на толщину 2,5 -3,3 микрометра. Кроме того, разработанные смеси позволяют понизить хроматические аберрации в СЖК ячейках из-за более слабой дисперсии двулучепреломления по сравнению с известными материалами. Разработан антисегнетоэлектрический ЖК с малым шагом спирали – около 30 нанометров (у зарубежных аналогов в 30 раз больше) и с широким температурным интервалом (от -2˚С до +76˚С) антисегнетоэлектрической фазы. Андреевым А.А. создан новый тип СЖК, переориентация директора в которых происходит за счет движения пространственно локализованных волн стационарного профиля – солитонов, возникающих при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии; при определенных условиях возникновение волн стационарного профиля приводит к образованию структуры переходных доменов, и как следствие этого, к интенсивному рассеянию света.

В области физики поверхности и объёмных ЖК-структур Е.П. Пожидаевым впервые создана композитная структура «полимер – нематический жидкий кристалл», обеспечивающая ахроматическую модуляцию излучения одновременно в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра (от 380 нм до 2500 нм). Экспериментально доказано, что разрушение спирали ЖКС пограничной твёрдой поверхностью происходит вследствие пространственных флуктуаций директора, которые не описываются в рамках современной классической физики ЖК и, таким образом, сформулировано новое направление дальнейшего развития теории жидких кристаллов.

Впервые показано (А.Л. Андреев), что процесс рассеяния света на динамической доменной структуре в негеликоидальных СЖК (с компенсированной спиралью) имеет бистабильный характер при определенном соотношении между амплитудой и длительностью биполярных импульсов управляющего напряжения, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК, периодом деформации слоев и толщиной электрооптической ячейки. Оба оптических состояния структуры, как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния, переключаются за десятки микросекунд и сохраняются в течение нескольких десятков секунд после

выключения электрического поля или до прихода импульса противоположной полярности. Изменение канала диссипации энергии позволяет уменьшить напряженность электрического поля, при которой достигается максимальная эффективность светорассеяния, до 2÷3 В/мкм и увеличить частоту модуляции света до 3÷5 кГц.

В области ориентации ЖК с помощью тонких полиимидных плёнок Е.П. Пожидаевым предложен новый принцип фотоориентации, суть которого в фотоанизотропной имидизации тонкого слоя (20 ÷ 100 нм) полиамидокислоты пиромеллитового диангидрида и 4,4’-оксиданилина (ПМДА-ОДА), сформированного на поверхности прозрачного слоя полупроводника ITO, нанесенного на стеклянную подложку.

На базе процедур логической минимизации алгебры Аллена-Живона показан (А.Ю. Быковским) принцип построения и упрощения логических функций, формируемых с помощью таблиц истинности в системе управления интеллектуальным агентом. Это связано с необходимостью выбора дополнительных значений логической функции, влияющего на принимаемое итоговое решение. Подобрана методика многокритериальной оптимизации, пригодная как для минимизации логических функций, так и для принятия решения роботизированным агентом. Разработана схема и ряд технических решений для демонстрационного макета высокозащищенной передачи команд между моделями стационарных и мобильного агента, маневрирующего благодаря компьютерному зрению.

В конце второго десятилетия в области разработки и исследования ЖКС С.И. Торговой было показано, что «бананообразные» ЖК на основе 3,5-дизамещенных 1,2,4-оксадиазолов при уменьшении длины молекулы (на два бензольных кольца) не демонстрируют спонтанную поляризацию и сегнетоэлектрический отклик в нематической фазе, как было установлено ранее для их более длинных аналогов. Рентгеноструктурным анализом и диэлектрической спектроскопией было подтверждено наличие у ЖК с короткими молекулами полярных сиботактических кластеров, но несмотря на это, удалось обнаружить только флексоэлектрическую поляризацию. Этот факт объяснён за счет значительного увеличения подвижности коротких молекул, что предотвращает возникновение спонтанной поляризации. Тем не менее, коноскопические исследования показали, что ЖК с короткими молекулами также обладают двухосностью в нематической фазе, как их аналоги с более длинными молекулами.

Экспериментально и теоретически обоснованы области применения традиционного потенциала Рапини и двуосного поверхностного потенциала при описании взаимодействия СЖК с пограничными поверхностями. Полученный Е.П. Пожидаевым с коллегами результат позволяет предсказывать монодоменную или полидоменную ориентациию СЖК, что важно для технологии изготовления модуляторов света.

Впервые разработан жидкокристаллический сегнетоэлектрик с шагом спиральной наноструктуры около и даже менее 50 нм. Показано, что в диапазоне 350

– 50 нм плотность дислокаций в электрооптических ячейках на основе спиральных наноструктур СЖК резко понижается при уменьшении шага спирали. Этот результат позволил достичь оптического качества DHF-ячеек, которое характерно для ячеек на основе НЖК.

Впервые разработаны и исследованы новые составы негеликоидальных СЖК для электрооптических деспеклеров (А.Л. Андреев), обладающие периодической деформацией смектических слоёв и солитонным механизмом переориентации директора при переходе к максвелловскому режиму диссипации энергии. В СЖК-ячейке они обеспечивают: максимально быстрый оптический отклик (десятки микросекунд) в прозрачном режиме с непрерывной серой шкалой в диапазоне частот модуляции до 6 кГц при управляющем напряжении менее ± 3,0 В; максимально быстрый оптический отклик (десятки микросекунд) в режиме рассеяния света, включая запоминание данных на время до десятков секунд; и максимально быструю пространственно-неоднородную модуляцию фазовой задержки короткими двухчастотными импульсами. Оптимизация режима питания (управления) и параметров электрооптической ячейки при использовании её в качестве деспеклера позволила впервые уменьшить оптический контраст спеклов до 0,07 и подавить спекл-шум в формируемых лазером изображениях с эффективностью 10,7 дБ.

В области обработки информации А.Ю. Быковским был развит криптографический метод “одноразового шифроблокнота” сверхвысокой размерности, основанный на дискретной многозначной логике и квантово-оптических генераторах случайных чисел. В кодере/декодере здесь может использоваться более $10^{60}$ случайных одноразовых ключей, размерность пространства которых превышает $10^{500}$ вместо ныне достигнутых $10^{30}$. Метод позволяет работать с большим числом логических переменных, шифровать произвольные наборы данных и создавать для технических систем структуру открытых и закодированных многопараметрических карт, т.е. сложную модель поведения и управления; обеспечивает удаленное шифрование и хранение произвольных наборов данных с их обратным декодированием. Исходно метод ориентирован на задачи защищенной связи и управления многоагентными системами (коллективами автономных роботов) и обеспечивает достаточно легкое наращивание модели при подключении новых устройств или датчиков.

Для решения задач позиционно-зависимой криптографии в сетевых схемах квантовой и неквантовой оптики разработан метод построения случайного предсказателя. Показано, что для практической реализации предсказателя целесообразно использовать методику построения переключательной функции на основе метода одноразового шифроблокнота. Функция может быть сформирована с помощью современных версий квантового генератора случайных чисел, а проверка равномерности распределения может быть основана на критерии Пирсона. Кроме того, на базе многозначно-логического алгоритма управляемого упорядочения/разупорядочения закодированной структуры знаний обоснован способ реализации схемы невозможности отказа от обязательств.

Для систем позиционно-зависимой криптографии мобильных агентов предложен метод квантовой верификации факта следования агента по заданному маршруту. Методика комбинирует квантовый протокол Д. Унру и схему построения случайного предсказателя на базе многозначно-логических функций алгебры Аллена-Живона и квантового генератора случайных чисел. В конечной точке назначения выполняется алгоритм верификации, основанный на перекрестной подстановке в процедуры протокола Д.Унру для массивов случайных данных

Экспериментально показано (Пожидаев Е.П., Барбашов В.А.), что планарно ориентированный слой СЖК толщиной 50 мкм может применяться как электрооптическая среда для фазовых ПМС, если он работает в режиме DHF-эффекта. Использовался СЖК на основе нехиральных бифенилпиримидинов в качестве жидкокристаллической смектической матрицы и трифторметилалкилового диэфира п-терфенилдикарбоновой кислоты в качестве немезогенной хиральной легирующей добавки. Совместно с Самарским филиалом ФИАН (Котова С.П., Самагин С.А.) изготовлена 12-секторная спиральная фазовая пластина и на её основе лабораторный макет генератора вихревых световых полей. Такой ПМС, способный формировать и генерировать с рекордной (до 3 кГц), частотой вихревые аксиально-симметричные световые поля с топологическими зарядами от 1 до 4, был использован для реконфигурации оптических ловушек в лазерном пинцете. Получена фазовая модуляция света с изменением эллиптичности менее 0,05 в диапазоне непрерывной электрической регулировки фазового сдвига от 0 до 2π на длине волны 632,8 нм.

Впервые экспериментально и теоретически показано (Е.П. Пожидаев, Киселёв А.Д.), что в дисплейной ячейке на основе электрооптического эффекта деформации планарно ориентированного геликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла (DHF-эффект) с субволновым шагом спирали и углом преднаклона молекул, близким к 40 градусам, возможно реализовать электрически управляемую переориентацию директора в одной плоскости, аналогичную переключению In Plane Switching (IPS) в дисплейной ячейке с нематическим ЖК, причём с использованием сплошных, а не встречно-штыревых электродов. Создана дисплейная ячейка с подходящими параметрами и в ней в режиме IPS получена модуляция света с частотой 1 кГц. Таким образом, сохраняя все достоинства IPS-режима в НЖК, реализация его в СЖК дополнительно обеспечивает многократный выигрыш в частоте модуляции и технологические преимущества, что открывает для СЖК новые перспективные приложения.

Разработаны жидкокристаллические сегнетоэлектрики с шагом спиральной наноструктуры 50- 70 нм, обеспечивающие безгистерезисное электрооптическое переключение на частоте до 5 килогерц, при управляющем напряжении менее 5 Вольт. Разработан и изготовлен макетный образец дисплейной ячейки на основе гомеотропно ориентированного слоя ЖКС с субволновым шагом спирали, работающей по принципу последовательного чередования цветов подсветки. Предложены и протестированы оригинальные решения по управлению оптическими

затворами с помощью гребёнки импульсов, обеспечивающие сохранение баланса нуля при использовании биполярных импульсов не одинаковой длительности.

Разработан эффективный однореакторный синтез азидоцианобутиратов и их производных из коммерчески доступных альдегидов и цианоацетатов (Торгова С.И.). Синтетический потенциал полученных соединений был продемонстрирован на примере их превращений в бициклические тетразолы в результате реакции (3+2)-циклоприсоединения.

В смесях нематического жидкого кристалла и немезогенных хиральных лактатов впервые получена сегнетоэлектрическая смектическая C* фаза с субволновым шагом спирали (около 100 нм). Впервые созданы композиты «полимер – жидкий кристалл», обеспечивающие электроуправляемую модуляцию светорассеяния с частотой до 100 Гц в широком спектральном интервале – от 300 нм до 2300 нм.

В 2021 г. в лаборатории в рамках совместного российско-израильского проекта разработан жидкокристаллический ферриэлектрик с температурным интервалом ферриэлектрической фазы около 40°C. Доказано наличие квадратичного электрооптического эффекта в этой фазе, который интерпретирован как ориентационный эффект Керра. Показано (Пожидаев Е.П.), что величина коэффициента Керра в ферриэлектрической фазе превосходит по крайней мере на порядок таковую у всех известных квадратичных электрооптических сред (сегнетокерамика, голубая фаза ЖК, спиральные наноструктуры сегнетоэлектрических ЖК, любые изотропные диэлектрики). Это означает, что разработана наиболее чувствительная к электрическому полю квадратичная электрооптическая среда фотонного биосенсора, впервые обеспечивающая одновременную спектральную регистрацию параметров сердцебиения, концентрации кислорода в крови и артериального давления.

В рамках исследований оптоэлектронных методов защиты информации в сетевых мультиагентных системах, для коллективной верификации данных на основе k-значной алгебры Аллена-Живона разработана модель многозначно-логического (МЗЛ) реестра, которая распространяет принципы блокчейна и связанного списка (linked list) на логические структуры описания модели агента.

В экспериментальных исследованиях также участвовали сотрудники и аспиранты Андреева Т.Б., Барбашов В.А., Бобылёв Ю.П., Казначеев А.В., Кузнецов А.В., Минченко М.В., Ткаченко Т.П. (Рис. 3. 35).

Рис.3.35. Сотрудники ЛОЭП (слева направо): в первом ряду – Н.А. Васильев, Ю.П. Бобылёв, Л.А. Соколова, С.И. Торгова, во втором ряду – А.Ю. Быковский, И.Н. Компанец, Е.П. Пожидаев, А.В. Кузнецов А.В. Казначеев, В.А. Барбашов, в третьем ряду – М.В. Минченко, Т.П. Ткаченко, И.Г. Рютин

### 3.5.4 Лаборатория сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации (ЛСООИ)

Лабораторией попрежнему заведует к.ф.-м.н. А.Н. Путилин, и она продолжает исследования по физике излучения лазерных диодов, генерации пикосекундных импульсов и волноводной голографии. Прикладными аспектами этих исследований стали разработки модулей синхронизации и тестирования быстродействия ОЭ компонент на основе пикосекундных лазерных диодов, интегральных осветителей и дисплеев на базе волноводных элементов и голограмм, а также разработка принципов пространственно-временного и спектрального уплотнения оптических сигналов для систем сверхплотной и сверхбыстродействующей передачи и обработки информации. Коллектив лаборатории продолжил сотрудничество с исследовательским институтом SAIT компании «Samsung» и с немецкой компанией Bayer Material Science.

В начале первого десятилетия был всесторонне исследован физический механизм конденсации электронно-дырочных пар в объёмных GaAs/AlGaAs *p-i-n* гетероструктурах при комнатной температуре. Распад конденсированного электронно-дырочного состояния (с числом пар более $10^8$) наблюдается в виде мощного фемтосекундного оптического импульса «сверхизлучения». Эта конденсация и сверхизлучение являются определяющими факторами генерации сверхмощных оптических импульсов с длительностью менее 1 пс. Установлены главные условия возникновения когерентного коллективного электронно-

дырочного БКШ-подобного состояния при комнатной температуре. Первым условием является наличие резонансного электромагнитного поля, фазирующего электроны и дырки, находящиеся у дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. Второе условие – высокая плотность электронно-дырочных пар (юолее $3 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$), при которой практически все уровни в полосе 40-50 мэВ от дна зоны проводимости заняты, что превосходит типичные концентрации лазерной генерации.

Построена теоретическая модель и проведено компьютерное моделирование процесса кооперативного излучения в 2- и 3-секционных гетероструктурах. Численные расчеты позволили смоделировать форму и длительность импульсов, оценить их пиковую и среднюю мощность. Были проведены предварительные оценки возможности использования лазерных структур на основе квантовых ям для целей генерации фемтосекундных импульсов сверхизлучения. Продемонстрировано, что многосекционные гетероструктуры с многоквантовыми ямами могут быть использованы в качестве как усилителей оптической мощности, так и эффективных насыщающихся поглотителей при сильном запирающем напряжении на них. Тщательная оптимизация геометрии и состава полупроводниковых структур позволила еще более сократить длительность импульсов сверхизлучения. В гетероструктурах на основе GaAs/AlGaAs она составила 180 фс при пиковой мощности более 120 Вт и частоте повторения до 40 МГц, что является абсолютным рекордом для данного типа лазеров.

Были также проведены эксперименты по активной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах с искривленными и наклонными волноводами. В результате получены оптические импульсы длительностью 3-5 пс с частотой повторения до 1 ГГц перестраиваемые в диапазоне длин волн 920-950 нм.

В середине первого десятилетия выявлены особенности записи и воспроизведения различных типов волноводных голограмм и разработаны методы обработки и реконструкции трехмерных изображений для систем хранения и отображения информации (Рис. 3.36). Волноводная голография сделала возможным интеграцию голографических методов обработки информации в планарную оптоэлектронную технологию. Проведены исследования причин возникновения искажений и шумов в волноводной голографии, в частности показано сильное влияние неоднородности мощности волноводной моды в области голограммы на уровень шума в восстановленном изображении. Тем самым была экспериментально продемонстрирована возможность подавления шумов и геометрических аберраций.

Рис.3.36. С.С. Копёнкин (слева) и Ю.П. Бородин настраивают оптическую схему записи голограмм

Предложены принципы построения планарных голографических дисплеев и созданы макеты голографических прицельных и визирных приспособлений, значительно облегчающих процесс наведения и отслеживания перемещения цели. Исследовались методы компенсации хроматических аберраций, предложен метод, использующий подложечные моды планарного волновода для формирования голографических ахроматических изображений. Разработан принципиально новый осветитель для цветных жидкокристаллических панелей, с трехкратным увеличением световой эффективности, по сравнению с традиционными осветителями. Предложен и запатентован новый вид универсальных просветно-отражающих ЖК дисплеев.

Предложен новый метод формирования трехмерных изображений на базе нейросетевых методов решения некорректных обратных задач, который позволил разработать новый тип стереодисплеев – нейростереодисплей. На это изобретение получены российский и американский патенты. Работающие образцы таких дисплеев, а также разработанный проекционный многоракурсный дисплей неоднократно экспонировались на выставках в Ганновере, Лас-Вегасе, Сан-Франциско. Фирма «Нейрок» занимающаяся коммерциализацией идеи нейростереодисплея, получила приз за лучший Российский инновационный проект 2003 года.

При исследовании сверхизлучения и кооперативного квантового когерентного состояния в полупроводниках экспериментально обнаружено, что сверхизлучение более когерентно, чем лазерное излучение. Показано, что корреляционная функция 1-го порядка, определяющая меру пространственной когерентности, близка к 1 для

случая сверхизлучения и равна 0,2-0,5 для лазерного излучения. Сверхкогерентность обусловлена установлением упорядоченного состояния в электронно-дырочной системе высокой плотности при комнатной температуре при сверхизлучающем фазовом переходе в GaAs. Показано, что эффективное время релаксации поляризации, которое определяет когерентность взаимодействия импульсов и среды, сильно зависит от ее оптического коэффициента усиления. При большом оптическом усилении эффективное время когерентности может превышать время поперечной релаксации более чем на порядок величины.

В полупроводниковых лазерах на основе квантоворазмерных структур GaN/InGaN на длине волны 407 нм экспериментально получены ультракороткие импульсы сверхизлучения с минимальной длительностью 1.4 пс при пиковой мощности около 3 Вт. В полупроводниковых структурах на квантовых ямах и квантовых точках экспериментально получены фемтосекундные импульсы сверхизлучения длительностью 300-400 фс на длине волны 1300 и 1580 нм. Впервые было экспериментально обнаружено сверхсветовое распространение импульсов сверхизлучения в полупроводниковой среде. Было измерено уменьшение группового показателя преломления в GaAs на 30-40 %% при генерации фемтосекундных импульсов сверхизлучения.

Впервые были экспериментально измерены статистические параметры фемтосекундных импульсов сверхизлучения. Обнаружено, что флуктуации времени излучения этих импульсов (40-50 пс) более, чем на порядок величины превосходят разброс лазерных импульсов, излучаемых в аналогичных полупроводниковых структура. Впервые была получена пассивная и гибридная активно/пассивная синхронизация мод в лазерах без внешнего резонатора. Получены рекордные по длительности для данного диапазона длин волн ультракороткие импульсы длительностью 2,4 пикосекунд, мощностью 280 мВт с частотой повторения 40-90 ГГц.

В середине второго десятилетия разработаны интегральные осветительные системы для компактного 3D голографического принтера на длину волны 472, 531, 655нм с общей дифракционной эффективностью до 80 %. Разработаны планарные осветители (соотношение продольного и поперечного размера 1:150) для когерентных RGB систем отображения трехмерной информации. Создана экспериментальная установка для записи гелий-кадмиевым лазером синтезированных RGB голограмм для планарных осветительных систем дисплеев (Рис. 3.37). Оптимизирован профиль дифракционной эффективности синтезированных голограмм для достижения однородности до 80% при размере голограмм до 230х 180 мм при синхронном воспроизведении RGB лазерными источниками.

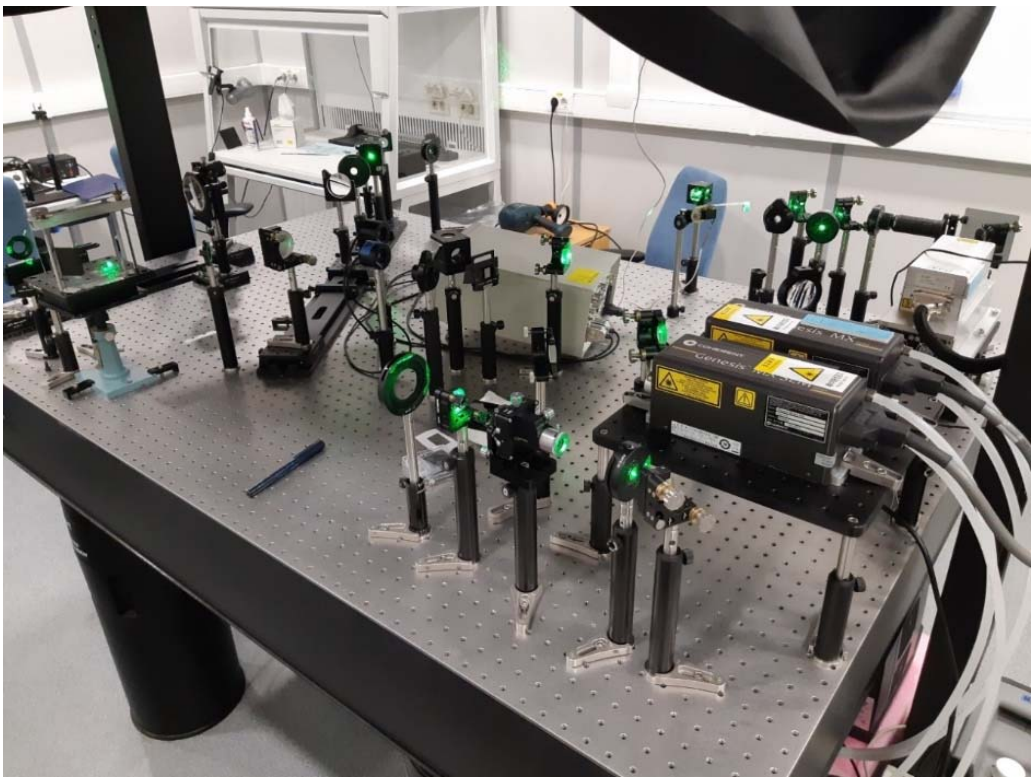


Рис. 3.37. Установка для записи цветных голограмм

Предложен новый тип 3D дисплея с континуальным ракурсом на базе адаптивного микропроекционного автостереоскопического дисплея. Экспериментально показан принцип работы и исследованы методы обработки информации для такого типа дисплеев. Исследованы методы построения интегрального виртуального голографического дисплея и для него предложены и запатентованы несколько схем интегральных осветительных систем.

Впервые экспериментально и теоретически доказано сильное влияние нестационарных динамических решеток электронно-дырочной плотности на процесс сверхизлучения в полупроводниковых структурах. Обнаружено, что динамические решетки населенности приводят к сокращению эффективного группового показателя преломления среды и соответствующему увеличению скорости распространения фемтосекундных импульсов сверхизлучения на 10-40 %.

Экспериментально обнаружено аномально яркое излучение голубого света при внутреннем удвоении частоты фемтосекундных импульсов сверхизлучения в активной среде полупроводниковых лазерных структур на основе GaAs/AlGaAs гетероструктур. Эффективность внутренней генерации второй гармоники более чем на порядок превосходила эту величину в обычном лазерном режиме. Эффект обусловлен возникновением нестационарного упорядоченного состояния электронов и дырок при сверхизлучении, появлением динамических когерентных решеток населенности и периодической модуляции нелинейной восприимчивости среды. Построена теоретическая модель взаимодействия фемтосекендных

импульсов сверхизлучения с динамическими решетками населенности, основанная на решениях полных уравнений Максвелла-Блоха.

Экспериментально измерены параметры градиентных многомодовых полимерных волноводов для использования в серхвысокоскоростных линиях связи малой дальности. Впервые проведены исследования дисперсии волноводов этого типа. Экспериментально измерена пропускная способность гибких полимерных волноводов в ближнем ИК диапазоне длин волн (750-800 нм) при распространении фемтосекундных импульсов, она составила около 150 ГГц х м.

Исследованы режимы работы осветительной системы голографического дисплея на базе синтезированных ПВО дифракционных элементов с компенсацией хроматизма. Получена рабочая система подсветки, полностью удовлетворяющая требованиям для подсветки экранов, размером 150 х 85 мм и толщиной всего 0,7 мм, работающая с диодными лазерами, излучающими на длинах волн 473, 532 и 633 нм. С помощью данного модуля подсветки была восстановлена полноцветная статическая голограмма.

Проведено исследование зависимости качества формируемого виртуальным (HMD) дисплеем изображения от параметров растровых оптических элементов, выявлены физические и технологические ограничения на использование растров в схемах дисплеев дополненной реальности. Разработана экспериментальная установка голографической записи фотонных кристаллов и большеразмерных (до 250 х 180 мм) синтезированных голограмм для когерентных осветителей Real 3D дисплеев. Для экспонирования регистрирующих сред использован лазер с длиной волны 442нм.

В конце второго десятилетия теоретически и экспериментально исследована генерация аномально яркой второй гармоники в режиме сверхизлучения в полупроводниковых гетероструктурах. Обнаружено, что физичекой причиной этого явления является глубокая периодическая модуляция электронно-дырочной плотности и коэффициента преломления среды, сопровождающая процесс генерации фемтосекундных импульсов сверхизлучения. Экспериментально и теоретически исследован режим генерации пикосекундных импульсов при скоростной модуляции коэффициента усиления в лазерах на квантовых точках, выращенных на кремнии. Получены импульсы длительностью менее 150 пикосекунд в лазерах с узким волноводом и одномодовым спектром.

Впервые методом когерентной оптической томографии экспериментально установлены квантовые свойства сверхизлучения, генерируемого полупроводниковыми структурами. В результате реконструкции квантового состояния продемонстрировано, что статистика фотонов сильно отклоняется от статистики Пуассона, а функция Вигнера сверхизлучающего состояния соответствует параметрам смещенного фоковского квантового состояния. Показано, что функция Вигнера имеет большие области отрицательных значений, не наблюдаемых в лазерном излучении, что доказывает квантовую природу сверхизлучения.

Проведено исследование оптических схем малогабаритных дисплеев дополненной реальности с использованием широкоапертурных голографических элементов. Изготовлен компактный прототип, формирующий на расстоянии двух метров полноцветное высококонтрастное изображение с угловым полем 90° по диагонали и с разрешением HD при соотношении сторон 16:9. Создана экспериментальная установка для голографической записи волноводных мультипликаторов выходного зрачка дисплеев дополненной реальности на трех длинах волн (472, 531, 635 нм) в фотополимеризующихся пленках, нанесенных на поверхность световодов толщиной размером 500 и 700 мкм.

Создана экспериментальная установка для записи на фоторезистивных слоях, на длине волны 442 нм голографических волноводных перископов, осуществляющих мультиплицирование выходного зрачка проекционной системы дисплея дополненной реальности. Проведено исследование методов расширения поля зрения голографических перископических волноводных дисплеев дополненной реальности и повышения их световой эффективности. Изготовлены прототипы дисплеев на базе рельефных голограмм, записанных в фоторезистивных слоях с последующим переносом рельефа фотополимеризующейся композицией на полимерный или стеклянный волноводы, угловое поле зрения которых достигало 60° по диагонали.

Записаны широкоугольные (до 90 град.) RGB голографические линзы для схем дисплеев дополненной реальности. Показана возможность использования записанных голографических линз в схемах виртуальных дисплеев с цифровыми динамическими голограммами, формируемыми LCOS- модулятором. Исследованы варианты использования голографических волноводных перископов в схемах дисплеев дополненной реальности, экспериментально показана возможность ахроматической работы таких перископов для угловых апертур виртуальных изображений до 60 градусов.

Показана возможность фазовой модуляции неполяризованного света планарно ориентированными слоями жидкокристаллических сегнетоэлектриков с субволновым шагом спиральной структуры. Кесаевым В.В. (Рис. 3.38) показано теоретически и доказано экспериментально, что этот новый тип фазовой модуляции можно описать в терминах топологической фазы Панчаратнама-Берри. Развит метод поляризационно-нечувствительной чисто фазовой модуляции света применительно к планарно-ориентированным ячейкам с СЖК, в котором реализован эффект деформированной спирали (DHF- эффект). Впервые экспериментально продемонстрирована высокоскоростная (4 кГц) модуляция света такого типа глубиной 2 π и решена давно известная проблема планарного вращения оптических осей. Показано, что анизотропные среды могут характеризоваться эффективным средним показателем преломления, равным полусумме собственных показателей. Метод, может применяться к широкому спектру модуляторов, включая ячейки Керра, Поккельса, сегнетоэлектрические керамики, а также жидкокристаллические и фотоупругие модуляторы.

Рис. 3.38. В.В. Кесаев

В 2021 г. в лаборатории экспериментально обнаружено, что в режиме квантового перехода при генерации сверхизлучения в полупроводниковых гетероструктурах при комнатной температуре выполняется критерий квантового вырождения, при котором фазовая плотность превосходит 1. Максимальное измеренное её значение составило 1,31, что подтверждает возможность неравновесной конденсации электронно-дырочных пар при комнатной температуре. С помощью оптической квантовой томографии были исследованы квантовые свойства сверхизлучения. Обнаружено характерное сходство как функции Вигнера, так и статистики фотонов сверхизлучения с параметрами смещенного Фоковского состояния. Измеренная чистота квантовых состояний сверхизлучения составила 0,91-0,94, что близко к теоретическому значению 1,0. Обнаружен осцилляторный характер функции Вигнера, что является проявлением квантовой интерференции в фазовой плоскости.

Разработано устройство голографической планарной подсветки для дисплейных систем. Разработан метод записи голографических бим-шейперов волноводного типа для коллимации излучения полупроводниковых лазеров на длины волн 467 нм, 532 нм и 634 нм с дифракционной эффективностью не менее 34%. Разработан метод формирования голографических волноводных устройств ввода-вывода брэгговского типа с неоднородным распределением дифракционной эффективности при помощи мастер-голограммы, позволяющий снизить требования к когерентности записываемого излучения. Созданы соответствующие стенды для записи и тестирования волноводных голографических осветителей.

Основными исполнителями указанных работ являлись Васильев П.П., Путилин А.Н., Бородин Ю.П, Копенкин С.С., Шумский С.А., Кесаев В.В., Сергеев С.Б., Жирков А.О., Морозов А.В., Дубынин С.Е., Копёнкин С.С., Перевозникова А.С., Львова К.И., Муравьев Н.В.

# Глава 4. РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ В ДРУГИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ ФИАН

## 4.1 Участие лабораторий Отделения оптики в лазерных исследованиях

Сотрудники Оптического отдела (затем Отделения оптики) ФИАН внесли существенный вклад в развитие лазерных исследований в ФИАН [21,22], начиная с участия в самых первых программах (открытой и закрытой), организованных Н.Г. Басовым в 1958 г. (Рис. 1.7). Ответственными исполнителями были известные оптики: П.А. Бажулин (руководитель отдела), М.Д. Галанин, В.Л. Левшин, А.М. Леонтович, В.И. Малышев, С.Г. Раутиан, И.И. Собельман, В.Ф. Туницкая. Результаты исследований позволили расширить перечень сред, перспективных для использования в лазерах. И в более позднее время руководители Отделения оптики Н.Н. Соболев, И.И. Собельман, В.А. Масалов, В.С. Лебедев уделяют серьёзное внимание работам по оптике, так или иначе связанным с КРФ. Например, исследования, проводимые в настоящее время под руководством директора ФИАН члена-корреспондента РАН Колачевского Н.Н. приближают создание эталонов частоты и времени с параметрами, предсказанными Н.Г. Басовым (Рис. 1.28).

### 4.1.1 **Создание первого в СССР рубинового лазера**

Сотрудникам лабораторий оптического направления принадлежит ряд выдающихся работ по созданию лазеров, выполненных в рамках программы Н.Г. Басова и позднее. Пионерской из них по праву является создание первого в стране рубинового лазера, запущенного в сентябре 1961 г. сотрудниками лаборатории люминесценции Галаниным М.Д., Леонтовичем А.М. и Чижиковой З.А. (Рис. 4.1).

Рис. 4.1. М.Д. Галанин (слева), А.М. Леонтович, З.А. Чижикова

Создание отечественного лазера потребовало изготовления специальных образцов рубина нестандартного качества: с пониженной концентрацией хрома (0,05% вместо 2,5% в часовой промышленности), гораздо бóльших размеров (с длиной стержней в несколько см вместо мм) и с повышенной оптической однородностью. В качестве ламп-вспышек для «накачки» рубиновых элементов были использованы лампы для ночных самолетных маяков, причём были известны

и оптимальные режимы электрического разряда через лампы-вспышки, обеспечивавшие продолжительный срок их службы. Зеркала первых лазеров были серебряными, и серебро напылялось прямо на полированные торцы рубинового стержня в вакуумной установке.

При исследовании характеристик первого рубинового лазера выяснилось, что хаос в пульсациях обусловлен тепловыми нестабильностями термических и оптико-механических свойств, вызываемых нагреванием той же лампой, что осуществляет и оптическую накачку. В исследованиях лазера участвовали молодые научные работники и аспиранты не только лаборатории люминесценции, но и других лабораторий: Попова М., Ведута А., Коробкин В., Щелев М., Можаровский А. и другие. На материале этих работ все они защитили потом кандидатские диссертации. Также В.С. Зуев, сотрудник Н.Г. Басова, с молодым П.Г. Крюковым освоили здесь лазерную технику и затем вместе с Басовым опубликовали статью о лазере на рубине с импульсной добротностью. На этой же установке была получена генерация и с американским образцом рубина, причём примерно с теми же параметрами, что и на отечественных образцах.

Статья с результатами исследования характеристик излучения первого рубинового лазера была опубликована в ЖЭТФ в 1962 г. и доложена научной общественности на III Международном Конгрессе по Квантовой Электронике в Париже в феврале 1963 г. Первый лазер на рубине демонстрировался на выставке научных достижений ФИАН в 1967 г., а затем был передан в отдел истории физики Политехнического института. Красный луч рубинового ОКГ стал наглядным свидетельством достижений в новой области науки и техники и побудил исследователей страны к новым поискам.

Запуск первого рубинового лазера стал событием в жизни ФИАН, и посмотреть на работу лазера шли многочисленные посетители. Директор ФИАН Скобельцын Д.В. постоянно интересовался ходом работы. Были и высокие гости: академическое начальство, зав. отделом науки ЦК КПСС академик Кириллин В.А. Иногда гостей сопровождал сам Н.Г. Басов. В частности, он привел Устинова Д.Ф., бывшего тогда заместителем Председателя Совета министров СССР. Для него излучением лазера прожигали бритвенные лезвия, возможно, для оценки перспектив применения мощного лазерного пучка в противоракетных системах ПВО.

М.Д. Галанин первым начал применять лазеры для исследования люминесценции веществ. Используя для этого возбуждение излучением рубинового лазера, он открыл двухфотонный дихроизм в жидкостях, тушение люминесценции сильными световыми потоками, антистоксово комбинационное рассеяние на электронных уровнях молекул красителей. Сущинский М.М. и Зубов В.А. исследовали резонансное вынужденное комбинационное рассеяние (при приближении частоты возбуждающего излучения к краю электронного поглощения исследуемого вещества), а Соколовская А.И. и ее коллеги обнаружили новое явление - формирование изображения в излучении ВКР, исходно присутствующего в возбуждающем свете.

### 4.1.2 Создание фотодиссоционного лазера

Другим ярким примером пионерских исследований служит создание оптического квантового генератора с фотодиссоционным механизмом создания инверсии, предложенным в 1961 г. С.Г. Раутианом и И.И. Собельманом в статье в ЖЭТФ и подробно изложенным в отчете ФИАН 1961 г. по программе Н.Г. Басова Основная идея предложения состоит в том, что поглощение световой энергии молекулами происходит в сравнительно широкой области спектра (примерно 1000 $см^{-1}$), тогда как ширина атомной линии излучения мала (в пределах 0,01 – 0,1 $см^{-1}$).

В Оптической лаборатории в научной группе Малышева В.И. с этой целью исследовались молекулы NaJ и TlJ, которые в результате диссоциации довольно ярко светились. Однако первая лазерная генерация на принципе фотодиссоциации была получена в 1964 г. Каспером и Пиментелем (США) на молекулах $CF_3J$ и $CH_3J$, которые излучали в ИК диапазоне при диссоциации под действием УФ. Источником накачки служила импульсная ксеноновая лампа с энергией питания на уровне килоджоулей при длительности разряда в десятки микросекунд, а мощность генерации в максимуме импульса составляла 0,5 киловатта. Фотодиссоциация этих молекул по связи C-J приводила к образованию преимущественно электронно-возбужденных атомов йода в состоянии $^2P_{1/2}$. Образующиеся при этом радикалы рекомбинируют в молекулы и, как было выяснено позже (Андреева Т.Л., Малышев В.И., Маслов А.И., Собельман И.И., Сорокин В.Н.), принимают участие в ряде важных для генерации химических процессов.

«Подсказка» американцев позволила сотрудникам В.И. Малышева реализовать фотодиссоционный лазер на атомарном йоде при фотолизе тех же молекул в считанные месяцы. Следует отметить, что если $CH_3J$ является сравнительно доступным соединением (это распространенный растворитель йодистый метил), то газ $CF_3J$ пришлось синтезировать самостоятельно химикам оптической лаборатории ФИАН. Были проведены исследования зависимости порога и энергии генерации от давления в более широком, чем у американцев, диапазоне значений. Наилучшие результаты были получены с использованием диэлектрических зеркал резонатора, а не зеркал с золотым покрытием. Максимальная мощность генерации в импульсе достигалась на соединении $CF_3J$ и составляла величину около 1 кВт. В исследованиях участвовали Андреева Т.Л. (Рис. 4.2), Дудкин В.А., Малышев В.И., Михайлов Г.В., Сорокин В.Н., Новикова Л.А.

Результаты работы, опубликованной в ЖЭТФ в 1965 г., открыли направление исследований различных вариантов фотодиссоционных йодных лазеров в нашей стране, в том числе со взрывной накачкой. В феврале 1968 года Н.Г.Басов организовал в лаборатории КРФ сектор под руководством И.И. Собельмана, в который перешли сотрудники группы В.И. Малышева – Андреева Т.Л., Маслов А.И. и Сорокин В.Н., продолжившие исследования по фотодиссоционной тематике.

Специальный интерес представляла оценка того, насколько прозрачна реальная атмосфера для излучения йодного лазера. Измерения были начаты на Звенигородской научной базе, а закончены в коридоре главного здания ФИАН. В

пределах ошибки измерений не было обнаружено ослабления лазерного сигнала, то есть было доказано, что атмосфера не препятствует распространению излучения фотодиссоционного йодного лазеа с $\lambda$ = 1,315 мкм на километровые расстояния.

Рис. 4.2. Т.Л. Андреева проводит эксперимент с фотодиссоционным лазером

Экспериментальные исследования показали, что картина спектра генерации имеет крайне нерегулярный характер (Волков В.Н., Зубарев И.Г., 1970 г.). В зависимости от условий эксперимента генерация происходит на одной, двух и редко на трех из шести компонент сверхтонкой структуры. Причины подобной нестабильности, как удалось выяснить (Алексеев В.А., Андреева Т.Л., Волков В.Н., Юков Е.А., 1972), в том, что картина спектра, по существу, определяется соотношением вероятности радиационных переходов и частот столкновений, приводящих к перемешиванию рабочих подуровней возбужденного состояния. Частота перемешивания подуровней основного состояния значительно больше соответствующей величины для возбужденного состояния, а также много больше, чем вероятность индуцированных радиационных переходов. В результате оказывается, что заселенности подуровней основного состояния в процессе генерации практически мгновенно становятся пропорциональными их статистическим весам, а изменяется во времени лишь суммарная заселенность основного состояния. Это обстоятельство позволяет считать нижний уровень общим для всех спектральных компонент, то есть использовать простую трехуровневую схему. Естественно, что генерация при этом может происходить только на двух наиболее интенсивных переходах F3 – F4 и F2 – F2. Для всех остальных линий коэффициент усиления ниже порогового значения.

В результате этих исследований было также выяснено, что зависимость частотного состава излучения йодного лазера от параметров активной среды, накачки и резонатора определяется безразмерным параметром δ, который характеризует отношение скорости «перемешивания» подуровней сверхтонкой структуры возбужденного состояния йода $^2P_{1/2}$ к скорости индуцированных радиационных переходов. При малой величине этого отношения ($\delta << 1$) генерация происходит на двух, а при большой ($\delta >> 1$) – на одной компоненте сверхтонкой структуры рабочего перехода йода $5^2P_{1/2} – 5^2P_{3/2}$.

В экспериментальном плане в дальнейшем проводились исследования основных процессов в среде йодного лазера и поиск новых рабочих молекул с накачкой импульсными лампами. Было показано, что практически весь атомарный йод, образовавшийся при фотодиссоциации соединений со связью углерод-йод, дает вклад в генерацию. Это обусловлено тем, что возбужденный йод не рекомбинирует в исходную молекулу (в отличие от атомов йода в основном состоянии), что весьма благоприятно для режима генерации.

Основная цель поисков новых рабочих молекул заключалась в повышении КПД лазеров за счет расширения спектра поглощения рабочих молекул и, кроме того, за счет использования различных химических реакций, сопутствующих фотодиссоциации. Внимание было уделено соединениям со связями кремний–йод, фосфор-йод и мышьяк-йод, на которых и была получена генерация. С другими элементами стабильных молекул с йодом в ФИАН синтезировать не удалось. В то же время удалось получить генерацию на синтезированном в ГСНИИОХТ соединении, содержащем связь сурьма-йод, которое всё же оказалось нестабильным при комнатной температуре.

Синтез многих исследованных соединений был произведен впервые. Оказалось, что фотодиссоциация молекул по связям йода с элементами 5-й группы приводит к образованию возбужденных атомов йода в состоянии $^2P_{1/2}$. Всего была получена генерация на 16 соединениях данного типа. Соответствующие полосы поглощения расположены в ультрафиолетовой области спектра, причем сдвинуты в длинноволновую сторону по сравнению с соединениями со связью углерод-йод и в несколько раз более интенсивны. Хотя исследования кинетики фотолиза этих соединений представляют научный интерес, для практики они оказались невостребованными по причине ядовитости.

Особо привлекательными казались соединения со связью кремний-йод, и на молекулах $SiF_3J$ и $SiCl_3J$ была получена генерация (Андреева Т.Л., Сорокин В.Н., Струк И.И., 1980 г.). Их рабочие полосы поглощения расположены в значительно более коротковолновой области спектра по сравнению с молекулами, содержащими связь углерод-йод. Поэтому была разработана специальная конструкция коаксиальной лампы, которая обеспечивала эффективную накачку в спектральной области короче 200 нм. Впервые были проведены детальные исследования процессов, сопровождающих фотодиссоциацию этих соединений. Было показано, что их фотолиз сопровождается рядом новых реакций, которым нет аналогий в ряду

ранее изученных соединений со связями углерод-йод, фосфор-йод и мышьяк-йод. Однако уже при малых накачках обнаружились цепные процессы, которые приводят к быстрому значительному разложению исходных молекул с наработкой сильного тушителя, что помешало использованию этих соединений в мощных йодных лазерах.

До сих пор речь шла о фотодиссоционном йодном лазере, работающем в импульсном режиме. Также была предпринята успешная попытка использовать проточный вариант этого лазера с накачкой ртутными лампами высокого давления. Была получена мощность непрерывной генерации около 1 Вт (Андреева Т.Л., Бирич Г.Н., Собельман И.И., Сорокин В.Н., Струк И.И., 1977 г.) и показано, что лазер подобного типа с накачкой стандартными ртутными лампами может обладать КПД преобразования электрической энергии в световую около 1% при выходной мощности более 1 кВт.

### 4.1.3 Реализация и исследование режима самосинхронизация лазерных мод

Важным достижением в области создания лазеров явились реализация и исследование режима самосинхронизация лазерных мод, осуществлённые в Оптической лаборатории В.И. Малышевым. Такая задача сразу возникла из режима работы первого твердотельного (рубинового) лазера, генерирующего нерегулярную последовательность «пичков» свободной генерации на протяжении сотен микросекунд. Тогда почти сразу был сформулирован принцип модулированной добротности, который после реализации позволил сконцентрировать энергию множества лазерных пичков в один мощный «гигантский импульс» длительностью в единицы - десятки наносекунд с большей на три-четыре порядка интенсивностью излучения в максимуме (по сравнению с режимом свободной генерации).

Первые модуляторы добротности представляли собой отражательную призму, служащую зеркалом лазерного резонатора и вращавшуюся с частотой в десятки килогерц. Более привлекательными казались электрооптические модуляторы, однако для их работы требовался электрический импульс наносекундной длительности с амплитудой в несколько киловольт. В начале 60-х годов работа с такими импульсами обеспечивалась уникальными электронными элементами и требовала от исследователя особых навыков. Кроме того, наводка от высоковольтного импульса срывала запуск регистрирующих приборов и «забивала» в них полезные сигналы.

Н.Г. Басов предложил В.И. Малышеву разработать совместно с химиками модулятор добротности в виде пассивного насыщающегося (просветляющегося) фильтра на основе раствора красителя, прозрачность которого возрастает с увеличением проходящего через него излучения. Такой оптический затвор представлял собой компактный элемент лазерного резонатора и не требовал управления. К работе были подключены сотрудники НИИХИМФОТО Левкоев И.И. и Вомпе А.Ф. Испытанием растворов красителей в группе В.И. Малышева занимались Маркин А.С. и Петров В.С. К 1966 году оптический затвор в оптической

лаборатории ФИАН был создан. Здесь исключительно уместным оказался опыт химиков по созданию фотохромных сред, затемняющихся под действием мощного светового излучения (в первую очередь от вспышки при взрыве атомной бомбы).

В процессе изучения лазера с просветляющимся красителем был обнаружен режим самосинхронизации мод, то еть режим, при котором «гигантский» импульс приобретал дополнительную структуру в виде регулярной цепочки импульсов пикосекундной длительности. Интенсивность излучения в максимуме пикосекундного импульса еще на несколько порядков повышалась по сравнению с обычным «гигантским» импульсом. О реализации режима самосинхронизации мод первыми сообщили в апреле 1966 г. всё же американские исследователи (ДеМария с коллегами), но учёные ФИАН (Кузнецова Т.И., Малышев В.И., Маркин А.С.) были настолько близки к самостоятельному обнаружению этого режима, что уже в сентябре 1966 г. послали в ЖЭТФ результаты первой в СССР исследовательской работы по самосинхронизации аксиальных мод в лазере с просветляющимся фильтром. Разработанный для этих целей краситель №3955 (из ряда полиметиновых в растворе нитробензола) от В.И. Малышева распространился по многим лабораториям и позволил выполнить много ярких работ с импульсами пикосекундной длительности.

В СССР многие группы исследователей хорошо понимали перспективу использования режима самосинхронизации мод и включились в работы по оптимизации лазеров с самосинхронизацией мод и по применению генерируемых ими пикосекундных световых импульсов. Было также высказано и реализовано несколько идей по методам измерения длительностей таких импульсов. В те годы единственной возможностью напрямую измерить длительность световых импульсов пикосекундной длительности были электронно-оптические камеры с разверткой. В СССР разработка таких ЭОПов опережала зарубежный уровень, однако число пользователей пикосекундных лазеров заметно превосходило количество выпускаемых камер. Поэтому в ходу были также косвенные нелинейно-оптические методы диагностики ультракоротких световых импульсов: двухфотонная люминесценция сред, генерация второй гармоники и другие. Заметим, что сегодня обновлённый метод самосинхронизации лазерных мод уже распространён на диапазон фемтосекундных длительностей.

### 4.1.4 Саморазогревной газовый лазер на парах меди

С начала 60-х годов по инициативе Н.Г. Басова и при поддержке П.А. Бажулина – тогдашнего руководителя Оптической лаборатории к поиску новых лазерных сред при импульсном возбуждении разрядом, в частности, в газовой фазе, подключился Г.Г. Петраш с сотрудниками (Рис. 4.3). В поле зрения их научной группы попал лазер на парах меди с весьма привлекательными энергетическими характеристиками излучения, созданный в 1967 г. В. Уолтером в США. Его недостатком была необходимость внешнего разогрева лазерной среды до

температуры 1500°С, что осуществлялось с помощью спирали из сплава платины с рением, намотанной на разрядную трубку из термостойкой керамики.

Рис. 4.3 Г.Г. Петраш (в центре) и сотрудники его группы (слева направо): .А.А. Исаев, К.И. Земсков, Г.Г. Петраш, М.А. Казарян, Г.Ю. Леммерман

В группе Г.Г. Петраша была предложена и реализована идея саморазогревного лазера, в котором разрядная трубка разогревается до необходимой температуры за счет тепла, выделяющегося в разряде. Для этого потребовалось разработать новую конструкцию разрядной трубки с дополнительной теплоизоляцией внутри вакуумной камеры. Уже в первой публикации Исаева А.А., Казаряна М.А. и Петраша Г.Г. (ЖЭТФ, 1972 г.) по саморазогревному лазеру на парах меди удалось достичь средней мощности излучения 15 Вт (на двух линиях – желтой и зеленой) при частоте повторения импульсов 20 кГц с КПД (от выпрямителя) до 1% и пиковой мощностью до 200 кВт. Такие энергетические характеристики лазера на парах меди выдвинули его в число «рабочих лошадок» лазерной техники.

Решающий вклад группы Петраша Г.Г. в разработку лазера на парах меди признан во всем мире. Разработка также открыла широкие возможности для исследования, а затем и для создания интересных для многих практических применений других лазеров на парах металлов, например, на парах золота и бромида меди. Созданный в ФИАНе лазер на парах меди был передан на «внедрение» в предприятие «Исток», где были впервые разработаны отпаянные газоразрядные трубки с большим сроком службы. Впоследствии здесь производился целый типоряд лазеров с различной выходной мощностью и для разных применений. За рубежом с той поры тоже применяются только саморазогревные лазеры.

Возможности применения лазеров на парах меди некоторое время существенно ограничивались тем обстоятельством, что для этих лазеров, обладающих большим

усилением и короткой длительностью инверсии, обычные резонаторы не позволяли получать малую расходимость. Ситуация изменилась, когда в группе Г.Г. Петраша впервые применили так называемые неустойчивые резонаторы, т. е. резонаторы с огромными геометрическими потерями за один проход, причем с очень большим увеличением (до нескольких сотен). В результате была получена расходимость, близкая к дифракционной, причём без большой потери выходной мощности, а также экспериментально и теоретически изучены свойства телескопических неустойчивых резонаторов и разработана теория эволюции пучков в таких резонаторах (Раутиан С.Г., Шалагин А.М.).

Появление практичных саморазогревных лазеров позволило приступить к исследованиям и разработкам нового типа оптических систем – оптических систем с усилителями яркости, в качестве которых использовались активные элементы лазеров, прежде всего лазера на парах меди. Оказалось, что они обладают очень высоким коэффициентом усиления (более 0,1 $см^{-1}$), что позволяет за один проход усилителя увеличить мощность светового пучка, несущего изображение объекта, в $10^2 \div 10^4$ раз. Первую оптическую систему с усилителем яркости – лазерный проекционный микроскоп удалось осуществить в Оптической лаборатории в 1972 году. В дальнейшем были подробно изучены характеристики и особенности многих систем с усилителями яркости, в том числе с другими лазерными усилителями (на парах золота, марганца, бария, свинца, CuBr), что позволяло получать увеличенные изображения объектов в различных областях спектра.

Особенность оптических систем с лазерными усилителями яркости состояла еще и в том, что их усиливающие элементы в типичных условиях работали в режиме значительного насыщения. С одной стороны, это позволяло получать мощность световых пучков на выходе системы, сравнимую с выходной мощностью лазера с тем же усиливающим элементом, с другой стороны, из-за насыщения система становилась нелинейной. Тем не менее, как показала практика, качество изображений на выходе системы, включая разрешение и контраст, мало отличалось от качества изображений в системе без усилителя. Такое удивительное свойство, как выяснилось в дальнейшем, обязано тому, что пучки света, исходящие из разных точек усиливаемого объекта, перемешиваются в усиливающей среде (без перемешивания этих пучков контраст изображения на выходе при насыщении усиления заметно ухудшается и даже может исчезнуть полностью).

В экспериментах с оптическими системами с усилителями яркости принимали участие Земсков К.И., Казарян М.А., Матвеев В.М., Чвыков В.В. Теоретический анализ прохождения пространственно модулированных полей через насыщающийся оптический усилитель был выполнен Кузнецовой Т.И. и Кузнецовым Д.Ю. В 1980 г. основным участникам работ Петрашу Г.Г., Исаеву А.А., Казаряну М.А. и Марковой С.В., а также ряду сотрудников предприятия «Исток» и НИИ ТМ была присуждена Государственная премия СССР по физике с формулировкой «за разработку физических принципов, создание и исследование импульсных лазеров на парах металлов и на их основе оптических систем с усилителями яркости».

### 4.1.5 Метод внутрирезонаторной лазерной спектроскопии

На рубеже 60–70-х годов в ФИАНе была выдвинута и реализована идея о детектировании спектральных линий слабо поглощающей среды путём помещения её внутрь лазерного резонатора. Идея принадлежала сотруднику лаборатории КРФ А.Ф. Сучкову и была опубликована в препринте ФИАН в 1970 г. Суть её в том, что свет в резонаторе многократно (тысячи раз) проходит через поглощающую среду, вследствие чего эффект поглощения «накапливается» и становится измеряемым в спектре лазерного излучения, превосходящем по ширине ширину линии поглощения среды.

Эксперимент, продемонстрировавший высокую чувствительность к спектральным потерям, был выполнен в лаборатории люминесценции ФИАН при участии автора идеи А.Ф. Сучкова, руководителя группы Свириденкова Э.А. (Рис. 4.4) и сотрудников Пахомычевой Л.А., Титовой Л.В. и Чурилова С.С. Использовался лазер на неодимовом стекле с шириной спектра порядка десятка обратных см, то есть около десятка ангстрем при длине волны 1,06 мкм. В качестве среды со спектром слабого поглощения в этой области первоначально тестировался заполненный жидкостью интерферометр, который помещался внутрь лазерного резонатора. Подбирая толщину интерферометра, можно было регулировать период чередования максимумов и минимумов пропускания, а подбирая показатель преломления жидкости – регулировать глубину провала в пропускании, то есть величину «поглощения». Измерения проводились с помощью дифракционного спектрографа по схеме В.И. Малышева.

Рис. 4.4 Участники разработки и исследования метода внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (слева направо): в нижнем ряду Э.А. Свириденков, Н.А. Распопов, в среднем ряду Ш.Д. Хан-Магомедова, Т.П. Беликова, А.Ф. Сучков, в верхнем ряду А.Н. Савченко, В.М. Баев, Д.Д. Топтыгин

После устранения паразитных спектрально-селективных потерь в лазере и надёжной регистрации только контролируемых потерь нужный результат был достигнут с кюветой в резонаторе, заполненной парами аммиака. Результаты работы были опубликованы в статье «Линейчатая структура спектров излучения ОКГ с неоднородным уширением линии усиления» (Письма в ЖЭТФ, 1970 г.). Разработанный метод стал называться методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (ВРЛС). Приоритет группы Э.А. Свириденкова в разработке и распространении метода признан в мире. В 80-х годах цикл работ по ВРЛС даже номинировался на Государственную премию СССР. Сегодня известны многочисленные примеры использования метода ВРЛС с другими широкополосными лазерами для детектирования линий самых разнообразных веществ.

### 4.1.6 Мощный газовый лазер на двуокиси углерода

В 1957 г. из состава Лаборатории люминесценции выделилась лаборатория «Пламён» под руководством Николая Николаевича Соболева, впоследствии – Лаборатория оптики низкотемпературной плазмы (ЛОНТП), а с 1990 года – одноимённый отдел. К середине 60-х годов в её тематике был сделан акцепт на исследования состояний существенно неравновесной плазмы и газов, что было в русле развития только что появившихся газовых лазеров. В течение пяти лет, следующих за сообщением о первом лазере непрерывного действия на смеси гелия и неона, тогда уже была реализована большая часть известных и поныне газоразрядных лазеров.

В ходе поисков других лазерных источников из сотен атомных и молекулярных переходов Лабораторию ОНТП привлекло непрерывное вынужденное излучение на переходах между колебательными уровнями молекулы двуокиси углерода со спектром в области 10 микрон (К. Пател, США, 1964 г.). Мощность лазера составляла около 1 мВт, но уже через год её удалось поднять до 10 Вт, а спустя ещё год из разных лабораторий мира поступили сообщения о мощностях в сотни Ватт. Всё говорило о том, что этот лазер имеет большой энергетический потенциал, однако истинные его границы обсуждать было трудно, поскольку увеличение мощности достигалось различными эмпирическими приемами, включая комбинации смешиваемых газов, геометрические размеры устройств и способы их охлаждения, оптимизацию резонаторов и др.

В это же время стали развиваться исследования импульсных $CO_2$ лазеров, вначале при низком, а затем при повышенном и атмосферном давлении с высокой энергетикой на уровне единиц и десятков джоулей в импульсе. В отличие от всех других газоразрядных лазеров, лазер на основе $CO_2$ демонстрировал КПД на уровне десятка процентов. Можно сказать, что рождался целый класс лазерных систем, и будущее это подтвердило. Чтобы перейти от экстенсивной эмпирической фазы исследований к последовательной разработке $CO_2$ лазеров с прогнозируемыми характеристиками, нужно было добиться адекватного и детального понимания

механизма его работы. Известные соображения о механизме создания инверсии в $CO_2$ лазере сводились к тому, что колебательно возбужденный азот передает энергию молекулам углекислого газа. Однако это не объясняло работу лазера без примеси азота, правда, генерирующего с меньшей эффективностью. Также неясно было, каким же образом возбуждаются колебания азота или других молекул.

В 1965 г. заведующий лабораторией ОНТП профессор Соболев Н.Н. (Рис. 4.5) с молодым сотрудником Соковиковым В.В. предположили, что возбуждение колебаний азота (и других молекул) происходит при прямом столкновении со свободными электронами плазмы, хотя при существовавших в то время представлениях считалось, что легкий электрон не может впрямую раскачать тяжелые ядра. Существенную поддержку идее оказали выполненные незадолго до этого эксперименты Шульца (1964 г.) с электронными пучками, где измеренное сечение возбуждения колебаний азота электронами (энергия кванта около 0,2 эВ) оказалось сопоставимо с газокинетическим при энергиях 2÷3 эВ. Кроме того, из опубликованной в 1965 г. работы Свифта по зондовым измерениям в азотной плазме следовало, что средняя энергия электронов оказывается тоже около 2 эВ. Оценки показали, что обеспечиваемая таким механизмом скорость возбуждения колебательных квантов согласуется с наблюдаемыми высокими плотностями потоков лазерных фотонов.

Рис. 4.5. Заведующий лабораторией ОНТП профессор Н.Н. Соболев

Помимо понятого механизма возбуждения верхних уровней, проблема состояла в установлении каналов очистки нижних лазерных уровней. По мере достижения высоких мощностей генерации, стало ясно, что ни радиационный распад, ни столкновения с электронами не обеспечивают необходимой скорости очистки. Поэтому Соболевым Н.Н. и Соковиковым В.В. было высказано предположение, что разрушение населённостей нижних уровней происходит при столкновениях молекул двуокиси углерода с другими тяжелыми частицами – $CO_2$,

He, $N_2$ и др. Эти два допущения составили основу физической модели $CO_2$ лазера (основные положения её были суммированы в публикациях 1967-1968 гг.), дали ключ к дальнейшему развитию и нашли широкое признание.

Далее надо было от простейшей модели с выделенными лазерными уровнями перейти к описанию молекул как существенно многоуровневых систем. На этом этапе к работе подключились теоретики Оптической лаборатории Шелепин Л.А. и Гордиец Б.Ф. Для получения неизвестных входных данных была поставлена программа исследований молекулярных разрядов, разработки методов их диагностики и нахождения параметров – температуры нейтрального газа, плотностей и энергетических распределений электронов, усиливающих свойств активной среды. Такая программа начала реализовываться и в лаборатории ОНТП, и во многих других лабораториях мира. Модель дополнялась подробностями, доводилась до уровня адекватного объяснения экспериментальных наблюдений, но суть ее сохранилась неизменной.

Помимо создания физической модели генерации решалась важная практическая задача. Все эксперименты с $CO_2$ лазерами первых лет производились с разрядами в потоках газовых смесей, так как остановка потока приводила к деградации лазерного эффекта вследствие изменения химического состава смеси. Время генерации варьировалось у различных авторов от единиц секунд до нескольких часов. Перспективы применений $CO_2$ лазеров в большой мере зависели от решения вопроса, можно ли создать компактные «отпаянные» системы. Первые исследования динамики изменения химического состава проводились в 1968 г. совместно лабораторией ОНТП (Лоткова Э.Н.) и Институтом нефтехимического синтеза методом последовательного отбора и анализа 10÷15 проб. Хроматографический анализ показал, что характерное время распада рабочих молекул $CO_2$ составляет около трех часов (результаты опубликованы в 1968 г.).

При изучении тех же процессов с лучшим временным разрешением концентрация молекул измерялась в режиме реального времени с помощью созданного совместно с ГОИ инфракрасного газоанализатора (Очкин В.Н.). Оказалось, что диссоциация рабочих молекул в разряде занимает не часы, а всего лишь несколько секунд, но степень диссоциации, определяемая динамикой реакций распада-рекомбинации, оказывается неглубокой, типично около 50%. Медленным процессом оказывается смещение этого динамического равновесия. Изучение баланса элементов показало, что за медленный сдвиг ответственны процессы взаимодействия свободных атомов и радикалов с поверхностями разрядной камеры.

Описанным образом удалось разделить объемные и гетерофазные процессы и выявить «узкое место», определяющее время жизни лазера. Для объемных плазменных процессов были измерены константы скоростей диссоциации, отмечена их связь с электрическими параметрами, и показано, что, как и возбуждение колебаний молекул, диссоциация происходит при прямом электронном ударе. Было выявлено положительное влияние добавок водорода и паров воды на продление срока службы лазера, механизм которого сводился к каталитическому ускорению

реакций и связыванию свободных атомов кислорода. Была проведена большая серия исследований различных конструкционных материалов. Эти результаты, опубликованные в 1968-1971 годах, оказали заметное влияние на развитие разработок $CO_2$ лазеров промышленностью и фактически стали одним из первых примеров комплексных исследований по неравновесной плазмохимии, превратившейся затем в большое научное направление.

Развитые методы диагностики неравновесных молекулярных систем неоднократно впоследствии применялись к различным и в том числе плазмохимическим и лазерным объектам. Из последних можно указать CO лазеры и волноводные $CO_2$ лазеры, для которых необходимые для понимания и развития объемы исследований были выполнены методами оптики, спектроскопии, ЭПР, масс-спектрометрии с привлечением приемов, наработанных при исследованиях теперь уже классических $CO_2$ лазеров. Это также импульсные одночастотные лазеры высокого давления и волноводные системы с дискретной и плавной стабилизированной частотой излучения (Автономов В.П.). Полученное в 1990-х годах в совместных работах с зарубежными лабораториями значение удельной мощности непрерывных щелевых волноводных $CO_2$ лазеров с высокочастотным возбуждением (С.Н. Цхай) и сейчас остается непревзойденным. Другими примерами развившихся в последующие годы исследований, которые были стимулированы работами по электроразрядным $CO_2$ лазерам, стали: спектроскопия неравновесной молекулярной плазмы, классические эмиссионные, абсорбционные методы обращения сложных спектров, линейные и нелинейные лазерные методы (Очкин В.Н., Савинов С.Ю., Цхай С.Н., Спиридонов М.В.).

### 4.1.7 Газодинамический $CO_2$ лазер

В те же 1966-1970 годы в лаборатории ОНТП были выполнены исследования по созданию газодинамического варианта $CO_2$ лазера ($CO_2$ ГДЛ), чему благоприятствовали следующие три обстоятельства. Во-первых, в ФИАН были высказаны идеи о возможности получения генерации на переходах молекул при их быстром охлаждении (Басов Н.Г., Ораевский А.Н., Щеглов В.А., Прохоров А.М., Конюхов В.К.). Во-вторых, в процессе разработки модели электроразрядного $CO_2$ лазера была четко определена роль столкновений тяжелых частиц в общей картине работы лазера и был проанализирован большой объем сведений о процессах колебательной релаксации. Наконец, в лаборатории был накоплен многолетний опыт работы с ударными волнами, и имелась установка с ударной трубой, созданная Е.Т Антроповым при поддержке заведующего лабораторией Н.Н. Соболева.

Именно эту установку и использовали в научной группе Е.М. Кудрявцева (Рис. 4.6) для экспериментов по получению генерации на $CO_2$. В ней можно было в самых разных газовых смесях создавать ударные волны, которые нагревают смеси за короткое время до температур в тысячи и десятки тысяч градусов при высоких давлениях (атмосферы и десятки атмосфер). Но сначала в ЛОНТП была решена (с мировым приоритетом) задача об измерении температуры за падающей и

отражённой ударными волнами. Было показано, что результаты расчётов, предсказывающих достижение очень высоких температур за ударными волнами, подтверждаются опытами. Значения температуры находились по измерениям скорости ударной волны, определяемой, в свою очередь, оптическим шлирен-методом.

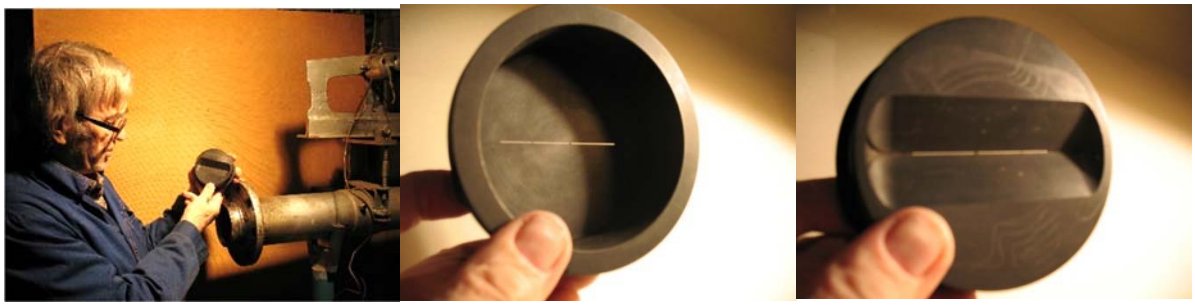


Рис. 4.6. Руководитель группы Е.М. Кудрявцев на фоне ударной трубы (слева), на которой в 1970 г. было получено усиление. В центре – вид на сопло-щель со стороны падающей ударной волны (размер щели 1,0×60 мм); справа – вид со стороны вакуумированного ресивера (угол раскрытия сопла около 120°)

На первом этапе создания ГДЛ предпринимались попытки получить генерацию при адиабатическом расширении смеси углекислого газа с азотом за отраженной ударной волной. Усиление было зафиксировано, но генерацию в 1969 году получить не удалось, поскольку выяснилось, что заселённости уровней $CO_2$ в струе явно неравновесны, и обязательно требуется наличие третьего компонента газовой смеси – гелия или паров воды. Такой же вывод в том же году был сделан в США и в Лаборатории колебаний ФИАН (Конюхов В.К. и Прохоров А.М.).

Следующей задачей было изучение неравновесных процессов, идущих за ударной волной. Такие исследования велись совместно с МИФИ и ГОИ. Была налажена система зондирования газов и измерений колебательной релаксации молекул $CO_2$ при разных условиях в ударной трубе с помощью лазерного излучения электроразрядного $CO_2$ лазера. Эксперименты были продолжены в варианте адиабатического охлаждения в сверхзвуковом сопле, как предлагали Н.Г. Басов и А.Н. Ораевский. Вскоре значительное усиление было зарегистрировано, и в августе 1967 г. в препринте ФИАН появилось первое сообщение о получении инверсии на содержащей $CO_2$ смеси в устройстве, задуманном как реализация газодинамического лазера. Отражённой волной чистый $CO_2$ нагревался до температур, при которых он наполовину диссоциировал, а затем охлаждался волнами разрежения и рекомбинировал в присутствии значительного количества водорода, а значит, и воды.

Работы с ударными трубами продолжились осенью 1968 года, когда в ФИАН были изготовлены сопла-щели нескольких модификаций. Исследования были направлены на поиски условий получения усиления на переходе 10,6 мкм уже в условиях истечения в вакуум рабочих $CO_2$-смесей, нагретых отражённой ударной волной. Для этого пришлось наклеивать на сопло-щель фольгу, которая рвалась в

результате прихода отражённой ударной волны. Наконец, 10,6-микронный ГДЛ на тройной смеси $CO_2$–$N_2$–He был реализован и исследован. Хотя статья Дронова А.П., Дьякова А.С., Кудрявцева Е.М., Соболева Н.Н. в Письмах в ЖЭТФ оказалась второй после публикации сотрудников американского военно-космического центра в том же 1970 г., но в ней были представлены результаты не только по генерации, но и намного более информативные данные по измерениям усиления с помощью зондирующего $CO_2$ лазера. Затем появилась статья Конюхова В.К., Матросова И.В., Прохорова А.М., Шалунова Д.Т., Широкова Н.Н. (Письма в ЖЭТФ, 1970) о реализации непрерывного ГДЛ на смеси $CO_2$-$N_2$-$H_2O$.

## 4.2 Участие лабораторий Отделения физики твёрдого тела в лазерных исследованиях

### 4.2.1 Введение

Вскоре после того, как в 1959 году Н.Г. Басовым, Б.М. Вулом и Ю.М. Поповым был предложен полупроводниковый лазер,. стало ясно, что непрямозонный полупроводник типа германия не подходит для генерации излучения. Внимание ученых сосредоточилось на прямозонном полупроводнике типа арсенида галлия. Для него были сформулированы условия получения инверсной населенностей (Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов, 1961 г.) и в рамках программы Н.Г. Басова начато создание полупроводниковых лазеров на основе соединений $A_3B_5$.

Экспериментальная работа под руководством Н.Г. Басова проводилась в Лаборатории физики полупроводников (ЛФП) ФИАН, на основе которой впоследствии было образовано Отделение физики твёрдого тела. В исследованиях принимали участие заведующий лабораторией член-корреспондент АН СССР Вул Б.М. и кандидаты физ.-мат. наук Багаев В.С. и Шотов А.П. В качестве лазерного материала были выбраны два прямозонных полупроводника: арсенид галлия (GaAs) и антимонид индия (InSb). Тогда впервые в СССР: 1) была получена генерация излучения из диффузионных p-n переходов в GaAs на длине волны 0,84 мкм при 77 К и изучена поляризация излучения и нагрев активной области; 2) получена генерация излучения из вырожденной электронно-дырочной плазмы в InSb на длине волны 5,2 мкм при 4,2 К в присутствии квантующего магнитного поля и изучена расходимость излучения (отчет ФИАН, 1965).

За фундаментальные исследования, приведшие к созданию полупроводниковых квантовых генераторов, в 1964 году Вулу Б.М., Крохину О.Н., Попову Ю.М. и Шотову А.П. была присуждена Ленинская премия.

После образования Лаборатории КРФ в 1963 г. и сдачи в эксплуатацию корпуса 1 ЛКРФ в 1966 г. изготовление и исследования полупроводниковых лазеров на кристаллах арсенида галлия были переведены в корпус 1. Они осуществляются здесь и поныне, но при реорганизации отдела Оптоэлектроники Отделения КРФ в 2001 г. заведующий отделом Попов Ю.М. с двумя группами сотрудников без изменения местоположения их рабочих мест перешли в структуру Нейтронно-физического

отдела (НФО), возглавляемого в ту пору Крохиным О.Н. При этом одна группа во главе с Безотосным В.В. вышедшая из структуры Лаборатории инжекционных лазеров (заведующий Богатов А.П.) отдела Оптоэлектроники, продолжила в НФО исследования таких же лазеров, оставаясь в Москве, а другая группа во главе с Козловским В.И., вышедшая из структуры Лаборатории ПЛЭН (заведующий Насибов А.С.) отдела Оптоэлектроники, продолжила в НФО исследования полупроводниковых лазеров с катодной накачкой, оставаясь на Троицкой площадке. При реорганизации структуры ФИАН в 2018 году эта группа, ставшая лабораторией, оказалась в Троицком обособленном подразделении – ТОП (см. п. 4.3).

Исследования лазеров на основе антимонида индия и узкозонных полупроводников типа $A_4B_6$ были продолжены в Лаборатории физики полупроводников ФИАН научной группой, ставшей впоследствии лабораторией. В 2020 г. НФО из самостоятельного отдела при дирекции ФИАН был переведён в структуру Отделения физики твёрдого тела. Таким образом, оба направления лазерных исследований в полупроводниковых материалах снова оказались в одном структурном подразделении – Отделении ФТТ, но в двух разных лабораториях – в созданной в начале 2000-х годов лаборатории узкозонных полупроводников (заведующий д.ф.-м.н. Засавицкий И.И.) и в образованной в 2018 г. лаборатории полупроводниковых лазеров (заведующий к.ф.-м.н. Безотосный В.В.).

Кроме полупроводниковой тематики, возникшей в НФО лишь в 2001 г., этот Отдел с самого начала лазерной эры выполнял исследования в области лазерной плазмы и ЛТС. Он был образован в 1990 году на основе Нейтронно-физической лаборатории, созданной в начале 70-х годов по инициативе Н.Г. Басова. Первым руководителем Лаборатории стал профессор А.И. Исаков. Поводом для образования НФЛ послужили теоретические оценки и первые экспериментальные результаты, свидетельствующие о реальной возможности создания термоядерной энергетики на основе мощных импульсных лазеров. Руководителями Отдела являлись также О.Н. Крохин и Е.Р. Корешева, в настоящее время НФО возглавляет Борисенко Н.Г.

Основными направлениями исследований НФО по лазерно-плазменной тематике в течение долгого времени являются:

- исследования и применение в материаловедении физики плотной плазмы, создаваемой в сильноточной электроразрядной уникальной установке ТЮЛЬПАН,
- разработка уникальных технологий и создание на их основе микромишеней для экспериментальных исследований на установках лазерного термоядерного синтеза и др.

Соответственно лазерно-плазменные исследования Отделения ФТТ ведутся в Лаборатории физики плотной плазмы и в Лаборатории термоядерных мишеней. На основании вышеизложенного, ниже будут представлены достижения этих двух лабораторий и двух лабораторий, разрабатывающих полупроводниковые лазеры.

### 4.2.2 Создание лазеров на узкозонных полупроводниках

После 1965 г. лазерные исследования в лаборатории физики полупроводников ФИАН были сосредоточены в научной группе полупроводниковых лазеров (Рис. 4.7), а лазерными материалами стали узкозонные полупроводники, ширина запрещенной зоны которых изменяется от ~ 0,4 эВ и почти до нуля, что соответствует длине волны излучения от 3 мкм до дальней ИК области спектра. Проводились фундаментальные исследования материалов, включающие определение энергетического спектра, электрофизических, оптических и других свойств материалов. Затем эти физические результаты использовались для разработки и создания различных приборов, главным образом, полупроводниковых лазеров с оптической и инжекционной накачкой.

Рис. 4.7. Научная группа полупроводниковых лазеров, 1977 г. Слева направо: И.И. Засавицкий, Г.В. Флусов, Б.Н. Мацонашвили, Б.П. Горшунов и Д.М. Гуреев с малогабаритным криостатом для магнитооптических измерений

Среди достижений начального периода, прежде всего, следует отметить магнито-перестраиваемое вынужденное комбинационное рассеяние с переворотом спина (спин-флип-лазер в зарубежном написании), которое наблюдалось впервые в СССР в кристаллах антимонида индия n-типа (Засавицкий И.И., Мацонашвили Б.Н., Шотов А.П., 1971 г.). Благодаря высокому значению g–фактора в этих кристаллах при изменении квантующего магнитного поля от 3,1 до 5,6 Т длина волны излучения перестраивалась от 11,4 до 12 мкм. Для измерений длины волны излучения в средней ИК области спектра были созданы $CO_2$-лазер с модулированной добротностью и магнитооптический криостат со сверхпроводящим соленоидом, охлаждаемым в те времена жидким гелием.

Одновременно проводились исследования с созданным инжекционным лазером на основе селенида свинца (PbSe), излучающим, как в квантующем магнитном поле, так и при высоком гидростатическом давлении. Работа с давлением

была поставлена с целью разработки полупроводниковых лазеров с перестраиваемой частотой излучения для спектрометров нового принципа действия и велась силами трех академических институтов: ФИАН, ИСАН и ИФВД (совместный отчет 1971 г.). При увеличении давления от атмосферного до 5 кбар и температуре 77,4 К длина волны излучения лазера перестраивалась от 7,34 до 9,63 мкм, а тонкая перестройка отдельной моды составляла несколько $см^{-1}$. Передающей давление средой служил газообразный гелий. Аналогичные измерения были проведены и с лазерами на основе арсенида галлия, но передающей средой служила смесь масла с керосином. При увеличении давления до 7 кбар длина волны излучения изменялась от 0,84 до 0,79 мкм.

После экспериментов с квантующим магнитным полем и гидростатическим давлением встал вопрос о дальнейшем направлении развития: или развивать спин-флип-лазер, или узкозонные полупроводники типа $A_4B_6$. Конечно, для исследований спин-флип-лазера потребовались бы красивые и физически интересные, но дорогие эксперименты. Что касается полупроводниковых диодных лазеров, то кроме малой стоимости и меньших габаритов, здесь открывались возможности грубой перестройки в широких пределах длины волны излучения за счет изменения состава полупроводника. Кроме того, как грубая, так и прецизионная перестройка длины волны могли быть также достигнуты за счет изменения внешних воздействий (температура, давление, магнитное поле). Также просматривались перспективы создания гетеролазеров с улучшенными характеристиками. В итоге выбор был сделан в пользу инжекционных лазеров на основе трех- и четырехкомпонентных твердых растворов $A_4B_6$.

В соответствии с выбранным новым направлением исследований уже в лаборатории узкозонных полупроводников (Рис. 4.8) стала развиваться технологическая база, ориентированная на выращивание объемных монокристаллов из паровой фазы. Кристаллы заданного состава подвергались проволочной резке и служили как для создания диффузионных p-n переходов, так и для эпитаксиальных подложек. Для создания гетероструктур была освоена эптаксиальная технология, начиная с жидкофазной эпитаксии, метода горячей стенки, метода мгновенного испарения в вакууме (с НИИ Гириконд), и заканчивая молекулярно-лучевой эпитаксией.

К восьмидесятым годам прошлого столетия на основе твердых растворов $PbS_{1-x}Se_x$ $(0 \le x \le 1)$, $Pb_{1-x}Sn_xSe$ $(0 \le x \le 0{,}30)$, $Pb_{1-x}Sn_xTe$ $(0 \le x \le 0{,}23)$, $Pb_{1-x}Cd_xS$ $(0 \le x \le 0{,}03)$ были созданы перестраиваемые током (температурой) гомолазеры и гетеролазеры для широкой ИК области спектра (от 2,5 до 40 мкм), в которой расположены линии колебательно-вращательного спектра большинства молекул. Поэтому разработанные лазеры представляли интерес для таких практических задач как молекулярная спектроскопия высокого ($\le 10^{-4}$ $см^{-1}$) разрешения, а также высокочувствительный (на уровне ppb) локальный и дистанционный (до км)

спектральный газоанализ, причём для работы лазерных спектрометров достаточна была мощность в доминирующей моде >10 мВт и рабочая температура 80 К.

Рис. 4.8. Сотрудники Лаборатории узкозонных полупроводников, 2009 г. (слева направо): сидят Ю.Г. Селиванов, И.И. Засавицкий, С.И. Оськина; стоят В.В. Копылов, Е.Г. Чижевский, С.П. Козырев, А.В. Бабушкин, Д.М. Пашкеев, И.В. Гулин

Новые инжекционные лазеры среднего ИК диапазона были востребованы многими лабораториями и организациями. Среди них: лаборатория оптики низкотемпературной плазмы ФИАН, ИОФАН, ИСАН, ИРЭ АН, Институт химии высокочистых веществ АН, Институт физических проблем АН, ЦАО Госкомгидромет, ИАЭ им. И. В. Курчатова, МИФИ, Институт прикладной геофизики и др. академические и прикладные институты СССР, а также Берлинский университет в ГДР и Институт электроники Болгарской народной республики. Наиболее интенсивно в этих организациях исследовались газы с линиями поглощения в области спектра 4 - 16 мкм (CO, $CO_2$, $H_2O$, NO, $N_2O$, $NO_2$, $SO_2$, фосфины, арсины, $NH_3$, $SF_6$ и другие).

За разработку, изготовление и успешное использование образцов полупроводниковых лазеров сотрудникам ФИАН Волкову Б.А., Засавицкому И.И., Калюжной Г.А., Шотову А.П. в 1985 году была присуждена Государственная премия СССР.

Дальнейшая работа лаборатории узкозонных полупроводников ОФТТ была направлена на радикальное улучшение характеристик разработанных

инжекционных лазеров на полупроводниках типа $A_4B_6$ и на создание новых квантовых каскадных лазеров (ККЛ) на полупроводниках типа $A_3B_5$.

На основе гетеропары PbEuTe/EuTe были разработаны одномодовые лазеры с вертикальным выводом излучения при оптической накачке и продемонстрирована их температурная перестройка в области спектра около 5 мкм (Засавицкий И.И., Пашкеев Д.А., Селиванов Ю.Г., Чижевский Е.Г.).

Продолжались исследования и по продвижению в дальнюю ИК (терагерцовую) область спектра. В настоящее время совместно с Институтом физики микроструктур АН созданы лазеры с рекордным значением длины волны излучения 50 мкм и показано их практическое применение для терагерцовой магнитоспектроскопии. В работе от ФИАН участвовали Засавицкий И.И. и Чижевский Е.Г., от ИФМ – Гавриленко В.И., Маремьянин К.В. и другие.

Впервые в России совместно с НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха в 2010 году был создан квантовый каскадный лазер с длиной волны излучения около 8 мкм (участвовали Засавицкий И.И., Пашкеев Д.А., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Микаелян Г.Т.).

Лазерные гетероструктуры выращивались также в Университете г. Шеффилда (Великобритания) бывшим сотрудником ФИАН А.Б. Крысой. Для продвижения в более коротковолновую область спектра около 5,6 мкм использовалась напряженно-компенсированная гетеропара GaInAs/AlInAs.

Повышение рабочей температуры до 350 К достигнуто за счёт двухфононного механизма опустошения нижнего лазерного уровня. С целью повышения рабочей температуры до 371 К использовалась согласованная гетеропара с относительно большим числом квантовых ям и барьеров. Активная область лазера в этом случае представляла собой минизону с дублетным уровнем, что позволило при длине волны излучения 7,4 мкм получить широкую полосу генерации (~100 $см^{-1}$). Для лазера на другой согласованной гетеропаре GaInAs/AlInAs ($\lambda \sim 9$ мкм) с двухфононной релаксацией наблюдалось уширение и расщепление спектров излучения в квантующем магнитном поле. Показано, что путем магнитной подстройки уровней Ландау удается увеличить интегральную интенсивность излучения лазера в 70 раз. В исследованиях участвовали Засавицкий И.И., Пашкеев Д.А., Микаелян Г.Т., Бушуев Е.В.

Мощность квантовых каскадных лазеров зависит от выбора активной области и составляет до 1 Вт при температуре 80 К и порядка 0,1 Вт при комнатной температуре. Более высокая мощность излучения по сравнению с лазерами на основе узкозонных полупроводников $A_4B_6$ и возможность работы при комнатной температуре – преимущества ККЛ. Однако и для них существуют важные нерешённые проблемы. Например, они не работают. в спектральном диапазоне 25 – 70 мкм. Кроме того, вследствие имеющихся разрывов в зоне проводимости (квантовых ям) невозможно продвинуться в коротковолновую область длин волн менее 3 мкм. Таким образом, несмотря на большие успехи в мире в области ККЛ, требующие решения проблемы остаются.

### 4.2.3 Исследования и разработки Лаборатории полупроводниковых лазеров по технологиям изготовления, испытаний и применений мощных инжекционных лазеров и по созданию новых типов твердотельных лазеров с диодной накачкой

Основными задачами научной Группы (впоследствии Лаборатории) полупроводниковых лазеров, перешедшей в 2001 г. из Отдела оптоэлектроники ОКРФ в Нейтронно-физический отдел ФИАН, стали исследования и разработки в области мощных лазерных диодов (ЛД), монолитных линеек (ЛЛД) и двумерных матриц лазерных диодов (МЛД), а также исследования и разработки в области создания новых типов твердотельных лазеров с диодной накачкой (ТЛДН).

Результаты сотрудничества с ведущими в области полупроводниковой квантовой электроники НИИ в нашей стране и за рубежом в канун XXI века показали, что вне комплекса чистых помещений (КЧП) и при отсутствии условий ESD – safe (обеспечения безопасности от электростатического повреждения p-n перехода в лазерных гетероструктурах) невозможно и нецелесообразно проведение основных операций изготовления и дальнейших экспериментальных исследований мощных источников излучения на основе лазерных диодов с гарантированным сроком службы, вследствие загрязнения лазерных кристаллов (в первую очередь зеркал лазерных резонаторов) вне КЧП и повреждения гетероструктур электростатическим зарядом.

Кроме того, анализ ситуации на производствах лазерных диодов в России показал наличие существенного отставания отечественных технологий монтажа лазерных кристаллов на теплоотводящие элементы от передовых западных технологий, что ограничивает мощность излучения, надёжность и гарантированный срок службы лазеров.

Для обеспечения работ в указанных направлениях, в период с 2001 по 2005 гг. были разработаны проекты и осуществлено строительство двух комплексов чистых помещений (КЧП). Было закуплено современное оборудование, предназначенное для сборки (ассемблирования) мощных полупроводниковых лазерных кристаллов и измерения их основных параметров. Оборудование было размещено в локальных чистых зонах, обеспечиваемых ламинарным очищенным потоком воздуха на антивибрационных столах в КЧП1. Оборудование автономного обеспечения, в частности, установки подготовки воздуха, компрессор чистого воздуха и генератор чистого азота размещены в серых зонах КЧП1.

Основные работы Группы и далее Лаборатории были сконцентрированы на создании мощных ЛД и ЛЛД со спектральными диапазонами, требуемыми для накачки новых типов ТЛДН, в том числе с активными элементами на основе лазерной оптической керамики, легированной различными ионами-активаторами.

На Рис. 4.9 представлена часть лабораторных установок, размещённых в КЧП1 и предназначенных для ассемблирования мощных лазерных диодов и исследования их характеристик. В частности, на Рисунке показаны: а) монтаж лазерных диодов с длиной волны излучения 808 нм и рекордной непрерывной мощностью 25 Вт, для

применения в системах накачки твердотельных лазеров на основе YAG: $Nd^{3+}$; б) установка ультразвуковой приварки верхних электродов; в) предварительное тестирование готовых лазерных диодов с длиной волны 808 нм и непрерывной мощностью 10 Вт; г) тестирование смонтированной монолитной квазинепрерывной линейки лазерных диодов с выходной мощностью 300 Вт.

Рис. 4.9. Размещённые в КЧП1 лабораторные установки для: а) монтажа ЛД (его ведёт аспирант В.А. Олещенко), б) ультразвуковой приварки электродов, в) предварительного тестирования готовых ЛД, г) тестирования монолитных ЛЛД (его проводит к.ф.м.н. В.В. Безотосный). На заднем плане – оборудование для ресурсных испытаний готовых ЛД

В КЧП1 размещены два стенда, предназначенные для проведения долговременных ресурсных испытаний мощных ЛД с автоматизированным круглосуточным непрерывным контролем параметров и для корректировки технологий ассемблирования и отбора приборов с гарантированным ресурсом.

Мощные ЛД и ЛЛД, изготовленные в КЧП1, позволили обеспечить работы в КЧП2 по созданию новых типов твердотельных лазеров с диодной накачкой. Стабильность параметров разработанных технологий иллюстрирует тот факт, что из 30 изготовленных образцов ЛД в опытной партии, излучающих на длине волны 808 нм, 28 образцов ЛД успешно прошли первый тест. Полученные в КЧП1 результаты – методы измерений параметров и разработанные технологии монтажа и тестирования приборов, были переданы в заинтересованные отечественные исследовательские и промышленные организации Ростеха и Росатома.

В КЧП2 ведутся работы, связанные с исследованиями по накачке твердотельных активных элементов, включая разработку новых типов

твердотельных лазеров с активным элементом на основе отечественной лазерной оптической керамики. На Рис. 4.10 показан процесс сборки твердотельного лазера с диодной накачкой, работающего на второй гармонике излучения.

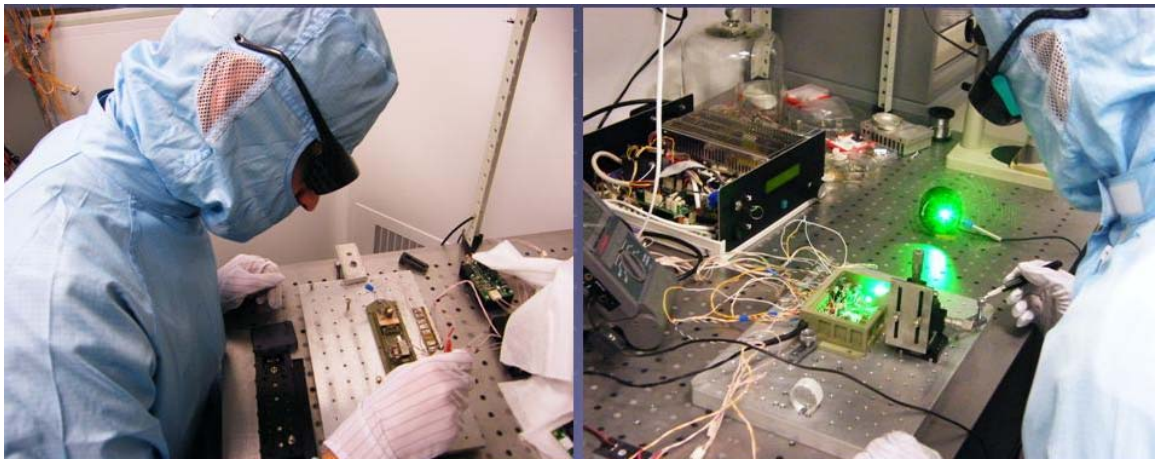


Рис. 4.10. Сборку ТЛДН в КЧП2 ведёт к.ф.-м.н. А.Л. Коромыслов

Для ускорения развития направления применения лазерной керамики и разработки на её основе новых типов твердотельных лазеров, в 2018 г. на базе Лаборатории создана Новая научная группа под руководством к.ф.-м.н. В.В. Безотосного. В её состав, кроме сотрудников ФИАН, вошли учёные из организаций, ведущих совместные с ФИАН работы – Филиала ИРЭ в г. Фрязино и предприятия «Радуга». Руководителем работ по направлению является к.ф.-м.н. Е.А. Чешев.

Важнейшими достижениями Лаборатории в последние 10 лет являются следующие:

- Созданы первые в России образцы непрерывных ЛД с рекордной мощностью до 25 Вт на длине волны 808 нм;
- Созданы первые в России образцы непрерывных ЛД с ресурсной мощностью 10 Вт на длинах волн 808 нм и 980 нм и с непрерывной мощностью 15 Вт на 940 нм;
- Создана оригинальная технология металлизации синтетических CVD алмазов для теплоотводящих элементов мощных ЛД; созданы и исследованы опытные образцы ЛД, смонтированные на алмазных теплоотводах (совместно с ИОФРАН);
- Созданы первые в России образцы непрерывных ЛЛД с мощностью 80 Вт на 808 нм и квазинепрерывной мощностью до 300 Вт (совместно с НПП ИНЖЕКТ);
- Создан первый в России одномодовый непрерывный ТЛДН с мощностью 5 Вт на 1060 нм и мощностью до 2 Вт на второй гармонике (532 нм) с параметром $M^2$ менее 1.1;
- Впервые продемонстрирована синхронизация поперечных мод в ТЛДН, и на основе этого эффекта измерены термооптические параметры активной среды, разработана новая методика сертификации параметров керамических активных элементов, сформулированы условия достижения высокого пространственного качества излучения;

- созданы первые в России малогабаритные импульсные одномодовые ТЛДН на 1060 нм и 1047 нм с активными элементами на основе YAG, YLF и лазерной оптической керамики (керамические активные элементы разработаны совместно с ФИРЭ РАН);
- Создан первый в мире двухчастотный ТЛДН, и на его основе получена генерация когерентного излучения на разностной частоте 1,64 ТГц;
- Созданы первые в России Рамановские лазеры с диодной накачкой (совместно с НАН Беларуси);
- Получены первые в России образцы градиентной оптической лазерной керамики (совместно с ФИРЭ РАН);
- Создана оригинальная технология синтеза керамик (LuAG) YAG:Yb, позволяющая получать керамики с заданным градиентным распределением легирующих примесей; измерены времена жизни лазерного уровня в зависимости от содержания лютеция в матрице активного элемента (совместно с ФИРЭ РАН и предприятием «Радуга»);
- Впервые исследована теплопроводность образцов лазерных керамик Yb:LuAG в широком диапазоне температур при разных концентрациях Lu в матрице; впервые проведены исследования лазерных керамик LuYAG, активированных ионами Yb3+ с концентрацией 5% при различном составе матриц (совместно с ФИРЭ РАН и предприятием «Радуга»);
- Создан первый в России ТЛДН с дисковым активным элементом на основе оптической керамики; исследованы его основные параметры и получена эффективность преобразования свет-свет более 62% (совместно с ФИРЭ РАН и предприятием «Радуга»);
- Разработана принципиально новая концепция двумерной матрицы лазерных диодов (МЛД) с расчетной плотностью выходной мощности, на порядок превышающей параметры лучших зарубежных образцов (защищена 3-мя патентами РФ, патентообладатель – ФИАН);
- Впервые в России выполнены исследования в области применения мощных ЛД для гипертермии с применением сенсибилизаторов на основе наночастиц кремния, с целью лечения онкологических заболеваний; разработан новый метод динамического неинвазивного облучения крови для борьбы с вирусными и бактериальными инфекциями и онкологией.

### 4.2.4 Исследования Лаборатория физики плотной плазмы (ЛФПП)

В 1977 г. в Нейтронно-физической лаборатории ФИАН по инициативе О.Н. Крохина была создана научная группа «Плазменный фокус», которая позднее, в 1983 г. преобразована в Сектор, а в 1990 г. – в Лабораторию физики плотной плазмы. С 2001 г. по настоящее время ею заведует д.ф.-м.н. В.Я. Никулин.

Основными направлениями исследований в ЛФПП являются:

- Исследование импульсной высокотемпературной плазмы, создаваемой мегаамперным током и лазерным излучением с целью создания интенсивного источника рентгеновского и нейтронного излучений, плазменных кумулятивных потоков и корпускулярных частиц;
- Разработка методов диагностики плазмы (лазерных, рентгеновских, нейтронных, зондовых и др.);
- Моделирование воздействия интенсивных энергетических потоков на материалы;
- Исследование веществ и материалов, находящихся в экстремальных условиях, возникающих при интенсивном энергетическом воздействии;
- Изучение стойкости конструкционных и функциональных материалов термоядерных реакторов и других импульсных плазменных систем;
- Разработка методов создания новых материалов и модификации их свойств на основе импульсного воздействия мощных энергетических потоков.

Лаборатория проводит исследования физики плотной плазмы на комплексной установке «Тюльпан», включающей в свой состав электроразрядные установки типа «плазменный фокус» ПФ-400 (Рис. 4.11) и ПФ-4 (Рис. 4-12) с системами контроля и управления и комплекс диагностической аппаратуры.

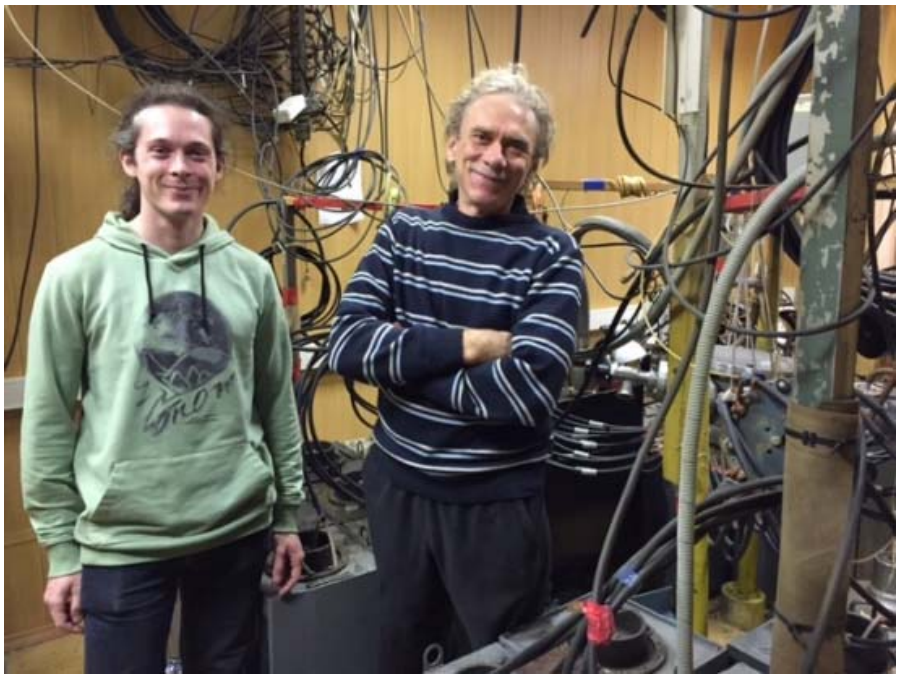


Рис. 4.11. К.т.н. А.А. Ерискин (слева) и к.ф.-м.н. С.Н. Полухин на установке ПФ-400

Установка «Тюльпан», при наличии плазменных установок с энергией от 4 кДж до 0,4 МДж, обеспечивающих получение тока в плазме от 300 кА до 3 МА с плотностью выше $10^7$А/см$^2$ (Таблица 4.1), является уникальной и занесена в реестр уникальных установок Российской Федерации. Назначение установки – фундаментальные исследования в области физики плазмы, создаваемой мощными импульсами тока, и разработка на этой базе физических основ мощного импульсного

управляемого источника нейтронного и рентгеновского излучений, корпускулярных и плазменных потоков. Область применения установки «Тюльпан» – управляемый термоядерный синтез и материаловедение.

Рис. 4.12. Заведующий ЛФПП д.ф.-м.н. В.Я. Никулин, заведующий лабораторией Казахского национального университета им. аль-Фараби д.ф.-м.н. А. Жукешов и с.н.с. ЛФПП к.ф.-м.н. П.В. Силин на установке ПФ-4

Таблица 4.1. Основные параметры установки «Тюльпан»

| | ПФ-400 | ПФ-4 |
|---|---|---|
| Геометрия электродов | Филипповская | Мейзеровская, |
| Напряжение зарядки | 30–40 кВ | 10–20 кВ |
| Ёмкость конденсаторной батареи | 480 мкФ | 20 мкФ |
| Энергия конденсаторной батареи | 400 кДж | 4 кДж |
| Максимальный ток | до 3 МА | до 600 кА |
| Четверть периода разряда | 4,5 мкс | 1,7 мкс |
| Энергия мягкого рентгеновского излучения | 10 кДж ($\lambda$=0,9 –1,2 нм) рабочий газ - неон | 100 Дж/имп ($\lambda$=0,9 –1,2 нм) рабочий газ - неон |
| Нейтронный выход | $10^{10}$-$10^{11}$ н/имп рабочий газ - дейтерий | 2-4·$10^{8}$ н/имп рабочий газ - дейтерий |

На базе установки «Тюльпан» функционирует Центр коллективного пользования «Плазменный фокус» (ЦКП ПФ). ЦКП ПФ является площадкой для обучения студентов и аспирантов МИФИ и МФТИ, а также используется (в режиме коллективного пользования) сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт», Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий», ЗАО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана», ОАО «Научно-производственное предприятие «Дельта». Перечень услуг ЦКП ПФ и форма Заявки на проведение исследований на установке «Тюльпан» приведены на сайте ЛФПП (http://sites.lebedev.ru/DPPL/).

В ЦКП «Плазменный фокус» проводились исследования в рамках проектов РФФИ, РНФ и грантов Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (руководитель школы академик О.Н. Крохин).

В лаборатории выполнялись также международные проекты:

- в рамках Совместной Российско-польской лаборатории по исследованию физики плазмы на установке ПФ-1000 в Международном центре по замагниченной плазме, созданном на базе польского Института физики плазмы и лазерного микросинтеза им. С. Калиского (Ассоциация Евроатом, Варшава);

- по гранту Министерства Республики Казахстан (совместный с Казахским национальным университетом им. аль-Фараби проект по разработке экспериментального термоядерного реактора «Плазменный фокус»).

Наиболее весомый вклад в исследования внесли сотрудники лаборатории: академик Крохин О.Н., д.ф.-м.н. Грибков В.А., д.ф.-м.н. Никулин В.Я., к.ф.-м.н. Полухин С.Н., к.ф.-м.н. Калачев Н.В., к.ф.-м.н. Дубровский А.В., к.ф.-м.н. Тихомиров А.А., к.ф.-м.н. Силин П.В., с.н.с. Волобуев И.В., к.ф.-м.н. Цыбенко С.П. В работах также участвовали: к.ф.-м.н. Веретенников В.А., к.ф.-м.н. Семенов О.Г., н.с. Перегудова Е.Н., с.н.с. Гурей А.Е., к.ф.-м.н. Огинов А.В., к.ф.-м.н. Елисеев С.П., к.т.н. Ерискин А.А.

Основными научными достижениями Лаборатории ФПП являются следующие:

- Разработаны новые методы создания и диагностики плотной импульсной высокотемпературной плазмы в электроразрядных устройствах типа «плазменный фокус» (по патентам РФ № 135154 от 11.03.2013 и № 119895 от 04.05.2012);
- Проведено исследование устойчивости плазмы, создаваемой в установке типа «Плазменный фокус» (ПФ);
- Изучены механизмы формирования кумулятивных плазменных потоков и пучков быстрых ионов и электронов с экстремальными параметрами;
- Предложены способы повышения тока в установках ПФ, позволяющие преодолеть насыщение нейтронного выхода на установках мегаджоульного уровня;

- Изучен нейтронный скэйлинг установок ПФ с энергоемкостью от килоджоульного до мегаджоульного уровня, и этот скэйлинг хорошо согласуется с результатами измерений нейтронного выхода на установках ПФ в лабораториях различных стран;
- Экспериментально изучен процесс сжатия лайнеров и др. нагрузок в мощных ПФ разрядах и показано, что в эксперименте можно эффективно управлять фазовым состоянием конденсированной мишени и динамикой сжатия (подбором рабочего газа, выбором материала пылевой мишени);
- В экспериментах по воздействию плазменных потоков на материалы впервые показана возможность: перемещения атомов одного металла в другой, получения сплавов металлов, не растворяющихся друг в друге (по патенту РФ № 2313430, 2006 г.); например, таким способом реализована сварка образцов вольфрама и меди, свинца и железа, что может найти применение в электронной технике и машиностроении;
- Предложены новые способы поверхностного легирования металлов и нанесения покрытий с высокой степенью адгезии по патентам РФ № 146450 от 16.06.2014, № 134931 от 26.03.2013; № 134930 от 26.03.2013 и № 135319 от 25.03.2013); например, материалы-мишени для нейтронных генераторов можно создавать путём насыщения их изотопами водорода или трития свыше предела растворимости в материале мишени;
- Предложен метод введения легирующих элементов в плазму при ее прохождении через конусные отверстия, выполненные в пластине из легирующего вещества, с сублимацией этого металла в плазму фокуса и с последующим внедрением в материал мишени; так созданы поверхностные твёрдые растворы элементов, химически не взаимодействующих друг с другом в твёрдом состоянии (например, Cu – Nb, Cu-W);
- Впервые в мире в ФИАН при сотрудничестве с ИОФ РАН и ИМЕТ РАН были выполнены работы по воздействию на высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) ударных волн, генерируемых импульсной высокотемпературной плазмой, и показано, что ударно-волновое воздействие на ВТСП приводит к увеличению величины критического тока в композитных сверхпроводниках $YB_2Cu_3O_{x-7}$, BSCCO(2223) на основе $(BiPb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-x}$; способ обработки сверхпроводящих материалов описан в патенте РФ № 2404470 от 16.12.2009.

За цикл работ «Создание методов лазерной диагностики и исследование высокотемпературной плазмы в физическом эксперименте» В.А. Грибков был удостоен в 1986 г. Государственной премии СССР. Также за цикл совместных советско-польских работ по физике плотной высокотемпературной плазмы в 1987 году сотрудники лаборатрии Грибков В.А., Крохин О.Н., Никулин В.Я. и Калачев Н.В. были награждены Премией Министерства науки и образования Польши.

### 4.2.5 Исследования Лаборатории термоядерных мишеней (ЛТМ)

В 1973 г. в Нейтронно-Физическом лаборатории ФИАН была создана научная группа Ю.А. Меркульева (Рис. 4.13), которая в 1983 году была преобразована в сектор, а в 1990 - в лабораторию термоядерных мишеней (ЛТМ) в составе НФО, поскольку проводимые ею исследования были направлены, главным образом, на разработку технологии изготовления мишеней для лазерного термоядерного синтеза [23].

Рис. 4.13. Неформальное общение в Колонном зале ФИАН (слева направо): Ю.А Меркульев, А.М. Сергеев (будущий Президент РАН) и О.Н. Крохин

В то время в создании мишеней активно участвовали Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Бушуев В.С., Громов А.И., Дороготовцев В.М., Ковыльников В.Н., Корешева Е.Р., Меркульев Ю.А., Никитенко А.И., Осипов И.Е., Старцев А.С., Сутормин В.В., Толоконников С.М., Туривной А., Шиняев В. (научно-инженерный состав), операторы и техники Очаговская Е.А., Тонина Т.Т., Чернявская Т.В., Трактирников Р.Н., а также конструкторы, мастера-механики, радиотехники, студенты и прикомандированные. Многие работы проводились в кооперации с научными и производственными организациями России, такими как ИОФ РАН, ИНЭОС, ИОХ, ВНИИНМ, НИИЭФА, ИЯИ, МИФИ, ИПФ, МГУ, НИИЯФ, ИТЭФ, МИТХТ. В работах также принимали участие крупные партнеры по совместным проектам.

Результатом деятельности коллектива, руководимого Ю.А. Меркульевым (ушёл из жизни в 2015 г.), явилось развёртывание работ по всем направлениям мишеней и по их доставке в камеру взаимодействия. Поэтому, с утверждением национальной программы создания лазера на 3 МДж, ЛТМ стала головной организацией по мишеням. Как участник этой программы лаборатория выполняла для РФЯЦ ВНИИЭФ работы по созданию на территории Заказчика «фабрики мишеней» – сложного высокотехнологического комплекса, который включает

технологические карты, приборы и установки для изготовления полых микросфер с высокой симметрией (собственно топливные контейнеры лазерных мишеней), аппаратуру для контроля их качества, установки для заполнения оболочек изотопами водорода (D2 и DT), а также установки для производства криогенных лазерных мишеней и узел криогенного ввода мишени с тритием в камеру взаимодействия (разработан совместно с криогенным отделом ФИАН).

Как лидер в своей предметной области, Лаборатория ТМ впервые в Европе организовала в 1997 г. международную конференцию-выставку по мишеням и их применениям («Moscow Workshop on Targets and Applications» – MWTA). В дальнейшем эта конференция добавляла в свой формат выставки с предложением готовых к коммерциализации Российских оптических и других изделий, круглые столы и очные встречи руководителей международных программ с российскими партнерами. Такого формата в то время не существовало не только в Европе, но и в США, где каждые 1,5 года проходила конференция специалистов по изготовлению мишеней («Target Fabrication Specialists' Meeting» – TFSM). Кстати, участие в этой конференции было обставлено множеством ограничений, не раз приводивших к недопущению на неё иностранцев, особенно учёных России и Китая. В то же время американская сторона «уводила» на постоянную работу в США ключевых европейских специалистов.

Лаборатория ТМ обеспечивала и обеспечивает мишенями эксперименты по сжатию и нагреву плазмы на российских установках «Дельфин», «Кальмар», «Канал-2», «Пико», «Гарпун» (ФИАН), «Феникс» (ИОФАН), «Мишень» и «Ангара-5» (ТРИНИТИ), «Искра-4» и «ИСКРА-5» (РФЯЦ ВНИИЭФ), «Неодим» (ЦНИИМаш) и др. В зарубежных научных центрах Великобритании, Германии, Франции, Италии, США, Индии, Японии и Китая выполняются совместные международные проекты и утвержденные на правительственном уровне программы (например, МНТЦ, HiPER, COST, FAIR), а также эксперименты с мишенями. Более того, кроме разработки технологии производства и поставки оболочек-мишеней, специалисты ЛТМ изготовили и поставили по контрактам оборудование для производства оболочек-мишеней и заполнения их изотопами водорода во многие научные центры России, США, Китая и Индии.

В разное время международное сотрудничество осуществлялось на лазерных установках PALS (Чехия), OMEGA (США), VULCAN (Великобритания), GEKKO-12 (Япония) и с тяжело-ионными лабораториями ИТЭФ в Москве и ГСИ в Дармштадте (Германия). В ряде случаев в организации участвовало Отделение КРФ ФИАН. Так было организовано сотрудничество ФИАН с ENEA и эксперименты на лазере ABC во Фраскати (Италия), взаимодействие с институтом им. Калиского в Варшаве, с Центром современной технологии в Индоре и Центром атомных исследований им. Баба в Мумбаи (Индия). Стало традиционным участие иностранных учёных в проводимых ОКРФ и НФО конференциях и рабочих совещаниях (инициаторами часто выступали Н.Г. Басов, Г.В. Склизков, В.Б.

Розанов). Следует также упомянуть предложенные Н.Г. Басовым работы по водородной энергетике.

Много лет длилось организованное Ю.А. Меркульевым сотрудничество по мишеням и оборудованию с LLNL, General Atomics (USA) и с Китайской Академией ядерных и инженерных наук. Уже после 2001 года по инициативе Н.Г. Борисенко развернулись эксперименты с мишенями ЛТМ на лазерных установках LULI (Ecole Polytechnique) и LIL (близ Бордо) во Франции, CAT и BARC в Индии (Рис. 4.14), OMEGA-upgrade (LLE, Университет Рочестера) в США, PHELIX (Дармштадт) в Германии, GEKKO-12 в Университете Осака (Япония). Выполнены также уникальные стрельбы с одновременным облучением мишеней лазерными и тяжело-ионными пучками FELIX-UNILAC (GSI, Дармштадт). Ведутся разработки лайнеров разных конструкций для ТРИНИТИ и для программы FAIR. В рамках LaserLab Europe и в других структурах Лаборатория ТМ подает заявки для работы на крупных установках и получает к ним доступ на конкурсной основе.

Рис. 4.14. Сотрудники ЛТМ с гостями из Индии в Центре управления полетами (ЦУП). Слева направо: А.А. Акунец, В.С. Беляев (представитель ЦНИИМаш, г. Королев), Ю.А. Меркульев, L.J. Dhareshwar и N.K. Gupta (BARC, Mumbai), Н.Г. Борисенко

Предметом совместных исследований являются: поиск методов улучшения вложения энергии в мишень при облучении; изучение нелинейно-оптических свойств плазмы микрогетерогенных мишеней, процессов переноса и конверсии энергии, увеличения нейтронного выхода из малоплотного слоя; изучение условий инициируемой лазером генерации излучений и частиц из используемых мишеней; создание мишеней из альтернативных твердых топлив.

В настоящее время Лаборатория, которой заведует к.ф.-м.н. Н.Г. Борисенко (она же возглавляет НФО), продолжает работать по следующим направлениям:

1. Разработка и тиражирование криостатов для тритиевого перчаточного бокса, исследовательских и транспортных криостатов (совместно с Криогенным отделом ФИАН).
2. Работы по оболочкам из разных материалов оболочек; модернизация, дизайн и разработка оригинального дополнительного оборудования.
3. Разработка методами микро-капсулирования крупных полистирольных оболочек для заполнения термоядерным топливом и использования в установках мегаджоульного класса, в том числе: с возможностью бесследного удаления из металлических оболочечных конструкций.
4. Дизайн, разработка, изготовление и применение микрогетерогенных плоских и сферических образцов мишеней для повышения нейтронного выхода термоядерных реакций.
5. Разработка малоплотных планарных мишеней и мишеней с градиентом плотности; тестирование в экспериментах мишеней для лазерных и других видов драйверов.
6. Создание измерительных методик, анализирующей аппаратуры и программного обеспечения для определения многочисленных параметров лазерных мишеней.

Наиболее актуальными являются исследования малоплотных и микрогетерогенных мишеней. Начало этих работ можно отнести к 1987 году, когда в «Краткие сообщения по физике» вышла первая статья по увеличенному сжатию сферических мишеней со сверхрешеткой тяжелых примесей в сферических оболочках, облученных на установке «Дельфин» в ОКРФ. Но и сейчас разработки и апробация систем малоплотных абляторов, разравнивателей, конверторов и источников вторичных излучений и частиц из плазмы с высокой плотностью энергии являются первым по важности направлением (Н.Г. Борисенко, А.С. Орехов). Однако теперь ставится задача не разравнивать плотность лазерного излучения по поверхности мишени, а демпфировать появляющиеся гидродинамические неустойчивости любой природы. Это настолько важно, что репортаж о 2-3-кратном уменьшении Р-Т неустойчивостей при использовании изготовленных в НФО малоплотных аэрогелей, облученных на лазерной установке OMEGA-EP, прошел в 2016 г. не только в виде научных публикаций, но и в апрельском выпуске Physics Digest для широкой публики. Разработка таких сетчатых структур, при стремлении к около- и докритической плотности плазмы, выполняется для многих лазеров в разных лабораториях.

Расчет и эксперимент по стохастическому нагреву и ускорению электронов из малоплотных мишеней ЛТМ, выполненные в ОКРФ на лазерной установке «ПИКО» под руководством Г.В. Склизкова, показали поразительное количественное совпадение с результатами, полученными на немецком лазере с большей энергией на таких же мишенях.

Не менее важной задачей является разработка структур внутри мишеней для наполнения жидким водородом (и изотопами). Перспективными для этого считаются материалы на основе норборнена (например, norbornene cyclopentane

C7H10, 5-vynil-2-norbornene C9H12, 5-ethylene-2-norbornene). С мономерами и сомономерами возможно образование сетчатых и сшитых/сверхсшитых полимеров. Недавние образцы разработанных в ЛТМ (д.х.н. Пастухов А.В.) малоплотных сшитых и сверхсшитых полимерных структур совместно с коллегами из ОКРФ под руководством Зворыкина В.Д. исследованы на установке «Гарпун» с газовым KrF лазером, излучающим в УФ диапазоне.

Попытки на практике увеличить эффективность непрямого сжатия мишеней типа hohl-raum за счет применения малоплотных элементов привели к появлению покрытий пенами с полностью открытыми порами. Такая мишень из тяжелых элементов и не слишком малоплотная тестируется совместно с ОКРФ на установке «Канал-2» (Саакян А.Т., Пузырёв В.Н.). К достижениям по увеличению термоядерного выхода в экспериментах по прямому воздействию можно отнести проводимые в последнее время эксперименты с фемтосекундным облучением дейтерированных мишеней (Акунец А.А., ОКРФ) мишеней пониженной плотности в МГУ (Иванов К.А., Савельев-Трофимов А.Б.) а также эксперименты по боро-водородной безнейтронной реакции синтеза при облучении мишени (Громов А.И., Борисенко Н.Г.) на лазерной установке НЕОДИМ.

В недавних работах по мишеням для ЛТС и для исследований высокой плотности энергии в веществе принимали участие Акунец А.А., Александрова И.В., Артюков И.А., Борисенко Н.Г., Громов А.И., Демихов Е.И., Дороготовцев В.М., Завертяев М.В., Иванисова О.Е., Корешева Е.Р., Костров Е.А., Кувшинов И.Р., Литвин В.С., Меркульев Ю.А., Никитенко А.И., Борисенко Л.А., Орехов А.С., Павлов Д.В., Пастухов А.В., Перваков К.С., Тиликин И.А., Теремков П.А., Тимашева Т.П., Толоконников С.М., Рыбаков А.С., Халенков А.М., Шапкин А.А.. Принимают участие в экспериментах и являются соавторами по мишеням К.Е. Городничев (МИФИ), В.А. Даванков (ИНЭОС), А.С. Маликова (МГУ), В.Г. Пименов и Е.Е. Шевелева (ИОХ). Сотрудничают с ЛТМ также коллеги из МИТХТ им. М.В. Ломоносова (ныне в составе РТУ МИРЭА), ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, ГНИИХТЕОС, НИИВТ им. С.А. Векшинского, ТРИНИТИ, РФЯЦ ВНИИЭФ, Курчатовского института.

## 4.3 Лазерные исследования на Троицкой площадке

### 4.3.1 Структурные преобразования и направления лазерных исследований

По инициативе Н.Г. Басова в 1963 г. создано и в 1966 г. начало полноценно работать Особое Конструкторское Бюро (ОКБ) ФИАН в г. Троицке. По сути это научно-технологическое и конструкторское предприятие, оснащенное современным оборудованием для механической, опто-механической обработки различных материалов, разработки и монтажа радиоэлектронной аппаратуры, разработки и создания экспериментальных макетов и физических установок. Наличие высокопрофессиональных технологических, конструкторских, инженерных и рабочих кадров позволяло осуществлять не только обеспечение фундаментальных

исследований в области квантовой радиофизики, физики твердого тела и ядерной физики необходимыми устройствами, установками, оборудованием и материалами, но также полноправно участвовать в выполнении научно-исследовательских программ разработок лабораторий ОКРФ ФИАН.

Некоторые лаборатории Отделения КРФ размещались непосредственно на Троицкой площадке, например, в самом здании ОКБ – полностью Лаборатория стандартов частоты (ЛСЧ) и частично Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (ЛПЛЭН). Другая часть ЛПЛЭН располагалась в построенном в 1967 г. двухэтажном корпусе №1 КРФ и делила его с Лабораторией химических лазеров (ЛХЛ). Впоследствии для ЛХЛ был построен специализированный корпус №2 КРФ, в котором также расположилась и Лаборатория применения лазеров (ЛПЛ). В 2016 г. ЛХЛ и ЛПЛ вошли в новую Лабораторию инновационных лазерных систем (ЛИЛС).

В 2008 г. ОКБ ФИАН было преобразовано в Троицкое Обособленное подразделение Института (ТОП ФИАН) и при нём, с целью формирования среды, благоприятной для развития малого и среднего инновационного предпринимательства, было создано инновационное подразделение «Троицкий Технопарк». Тематика работ в Технопарке включает научное приборостроение, оптоэлектронику, лазерную технику, в том числе разработку и создание компонентов и полуфабрикатов для нее, материаловедение и создание новых материалов. Во многих помещениях бывшего ОКБ с тех пор работают малые предприятия, которые сохраняют и развивают традиции ОКБ ФИАН в разработке и создании современной научно-технической продукции. В настоящее время ТОП ФИАН возглавляет член-корреспондент РАН Наумов А.В., перешедший из ИСАН.

С целью расширения и укрепления ТОП в 2018 г. дирекция ФИАН приняла решение о переводе работающих на Троицкой площадке научных лабораторий в структуру ТОП. Так, из структуры Отделения КРФ были переведены в Отдел лазерных технологий ТОП: Лаборатория стандартов частоты (заведующий М.А. Губин), Лаборатория инновационных лазерных систем (заведующий Н.Н. Юрышев) и Лаборатория полупроводниковых лазеров с электронной накачкой (заведующий А.С. Насибов). Результаты и достижения работы этих лабораторий для полноты отражены в гл. 3, поскольку эта работа в период с 2001 г. и до конца 2021 г., в основном, осуществлялась по программам Отделения КРФ.

В настоящее время в ЛИЛС проводятся исследования спектральных и лазерных характеристик кристаллов A2B6 (ZnSe, ZnS, CdSe, CdS и др), легированных двухвалентными ионами переходных металлов (Cr, Fe и др.), разрабатываются на их основе лазеры среднего ИК диапазона (2-6 мкм) и изучаются возможности их применения в научных и прикладных исследованиях. Разрабатываются способы и устройства для эффективной генерации лазерных импульсов фемтосекундной длительности и исследуются возможности их применения в различных областях науки и техники.

Основными направлениями исследований ЛПЛЭН были полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком и электрическим полем («стримерные»), исследования по созданию полупроводниковых лазеров с комбинированной накачкой, по лазерному переносу вещества и по взаимодействию лазерного излучения с биомедицинскими объектами. В конце 2021 г. все эти исследования в лаборатории были закрыты в связи с уходом ведущих специалистов.

Исследования в ЛСЧ в настоящее время ведутся по трём направлениям в трёх группах. В научной группе «Высококогерентные полупроводниковые лазеры и их применения в метрологии» (руководитель к.ф.м.н. В.Л. Величанский) осуществляются:

- Создание и исследование спектральных, модуляционных и шумовых характеристик высококогерентных перестраиваемых диодных лазеров с внешним резонатором для применений этих лазеров в атомной спектроскопии, метрологии частоты и времени, в квантовой магнитометрии и медицине,
- Внутридоплеровская спектроскопия высокого разрешения, интерференция атомных состояний, магнитооптика, и
- Разработка технологии и производство малогабаритных резонансных ячеек с атомами щелочных металлов.

В научной группе «Прецизионных частотных измерений», (руководитель д.ф.м.н. М.А. Губин) ведутся:

- Разработки высокочувствительных методов выделения узких реперных линий и стабилизация по ним частоты газовых и твердотельных лазеров ИК диапазона, и
- Разработки методов и технологий создания оптико - микроволновых задающих генераторов со сверхнизким уровнем частотно-фазовых шумов на основе метановых оптических стандартов частоты и волоконных фемтосекундных радио-оптических синтезаторов.

В инженерной группе «Прецизионной оптики и вакуумных технологий» (руководитель Е.В. Филонов) задачами являются:

- Разработка и изготовление многослойных оптических покрытий со сверхмалыми потерями и сложным дизайном для задач лазерной физики, фотоники и оптических стандартов частоты,
- Разработка технологий и создание моноблочных газоразрядных и вакуумных элементов для стандартов частоты и задающих генераторов оптического и радио диапазонов.

Исследования по стандартам частоты требовали использования прецизионных оптических элементов (многослойных зеркал, фильтров и др.), изготовленных на самом высоком уровне, и поэтому в последние 15 лет парк технологического оборудования ТОП постоянно и существенно обновлялся. Большую роль в модернизации бывшего ОКБ сыграли непосредственно директора ФИАН академик РАН Месяц Г.А. и член-корреспондент РАН Колачевский Н.Н.

Ниже будут рассмотрены исследования Лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой, ведущиеся на Троицкой площадке с 2001 г. (с 2018 в структуре

ТОП) и не вошедшие в Гл. 3 по причине, указанной в разделе 4.4.2. В следующем разделе 4.4.3 будут описаны работы ООО «Авеста» - инновационного малого предприятия, участвующего в разработке и создании современной приборной базы для лазерных исследований, востребованной не только лабораториями Отделения КРФ, но и многими др. научными учреждениями, включая зарубежные.

### 4.3.2 Исследования Лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой

В 2018 г. в структуру ТОП вошла Лаборатория лазеров с катодно-лучевой накачкой (ЛЛКЛН), которой руководит д.ф.-м.н. Козловский В.И. Она выросла из научной группы, постоянно работающей на Троицкой площадке, но структурно перешедшей в 2001 году из лаборатории ПЛЭН Отделения КРФ в Нейтронно-физический отдел ФИАН. Основными направлениями научных исследований ЛЛКЛН в настоящее время являются:

- Разработка перестраиваемых лазеров среднего инфракрасного диапазона на кристаллах соединений $A_2B_6$ с ионами переходных металлов,
- Разработка полупроводниковых дисковых лазеров и систем на их основе,
- Разработка источников среднего ультрафиолетового излучения в области 250-300 нм на основе наноразмерных гетероструктур AlGaN с накачкой электронным пучком.

В состав лаборатории в период с 2001 по 2021 гг. входили такие активные научные сотрудники ФИАН как Печенов А.Н., Лаврушин Б.М., Скасырский Я.К., Коростелин Ю.В., Крыса А.Б., Зверев М.М., Санников Д.А., Свиридов Д.Е. Они внесли существенный вклад в развитие технологии и физики кристаллов и наногетероструктур $A_2B_6$ и в создание на их основе лазеров видимого и среднего инфракрасного диапазона.

За последние двадцать лет в рассматриваемой предметной области можно отметить четыре наиболее важных достижения. Прежде всего это развитие полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком. Как известно, первый в мире полупроводниковый лазер с такой накачкой был запущен в ФИАНе Н.Г. Басовым, О.В. Богданкевичем и А.Г. Девятковым в 1964 г. В развитие данного направления в лаборатории КРФ был создан сектор О.В. Богданкевича. В 1970 году Н.Г. Басовым, О.В. Богданкевичем и А.С. Насибовым было оформлено изобретение лазерной электронно-лучевой трубки (ЛЭЛТ). Для реализации этого изобретения была сформирована Лаборатория ПЛЭН под руководством А.С. Насибова.

Создание ЛЭЛТ потребовало развития технологии выращивания крупных монокристаллов соединений $A_2B_6$ с длиной усиления активного элемента всего 5-10 мкм и проведения исследований физических процессов в данных кристаллах при высоких уровнях возбуждения. К 1990 г. впервые в мире в ФИАН был создан действующий макет цветного проектора на основе трех ЛЭЛТ с монокристаллическими полупроводниковыми мишенями – экранами, который демонстрировался многим специализированным компаниям со всего мира. В НПО Платан тем временем под руководством В.Н. Уласюка (бывшего аспиранта О.В.

Богданкевича) и при поддержке сотрудников ЛПЛЭН был создан отпаянный вариант ЛЭЛТ, на основе которого был создан цветной лазерный проектор. Однако практическое использование ЛЭЛТ без криогенного охлаждения было ограниченным вследствие больших порогов лазерной генерации, существенно ухудшающих качество изображения и снижающих срок службы таких приборов.

Были предприняты попытки повышения рабочей температуры лазерных экранов – активных элементов ЛЭЛТ, но они показали, что монокристаллические экраны не имеют перспектив практического применения и надо переходить на использование наноразмерных гетероструктур. Эти работы были начаты еще в ЛПЛЭН, но были существенно расширены в первое десятилетие XXI века уже в новой лаборатории (ЛЛКЛН) и с новым оборудованием, хотя и в прежних помещениях здания ОКБ.

В ЛЛКЛН была создана лабораторная установка выращивания гетероструктур $A_2B_6$ из металлоорганических соединений. Кроме того, лаборатория проводила совместные технологические исследования с многими лабораториями России и зарубежных стран. Существенный вклад в эти исследования внесли: бывший аспирант А.Б. Крыса (в настоящее время один из ведущих технологов Великобритании), бывший сотрудник ОФТТ ФИАН Ю.Г. Садофьев, руководитель технологической группы ФИРЭ РАН (г. Фрязино) П.Г. Кузнецов и другие. Тесное сотрудничество по созданию гетроструктурных лазерных мишений для ЛЭЛТ велось лабораторией и с компанией Principia Lightworks Inc. (США), которая, в свою очередь, подключила к этой работе компании Bandwidth Semiconductor (США), Bremen University (Германия) и Shanghai Forealight (Китай).

В результате были созданы экспериментальные активные лазерные экраны на основе гетероструктур, излучающих в синей, зеленой и красной областях спектра и работающих при комнатной температуре. Мощность излучения превышала 3 Вт, а эффективность преобразования энергии электронного пучка в лазерное излучение составила 5-10%. Были также решены многие технологические и физические проблемы, такие как реализация встроенного брэгговского зеркала, оптимизация параметров квантовых ям, реализация резонансно-периодического усиления. При этом надо отметить, что разрабатывался высокодобротный резонатор с активной средой, у которой длина усиления на превышала 0,2 мкм (!). К сожалению, эти результаты не были доведены до прибора, поскольку международная кооперация распалась, а уровень технологических установок эпитаксиального роста структур в России был пока ещё недостаточно высок для самостоятельной работы. Кроме того, в те годы наблюдалось снижение интереса к вакуумным приборам.

Вторым важным достижением лаборатории явилось развитие технологии выращивания из паровой фазы монокристаллов соединений $A_2B_6$, легированных переходными металлами, и технологии создания на их основе широко перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона. Данное направление развивается в кооперации с группой М.П. Фролова из Лаборатории инновационных лазерных систем ФИАН. Основой новой разрабатываемой технологии является та же

технология, которая уже была развита для изготовления монокристаллических лазерных экранов ЛЭЛТ. Для легирования кристалла переходными металлами, которые имеют низкое равновесное давление паров при температуре роста кристалла, были изобретены несколько приемов, позволяющих решить проблему эффективного легирования. Основным разработчиком уникальной технологии является к.т.н. Коростелин Ю.В. (Рис. 4.15).

В результате проведенной работы впервые в мире были запущены лазеры на кристаллах CdSe:Cr, CdS:Cr, CdSe:Fe, ZnTe:Fe, CdTe:Fe, ZnS:Fe, с помощью которых перекрыт спектральный диапазон от 2 до 7 мкм. Достигнута рекордная энергия 10,6 Дж в импульсе на кристалле ZnSe:Fe (длина волны вблизи 4 мкм). Впервые запущен непрерывный лазер ZnSe:Fe. Данные лазеры использованы в высокоразрешающей внутрирезонаторной спектроскопии вредных газов. Запущен также лазер Cr:ZnSe в режиме фемтосекундных импульсов.

Рис. 4.15. Ю.В. Коростелин контролирует режим работы ростовых печей

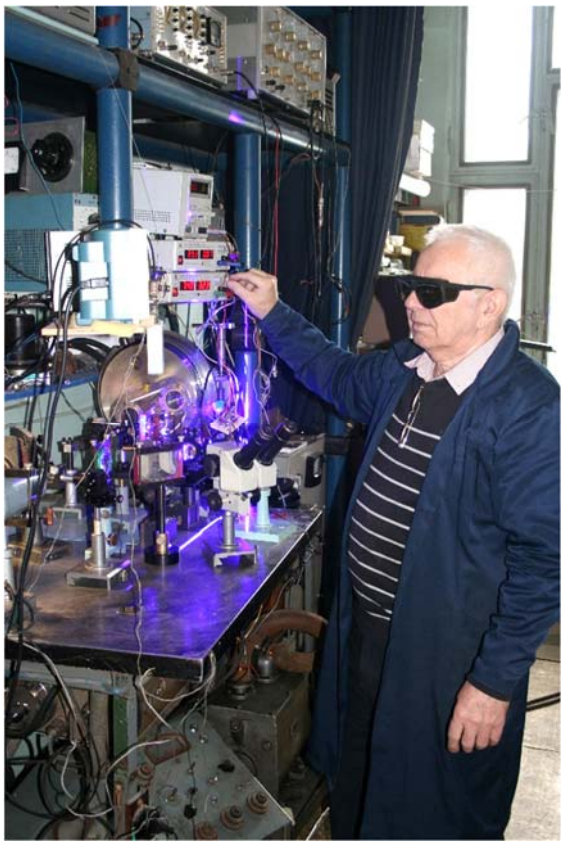


Рис. 4.16. В.И. Козловский исследует характеристики дискового лазера

Лаборатории ЛЛКЛН и ЛИЛС – первые в России, которые начали развивать лазеры данного типа. В настоящее время на кристаллах ФИАН ведутся исследования в МГУ, ИОФРАН, ВНИИЭФ, ИПФРАН и в ряде других организаций. Разрабатываемые лазеры перспективны для применений в спектроскопии сложных молекул, экологическом контроле атмосферы, в медицине, лидарах и др. приборах.

Третьим достижением лаборатории является разработка и создание полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) с оптической накачкой (Рис. 4.16). Этот лазер содержит тонкий активный слой полупроводникового материала с зеркалом на одной из его поверхностей и с внешним зеркалом обратной связи. Идея этого лазера исходит из предложения Н.Г. Басова в его нобелевской лекции о создании лазера типа «излучающего зеркала». Современный дизайн лазера был впервые опубликован американской группой в 1997 году. Лазер состоит из гетероструктуры, содержащей встроенное брэгговское зеркало и резонансно периодическую активную часть из нескольких квантовых ям. Резонатор формируется брэгговским зеркалом и внешним зеркалом обратной связи. Структура накачивается излучением лазерного диода.

Этот дизайн структуры практически совпадает с дизайном структуры, разрабатываемой в ЛЛКЛН для ЛЭЛТ. Единственным отличием резонатора ПДЛ от активного лазерного экрана ЛЭЛТ является то, что используется внешнее зеркало, а не микрорезонатор. ПДЛ имеют большое практическое значение. Мощность таких лазеров достигает 100 Вт, качество лазерного пучка близко к дифракционному пределу, эффективность лазера достигает 40 %. Внутрирезонаторное нелинейное преобразование позволяет освоить видимый и частично УФ диапазоны, а также средний ИК и терагерцовый диапазоны.

В рамках данного направления сначала впервые были запущены ПДЛ с накачкой импульсным электронным пучком, излучающие в ближнем ИК, красном, зеленом и синем диапазонах. Мощность составляла от 2 до 10 Вт в зависимости от диапазона. При этом направленность излучения была близкой к дифракционному пределу, угол расходимости составлял несколько миллирадиан. Необходимость в электронной накачке возрастает при накачке широкозонных гетероструктур, для которых еще нет коммерчески доступных лазерных диодов. Была изобретена схема (имеется патент России) непрерывного ПДЛ с накачкой сканирующим электронным пучком.

Недавно в лаборатории начались исследования, направленные на создание ПДЛ с оптической накачкой, излучающего в видимой области спектра. На основе этих лазеров и внутрирезонаторного удвоения частоты планируется создать лазерный излучатель для среднего ультрафиолетового диапазона спектра (240-280 нм). В настоящее время ПДЛ работают, в основном, на гетеструктурах $A_3B_5$, излучающих в ближнем ИК диапазоне. Нелинейное преобразование этого излучения в средний УФ диапазон мало эффективно.

В 2021 году в лаборатории аспирантом Бутаевым М.Р. выращены и исследованы новые гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа и впервые получена генерация на этих структурах с использованием микрорезонатора при оптической накачке как $N_2$-лазером, так и коммерческим лазерным диодом на основе гетероструктуры InGaN/GaN. Впервые создан ПДЛ на гетероструктуре CdS/ZnSe с накачкой $N_2$- лазером.

Четвертым достижением в работе лаборатории является создание совместно с Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе РАН эффективных излучателей среднего УФ диапазона (240-260 нм) на основе гетероструктур GaN/AlN с накачкой мощным электронным пучком. Проведенные исследования позволили оптимизировать дизайн структуры, так что. в настоящее время удалось реализовать некогерентный источник излучения с импульсной мощностью до 15 Вт при использовании для накачки электронной пушки с плазменным катодом. Существенный вклад в эти исследования внес д.ф.м.н. Зверев М.М.

В планах лаборатории создать на исследуемых структурах лазер как с поперечной, так и с продольной накачкой электронным пучком. Разрабатываемые портативные источники среднего УФ диапазона перспективны для дезинфекции воды, воздуха и продуктов питания в домашних и походных условиях. Кроме того, они перспективны для фотолитографии, могут использоваться в медицине, лакокрасочной промышленности и в других областях. Лазерные источники необходимы для обнаружения вредных веществ методом комбинационного рассеяния. Электронная накачка имеет ряд преимуществ перед токовой накачкой широкозонных соединений GaAlN.

### 4.3.3 Разработки предприятия ООО «Авеста-Проект» в ТОП ФИАН

Компания ООО «Авеста-Проект» является одним из наиболее коммерчески успешных резидентов Троицкого технопарка ФИАН. Основным направлением её деятельности является разработка, производство и наладка твердотельных и волоконных фемтосекундных лазерных систем и усилителей, а также различной измерительной и диагностирующей аппаратуры на их основе. Это работы мирового уровня, некоторые из них уникальные, например, система для измерения контрастных фемтосекундных импульсов. [24]

Фемтосекундные лазеры излучают ультракороткие импульсы длительностью от единиц до сотен фемтосекунд и обладают высокой пиковой мощностью при относительно небольших (лабораторных) размерах. Например, титан-сапфировый лазер с импульсами в диапазоне 6-500 фс может излучать пиковую мощность в 10 ТВт, превышающую мощность всех электростанций на планете. Возможные применения такой системы включают исследования по ускорению частиц, термоядерному синтезу и генерации плазмы, по генерации рентгеновского излучения и даже аттосекундных импульсов. Возможно использование системы в качестве задающего блока в усилителях петаваттного уровня, для удаленного мониторинга загрязнения атмосферы или контроля электрических разрядов с помощью филаментов. Благодаря своим характеристикам, подобные лазерные системы нашли применение почти во всех областях деятельности человека, от медицины до космических технологий (Рис. 4.17).

Компанию ООО «Авеста-Проект» зарегистрировал в 1998 г. Конященко А.В., научный сотрудник Лаборатории химических лазеров ОКРФ, руководимой тогда лауреатом Государственной премии профессором П.Г. Крюковым (см. п. 2.2.5).

Заделом для начала работы компании явились результаты проводимых в девяностые годы исследований ЛХЛ по лазерам фемтосекундных импульсов. Тогда были разработаны, исследованы и доведены до уровня научных приборов установки генераторов и усилителей фемтосекундных импульсов, а также устройства, обеспечивающие спектральные измерения со сверхвысоким временным разрешением. При использовании лазерных элементов из сапфира, активированного ионами трехвалентного титана, изготовленных в Институте кристаллографии РАН, была получена минимальная длительность импульса 16 фс, а после усиления энергия импульса возрастала до 1 мДж при длительности не более 50 фс и частоте повторения 1кГц. Был также разработан источник фемтосекундных импульсов, перестраиваемых по длине волны в диапазоне 275 - 2500 нм. Эти результаты отвечали самому высокому уровню лазерных установок фемтосекундных импульсов того времени.

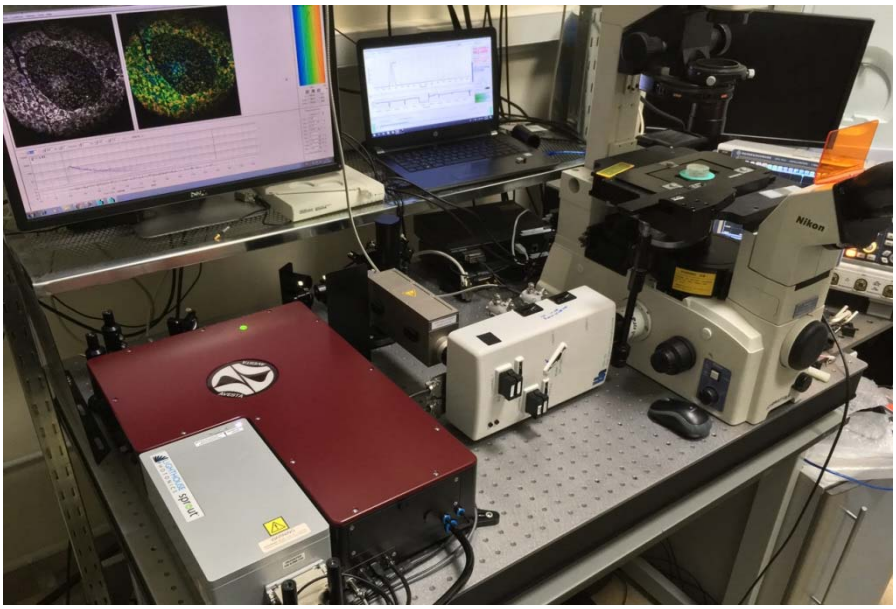



Рис. 4.17.. Титан-сапфировый фемтосекундный лазер TiF-100ST-F6 (на столе слева спереди) с модулем двухфотонной FLIM-микроскопии производства Becker & Hickl и мокроскопом Nikon

В ООО «Авеста-Проект под руководством А.В. Конященко разработаны и изготавливаются для работы в фемтосекундном режиме лазерные системы на основе кристаллов форстерита и сапфира, а также волоконные лазеры. Эти системы отвечают современному научно-техническому уровню (см. каталог «Авеста-Проект» на сайте http://avesta.ru/), вполне доступны для бюджетных организаций, и их использование способствует развитию лазерных исследований в нашей стране. В лаборатории стандартов частоты ОКРФ, например, непрерывный фемтосекундный волоконный лазер компании используется в компактной и удобной схеме сверхточных оптических часов.

Четверть века компания «Авеста-Проект» производит и поставляет фемтосекундное лазерное оборудование на российский и международный рынок.

Клиентская база компании насчитывала в 2017 г. уже более 2500 клиентов по всему миру. Штат компании составляет около 50 сотрудников. Все лазерные системы, представленные на сайте http://avesta.ru/, разрабатываются и производятся силами компании, так как обширная производственно-техническая база позволяет изготавливать все необходимые комплектующие самостоятельно. Сотрудники компании имеют большой опыт в разработке оборудования по заказу клиента.

По сравнению с дистрибьюторами/поставщиками зарубежного оборудования компания «Авеста-Проект» имеет ряд преимуществ, в том числе:

- поставка лазерных комплексов осуществляется «под ключ» (источник, диагностика, компоненты, оптика и оптомеханика – всё от единого поставщика);
- прямая поставка от производителя позволяет исключить посредника и тем самым обеспечивает оптимальную стоимость и сроки поставки**;**
- отсутствует необходимость сложного таможенного оформления для покупки, отправки в ремонт и возврата, так как производство находится в Москве;
- наконец, клиент и квалифицированный инженер общаются напрямую, без «испорченного телефона» и на родном языке.

Продукция компании – это [25]:

1) Лазеры (волоконные фемтосекундные, титан-сапфировые фемтосекундные, хром-форстеритовые фемтосекундные, Yb- твердотельные фемтосекундные, параметрические генераторы, многоканальные твердотельные, фемтосекундные и CW конструкторы, непрерывные и диодные лазеры);
2) Фемтосекундные усилители (волоконные, титан-сапфировые твердотельные, иттербиевые твердотельные, хром-форстеритовые твердотельные, тераваттные системы, капиллярные компрессоры, рамановские преобразователи);
3) Приборы диагностические (спектрометры, фотоприемники, сканирующие автокорреляторы, одноимпульсные автокорреляторы, спайдеры, измерители контраста);
4) Компоненты (селекторы импульсов, фазово-частотная привязка, изоляторы и ротаторы Фарадея, генераторы гармоник, компенсаторы дисперсии, оптические ослабители, опто-механические модуляторы, генераторы суперконтинуума, генераторы ТГц излучения, лабораторное оборудование).

Клиентам по их ТЗ, например, поставлены:

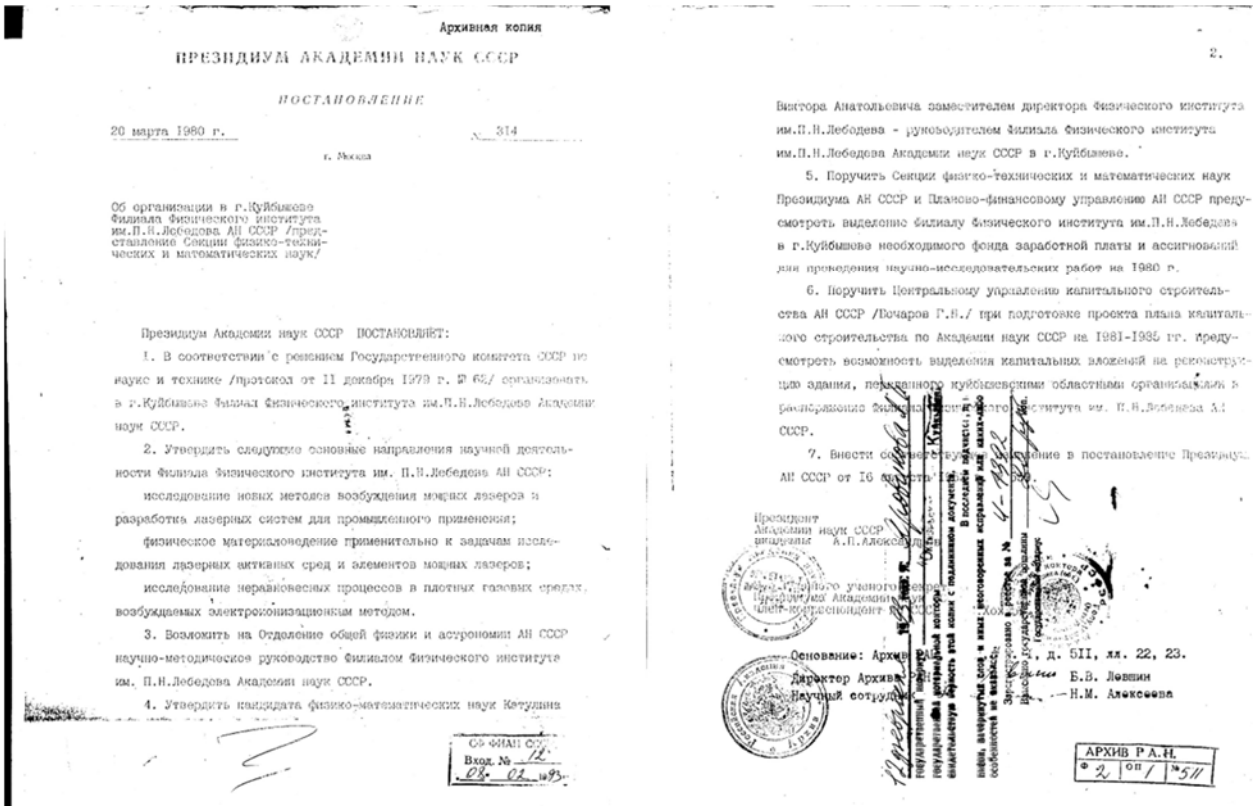
- Титан-сапфировая система REUS-C на 800 нм с двумя отдельными трактами излучения на 2 мДж (регенеративный усилитель) и на 20 мДж (многопроходовый усилитель), длительность <40 фс в сжатом импульсе, частота повторения импульсов 10 Гц;
- Полностью автоматизированный титан-сапфировый осциллятор TiF-100ST-F6 в установке двухфотонной FLIM-микроскопии (Рис. 4.17)
- Фемтосекундные осцилляторы TiF-SP-30-F6 и TiF-100ST-LW-F10 с генератором второй гармоники и автокоррелятором

- Тераваттная система на хром-форстерите (для ФЛЦ ОИВТ РАН) с пиковой мощностью в импульсе более 1 ТВт на длине волны 1240 нм.
- Фемтосекундный усилитель на хром-форстерите FREGAT-1m50 (1240 нм, 120 фс, 1 мДж, 50 Гц)

## 4.4 Лазерные исследования в Самарском (Куйбышевском) филиале ФИАН

### 4.4.1 Создание и становление филиала

Самарский (Куйбышевский до 1991 г.) филиал ФИАН образован согласно постановлению № 314 Президиума АН СССР от 20 марта 1980 г. (Рис. 4.18), подготовленному на основании совместной инициативы руководства Куйбышевской области и лауреата Нобелевской премии директора ФИАН академика Н.Г. Басова. Её целью было использование научных разработок ФИАН для создания новых перспективных лазерных систем и технологий в интересах мощного машиностроительного комплекса города Куйбышева и области. Они на тот момент представляли собой развитый индустриальный регион, располагающий высококвалифицированными кадрами в машиностроении, химической и авиационной промышленности. Регион также обладал мощной энергетической базой, большими строительными возможностями и был заинтересован в увеличении научного потенциала.



Архивная копия

ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ПОСТАНОВЛЕНИЕ

20 марта 1980 г. № 314

г. Москва

Об организации в г.Куйбышеве Филиала Физического института им.П.Н.Лебедева АН СССР /представление Секции физико-технических и математических наук/

Президиум Академии наук СССР ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. В соответствии с решением Государственного комитета СССР по науке и технике /протокол от 11 декабря 1979 г. № 62/ организовать в г.Куйбышеве Филиал Физического института им.П.Н.Лебедева Академии наук СССР.

2. Утвердить следующие основные направления научной деятельности Филиала Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР:

исследование новых методов возбуждения мощных лазеров и разработка лазерных систем для промышленного применения;

физическое материаловедение применительно к задачам исследования лазерных активных сред и элементов мощных лазеров;

исследование неравновесных процессов в плотных газовых средах, возбуждаемых электроионизационным методом.

3. Возложить на Отделение общей физики и астрономии АН СССР научно-методическое руководство Филиалом Физического института им. П.Н.Лебедева Академии наук СССР.

4. Утвердить кандидата физико-математических наук Кетулина

2.

Виктора Анатольевича заместителем директора физического института им.П.Н.Лебедева - руководителем Филиала физического института им.П.Н.Лебедева Академии наук СССР в г.Куйбышеве.

5. Поручить Секции физико-технических и математических наук Президиума АН СССР и Планово-финансовому управлению АН СССР предусмотреть выделение филиалу физического института им.П.Н.Лебедева в г.Куйбышеве необходимого фонда заработной платы и ассигнований для проведения научно-исследовательских работ на 1980 г.

6. Поручить Центральному управлению капитального строительства АН СССР /Бочаров Г.Н./ при подготовке проекта плана капитального строительства по Академии наук СССР на 1981-1985 гг. предусмотреть возможность выделения капитальных вложений на реконструкцию здания, переданного куйбышевскими областными организациями в распоряжение Филиала Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР.

7. Внести соответствующее дополнение в постановление Президиума АН СССР от 16 августа

Президент Академии наук СССР академик А.П.Александров

Основание: Архив

Директор Архива Б.В. Левшин

Научный сотрудник Н.М. Алексеева

ОФ ФИАН СССР Вход. № 12 08.02.1983

АРХИВ РАН Ф 2 оп 1 № 511

Рис. 4.18. Постановление Президиума АН СССР №314 от 20 марта 1980 г. об организации в г. Куйбышеве филиала ФИАН

В апреле 1980 г. Н.Г. Басов вместе с небольшим коллективом сотрудников Отделения КРФ ФИАН прибыл в г. Куйбышев на самолёте, предоставленном И.А. Бережным, руководителем местного КБ автоматических систем. В числе прибывших были лауреаты Ленинской премии доктора физ.-мат. наук Попов Ю.М. и Розанов В.Б., лауреат Государственной премии доктор физ.-мат. наук Катулин В.А., доктора физ.-мат. наук Виноградов А.В. и Ораевский А.Н., кандидаты физ.-мат. наук Игошин В.И., Ковш И.Б., Компанец И.Н., Маркин Е.П. и Петров А.Л. В здании областного комитета КПСС, где собрались многие руководители предприятий, представители научной общественности и студенты вузов, сотрудники ФИАН выступили с краткими сообщениями о своих работах в области лазерной физики. Н.Г. Басов проинформировал собравшихся о развертывании филиала ФИАН, о направлениях его работы и представил первого директора Филиала – доктора физико-математических наук В.А. Катулина, крупного специалиста в области создания и использования мощных лазеров (Рис. 4.19). Создание Филиала приветствовали в своих выступлениях: организатор исследований по лазерной технике в г. Куйбышеве, проректор Куйбышевского авиационного института В.П. Шорин, ректор Куйбышевского государственного университета В.В. Рябов, а также академик АН СССР Кузнецов Н.Д. – выдающийся конструктор авиационных двигателей, в тот же день познакомивший сотрудников ФИАН с руководимым им предприятием, его достижениями и проблемами.

Рис. 4.19. В.А. Катулин – основатель и первый директор Куйбышевского (Самарского) филиала Физического института имени П.Н. Лебедева (СФ ФИАН), д.ф.-м.н., профессор, дважды лауреат Государственной премии

Вскоре в Куйбышев, уже для постоянной работы в Филиале, приехали высококвалифицированные специалисты по физике лазеров и твердому телу – сотрудники Отделения КРФ ФИАН Петров А.Л. и Игошин В.И., сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (г. Саров) Николаев В.Д., а также молодые учёные – амбициозные выпускники специального факультета физики МИФИ и аспиранты Гуреев Д.М., Казакевич В.С., Каюков С.В., Котов Е.В., Котова С.П., Куприянов Н.Л., Куприянова Н.Г., Малов А.Н., Мнацаканян Э.А., Завестовская И.Н., Канавин А.П., Ламажапов Х.Д., прошедшие школу выполнения исследований в ФИАН. Кроме них, первыми научными сотрудниками Филиала были, в основном, выпускники ведущих московских вузов (МИФИ, МГУ, МФТИ). Так при непосредственном внимании Н.Г. Басова (Рис. 4.20) формировался научный коллектив Филиала.

Рис. 4.20. Директор ФИАН академик Н.Г. Басов в лаборатории СФ. Слева направо: к.ф.-м.н. А.Л. Петров, директор филиала д.ф.-м.н. В.А. Катулин, к.ф.-м.н. Э.А. Мнацаканян

В 1980 г. в КГУ была открыта кафедра оптики и спектроскопии, которую с момента создания и до конца жизни (1998 г.) возглавлял профессор Катулин В.А. Спецкурсы по этой специализации стали читать ученые ФИАН. Намечались совместные научно -исследовательские работы сотрудников Филиала в лабораториях Университета, а ученых, аспирантов и дипломников Университета – в лабораториях Куйбышевского филиала ФИАН. Со временем Физический факультет КГУ стал основным поставщиком молодых научных кадров для Филиала. Так, его выпускником является нынешний директор СФ ФИАН д.ф.-м.н. В.Н. Азязов. В СФ ФИАН успешно работают также выпускники Физического факультета д.ф.-м.н.

Шишковский И.В., к.ф.-м.н. Майорова А.М., к.ф.-м.н. Самагин С.А., к.ф.-м.н. С.А. Пичугин и др.

В 1989 г. Президиум АН СССР и Министерство высшего и среднего профессионального образования РСФСР издали совместный приказ о создании научно-учебного Центра лазерной технологии на базе Филиала ФИАН и КГУ. Научным руководителем этого Центра был назначен В.А. Катулин. К настоящему времени в сферу работы Центра включены практически все высшие учебные заведения г. Самары, имеющие отношение к лазерной физике и оптике.

Первые структурные подразделения Куйбышевского филиала возглавили: лазерно-измерительную лабораторию – д.ф.-м.н. В.А. Катулин (в её состав вошли сектор бесконтактной диагностики с заведующим к.ф.-м.н. Маловым А.Н. и сектор исследования воздействия лазерного излучения на вещество с заведующим к.ф.-м.н. Мнацаканяном Э.А.); лабораторию мощных лазеров – к.ф.- м.н. Петров А.Л. (в ней сектором технологических лазеров руководил к.ф.-м.н. Николаев В.Д., а сектором лазерной обработки материалов – к.ф.-м.н. Гуреев Д.М.); теоретический сектор – к.ф.-м.н. Игошин В.И.

Руководителем Филиала В.А. Катулиным, ставшим также заместителем директора ФИАН, была проведена поистине титаническая научно-организационная и хозяйственная работа, в результате которой Филиал был обеспечен производственными площадями и материалами, были разработаны структура и план развития Филиала, осуществлены ремонт старого и строительство запланированного нового здания, была создана экспериментально-техническая и технологическая база, экспериментальные установки, сформирован коллектив сотрудников – энтузиастов. Вскоре были получены первые новые научные результаты по лазерной технологии и технологическим лазерам и установлено плодотворное сотрудничество с вузами, НИИ и промышленными предприятиями в Куйбышеве, а также в нашей стране и за рубежом.

Кажется невероятным, как В.А. Катулин решил целый комплекс свалившихся на него сложнейших проблем. Но его талант, воля и необычайное трудолюбие, а также доброта, отзывчивость и постоянная забота о людях сделали свое дело (с их активным участием). Конечно, быстрое становление Филиала стало возможным и благодаря вниманию головного Института, который все годы всесторонне поддерживал Филиал богатейшим опытом, экспериментальной базой, своим именем.

В очень трудный период становления Филиал поддержало и областное руководство, которое понимало, что мощный передовой регион получает с открытием филиала ФИАН технологии XXI века, новые перспективы и стимулы развития не только фундаментальной, но и широкого спектра прикладной науки. Область и город предоставили производственные площади, а к своему десятилетию в 1990 г. Филиал получил новый, красивый, специально спроектированный корпус площадью более 5000 м$^2$. Область оказала также большую помощь в строительстве

жилья для сотрудников Филиала, что сыграло огромную роль для становления его коллектива.

Под патронажем областных властей была разработана региональная программа «Jlазерная технология», и это позволило в кратчайшие сроки установить контакты с ведущими предприятиями, почувствовать их проблемы. Ключевой фигурой в реализации этой программы был академик Н.Д. Кузнецов, который в то время являлся председателем научно-технического совета при областном комитете КПСС. С целью создания и тиражирования лазеров для предприятий области он организовал кооперацию из семи предприятий Куйбышева и филиала ФИАН. В Филиале в рамках этой программы под руководством Шепеленко А.А. и Николаева В.Д. в 1989 г. был разработан четырёхкиловаттный лазер «Локон» и предложен проект быстропроточного технологического $C0_2$-лазера мощностью 7 кВт «Самара-2» с излучателем оригинальной конструкции, уникальной по своей компактности.

На разных этапах помощь и поддержку Филиалу в его становлении оказывали ректоры Куйбышевского авиационного института профессор Лукачев В.П. , академик Шорин В.П. , член-корреспондент Сойфер В.А. и ректоры Самарского государственного университета профессора Рябов В.В., Храмков Л.В., Яровой Г.П. Теперь оба вуза объединены в один – Самарский национальный исследовательский университет имени академика А.П. Королева, сотрудничество с которым продолжается.

В трудные «перестроечные» годы созданный В.А. Катулиным коллектив филиала выстоял, выполнил многие поставленные задачи и нашел новые задачи в актуальных направлениях. В течение 18 лет заместитель директора Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, член Президиумов Самарского научного центра и Поволжского отделения Инженерной академии наук, действительный член Российской Инженерной академии, дважды лауреат Государственной премии (1980 и 1997 гг.), доктор физико-математических наук, профессор В.А. Катулин являлся бессменным руководителем Филиала, возглавлял разработки по созданию технологических лазеров нового поколения и лазерных технологий на их основе для задач машиностроения. После В.А. Катулина директорами Филиала становились Петров А.Л. (1998 – 2016 гг.), Казакевич В.С. (2016 – 2019 гг.), Азязов В.Н. (2019 г. – по н/вр.). Учитывая плодотворную работу Азязова В.Н. в СФ ФИАН, в 2021 г. он был удостоен ведомственной награды Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – медали "За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития".

За годы своего развития при жизни В.А. Катулина и Н..Г. Басова Самарский филиал получил фундаментальные результаты мирового уровня, разработал и внедрил в отечественную промышленность ряд передовых лазерных технологий, стал мощным катализатором развития лазерного направления исследований и практических (внедренческих) работ в Куйбышеве – Самаре [26-28]. В результате филиал приобрел статус авторитетного лазерного центра, хорошо известного и в России, и за рубежом.

### 4.4.2 Главные достижения в прошлом столетии

К главным результатам. двадцатилетней работы Филиала по основным направлениям его деятельности в прошлом столетии можно отнести следующие:

- Создание мощных лазеров: разработан и изготовлен единственный в мире прототип промышленного импульсно-периодического электроионизационного CO-лазера замкнутого цикла (ИП-CO-ЭИЛ);
- Лазерная обработка материалов: впервые предложена, построена и развита физическая модель процесса глубокого плавления металлов импульсным лазерным излучением миллисекундного диапазона длительности, с помощью которой успешно решен ряд задач лазерной технологии на предприятиях Самары и Поволжского региона;
- Модальные жидкокристаллические (ЖК) линзы и корректоры: предложен модальный принцип управления ЖК элементами; реализованы перестраиваемые ЖК линзы апертурой до 80 мм; созданы модальные ЖК корректоры волнового фронта, в том числе с использованием керамической подложки;
- Оптика спиральных пучков: найден, полностью описан и реализован экспериментально новый класс лазерных пучков, названных спиральными; с их помощью проведены эксперименты по манипуляции микроскопическими объектами по их захвату, вращению и движению по заданной траектории.
- Диодные лазеры: разработана оригинальная методика измерений астигматических расстояний К-фактора Питермана диодных лазеров; на основе диодного лазера с внешним отражателем в виде тандемного интерферометра создан модуляционный спектрометр с быстродействующим и наиболее чувствительным режимами работы;
- Аддитивные технологии: сформировано новое фундаментальное направление лазерной технологии, а именно – взаимодействие лазерного излучения с многокомпонентными порошковыми композициями, приводящее к послойному синтезу из них объемных функциональных градиентных изделий;
- Физика кислородно-йодного лазера: разработанные в СФ ФИАН прототипы генераторов синглетного кислорода использовались практически во всех лабораториях мира, где проводились исследования химического кислородно-йодного лазера;
- Теория: теоретически разработаны новые физические принципы создания импульсных химических лазеров на основе явления фотонного разветвления цепной реакции и термоцепного взрыва; полученные результаты приобрели известность в нашей стране и за рубежом, нашли подтверждение в практике лабораторного эксперимента в крупных российских научных центрах и способствовали достижению рекордных энергетических лазерных характеристик.

В 1997 г. д.ф.-м.н. Катулин В.А. получил Государственную премию России за создание мощных импульсных йодных лазерных систем «Искра-4» и «Искра-5» с выходной мощностью излучения до 100 ТВт для исследований в области термоядерного синтеза. Заведующему теоретическим сектором д.ф.-м.н. Игошину

В.И. за разработку и создание новой техники в 2002 г. присуждена Премия Правительства РФ в области науки и техники.

На рубеже столетий в штате Самарского филиала ФИАН состояло около 90 сотрудников, включая 50 исследователей, половина из которых имела учёную степень.

### 4.4.3 Достижения СФ ФИАН в современный период

В XX1 веке сотрудники укрепили свои позиции в фундаментальных исследованиях по лазерной физике, спектроскопии, физической кинетике и физике газового разряда. Филиал сохраняет лидирующие позиции в мире по исследованиям и разработкам в области физики кислородно-йодного лазера и оптической станции будущего для дистанционного роботизированного лазерного раскроя металла, в области глубокой лазерной сварки, а также оптики спиральных пучков как принципиально нового лазерного инструмента для бесконтактного манипулирования микрообъектами в электронике и микробиологии.

Сотрудники продолжили плодотворную образовательную деятельность и ведут активную работу по использованию полученных научных результатов на практике в интересах промышленных предприятий региона. Результаты фундаментальных исследований и прикладных разработок регулярно публикуются в ведущих научных изданиях, докладываются на престижных научных конференциях. Вместе с ведущими вузами Самары филиал ФИАН вошел в состав консорциума Научно-образовательного центра Самарской области «Инженерия будущего», одной из основных задач которого является получение новых конкурентоспособных технологий и продуктов и их коммерциализация.

В современной структуре Филиала три лаборатории и сектор: лаборатория когерентной оптики, возглавляемая к.ф.-м.н. Котовой С.П. (она же заместитель директора по науке), лаборатория лазерно-индуцированных систем с заведующим д.т.н. Яресько С.И., лаборатория физико-химической кинетики, которой заведует д.ф.-м.н. Михеев П.А., и теоретический сектор с заведующей д.ф.-м.н. Молевич Н.Е.. Отметим, что трое из названных (Котова С.П., Михеев П.А., Молевич Н.Е.) являются выпускниками Высшей школы физиков при МИФИ и ФИАН, организованной Н.Г. Басовым и носящей его имя.

**В лаборатории когерентной оптики** направлениями исследований являются:

- Структурированные световые поля и их применения в оптической манипуляции, микроскопии, квантовых системах, обработке информации;
- Жидкокристаллические (ЖК) пространственные модуляторы для динамического управления характеристиками световых полей;
- Синтез новых перспективных материалов с использованием лазерного излучения.

В лаборатории продолжаются исследования спиральных пучков, световых полей, описываемых интегралами дифракционных катастроф (д.ф.-м.н. Волостников В.Г., д.ф.-м.н. Абрамочкин Е.Г.), развиваются методы

экспериментального формирования структурированных световых полей. С их помощью проведены эксперименты по манипуляции микроскопическими объектами (к.ф.-м.н. Котова С.П., н. с. Н.Н. Лосевский). Получены устойчивые результаты по захвату, вращению и движению частиц по заданной траектории. Впервые сформированы лазерные пучки с ненулевым орбитальным моментом в виде спирали Архимеда, светового отрезка и кривой с самопересечением при использовании масок на основе бихромированной желатины. Показана перспективность использования управляемых фазовых модуляторов для динамического манипулирования микрообъектами. Совместно с группой Наумова А.В. (ИСАН, ТОП ФИАН) с использованием фазовых дифракционных элементов, полученных на основе оптики спиральных пучков, реализован наноскоп для исследования одиночных молекул и квантовых точек. С использованием математического формализма спиральных пучков предложен новый метод классификации контурных изображений.

В лаборатории впервые предложен (к.ф.-м.н. Наумов А.Ф.), исследован и развит модальный принцип построения ЖК корректоров волнового фронта (к.ф.-м.н. Самагин С.А.), и разработана технология изготовления таких устройств (Рис. 4.21). Созданы линзы и фокусаторы, оптические характеристики которых могут меняться с помощью электрических и световых полей. Предложена и обоснована возможность построения на основе созданных устройств системы автокомпенсации дефокусировки светового пучка и фоточувствительного дефлектора, показана возможность компенсации аберраций турбулентности атмосферы. Совместно с лабораторией оптоэлектронных процессоров ОКРФ ФИАН (д.ф.-м.н. Пожидаев Е.П.) создана секторная спиральная фазовая пластинка на новых сегнетоэлектрических ЖК, быстродействие изменения фазы света в которой достигает 3-х килогерц, что на полтора порядка больше, чем у известных ЖК пространственных модуляторов света.

Рис. 4.21. Многоканальный жидкокристаллический корректор волнового фронта с апертурой Ø 30 мм и с перестраиваемой функцией отклика (вид спереди и сзади)

**В лаборатории физико-химической кинетики** изучаются элементарные энергообменные и химические процессы, происходящие в углеводородных пламёнах, активных средах лазеров и атмосферах планет. Направлениями исследований являются:

- Измерение кинетических констант быстропротекающих процессов с возбуждёнными частицами, характеризующих скорости протекания реакций;
- Исследование активных сред лазеров на инертных газах с оптической накачкой;
- Измерение и расчет кинетических констант реакций инициирования и поддержания горения, образования и распада вредных веществ и активных частиц.

В лаборатории продолжены исследования в области создания мощных лазеров. Разработанные ранее прототипы генераторов синглетного кислорода стали использоваться практически во всех лабораториях мира, где проводились исследования химического кислородно-йодного лазера (Рис. 4.22). Продемонстрирована численно и экспериментально перспективность разработанных схем для крупномасштабных установок; создан лазер со сверхзвуковым протоком газа с удельной мощностью на единицу поперечного сечения потока 200 Вт/см$^2$. За создание научной и технологической базы и разработку принципов построения мощных химических кислород-йодных лазеров различного назначения в 2008 году в составе коллектива авторов д.ф.-м.н. Загидуллин М.В. и к.ф.-м.н. Николаев В.Д. удостоены Премии Правительства РФ.

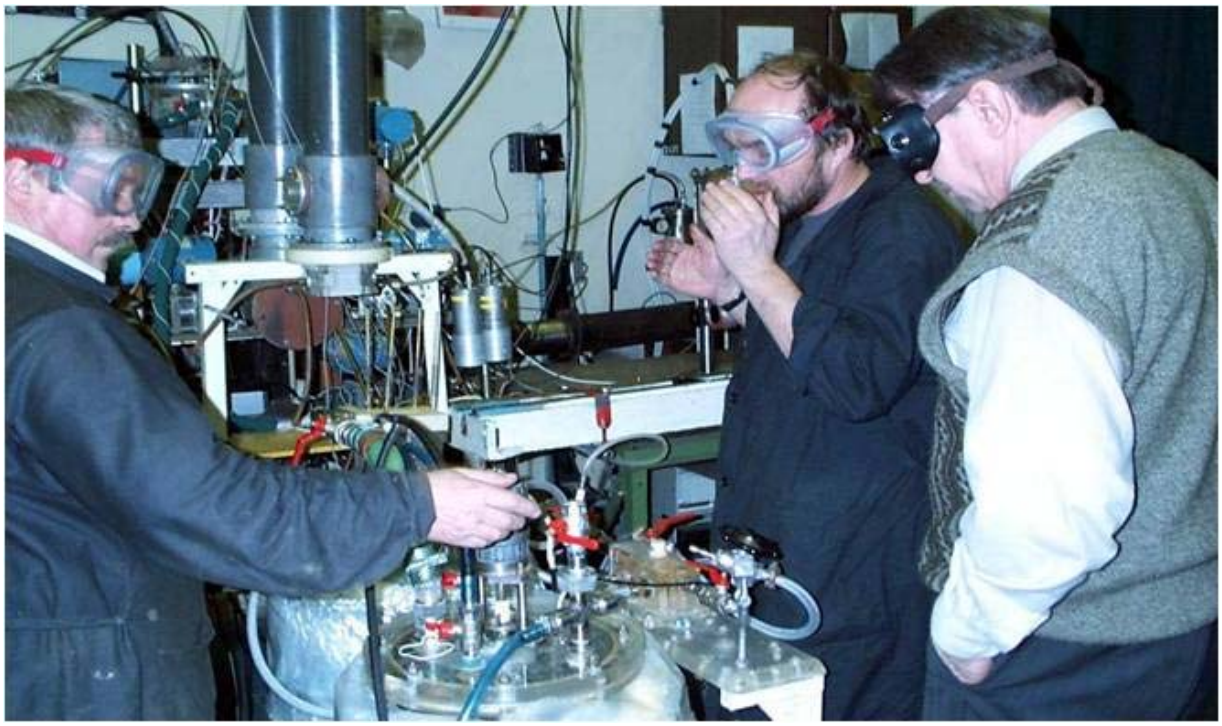


Рис.4.22. Кислород-йодный лазер со струйным генератором синглетного кислорода и сотрудники СФ (слева направо): ведущий конструктор Н.А. Хватов, научный сотрудник д.ф-м.н. М.В. Загидуллин и зав. лабораторией к.ф.-м.н. В.Д. Николаев

Под руководством д.ф.-м.н. Михеева П.А. впервые в мире получена генерация лазера на метастабильных атомах аргона с поперечной оптической накачкой. Измерены кинетические константы целого ряда быстропротекающих

процессов, необходимые для развития современных газовых лазерных систем. Определены спектроскопические характеристики линий поглощения инертных газов, используемых для оптической накачки. Эти исследования проводятся совместно с СГУ и университетом Эмори (США).

Предложен механизм формирования полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в атмосфере Титана. Определены различия в механизмах образования и роста ПАУ в пламёнах и межзвездном пространстве или в атмосферах планет. Признанием результатов работ лаборатории стал недавно выигранный Мегагрант, в рамках которого в СФ ФИАН будет создан Центр лабораторной астрофизики для изучения происхождения и эволюции органических молекул в нашей Галактике.

**В лаборатории лазерно-индуцированных процессов** основное направление деятельности – исследование воздействия лазерного излучения на вещество, в том числе:

- Разработка физико-химических основ и методов обработки материалов концентрированными потоками энергии;
- Изучение структурно-фазовых превращений в металлических и неметаллических материалах;
- Синтез структур (в том числе поверхностных) и материалов с заданными свойствами под воздействием лазерного излучения;
- Синтез наночастиц и агрегированных нанокомплексов, анализ их свойств и структуры.

В лаборатории разработаны физико-химические основы технологии получения толстых пористых пленок из поливинилиденфторида и композитных пленок с керамическим наполнителем на его основе методом селективного лазерного спекания. Предложен, развит и апробирован комбинаторный метод конструирования новых сплавов для аддитивного производства, изучения структуро- и фазо- образования в условиях 3D лазерного синтеза и предсказания перспективных металло-матричных композитов и жаропрочных сплавов. Установлены закономерности влияния многокомпонентных окисных пленок на трибомеханические свойства упрочненных лазерным излучением поверхностей (совместно с Южным Федеральным университетом). Установлены и экспериментально подтверждены механизмы повышения стойкости упрочненного лазерным излучением инструмента, изготовленного из теплостойких сталей и твердых сплавов группы ВК.

Впервые предложена, построена и развита физическая модель процесса глубокого плавления металлов импульсным лазерным излучением миллисекундного диапазона длительности (д.ф.-м.н. С.В. Каюков). Создана лазерная установка, на которой реализованы режимы глубокого плавления металлов благодаря возможности перестройки в широких пределах формы импульсов излучения и оптимизации пространственных характеристик лазерного пучка. Впервые экспериментально показано, что импульсное лазерное излучение миллисекундного

диапазона длительности может быть использовано для формирования сварных соединений в сталях глубиной до 6 мм. Благодаря проведённым исследованиям успешно решен ряд значимых задач лазерной технологии сварки (Рис. 4.23) на предприятиях Самары и Поволжского региона.

Впервые в мире разработан прототип импульсно-периодического электро-ионизационного CO-лазера замкнутого цикла с криогенным охлаждением со средней мощностью на уровне 1 кВт (д.ф.-м.н. Казакевич В.С.), одним из возможных применений которого является маркировка (через маску) промышленных изделий массового производства с производительностью около 20 надписей в секунду.

**а** **б**

Рис. 4.23. Примеры лазерной сварки: а) сварка сепараторов и защитных шайб подшипников; б) сварка встык защитной оболочки оптических кабелей связи (толщина стальной ленты с двухсторонним покрытием – 0,28 мм)

Создано новое направление лазерной технологии, связанное с взаимодействием лазерного излучения с многокомпонентными (в том числе и реакционно-способными) порошковыми композициями с целью изготовления объемных функциональных и градиентных изделий (д.ф.-м.н. Шишковский И.В.), Разработаны физические основы процессов послойного селективного лазерного спекания композиций и синтеза функциональных мезоструктур. Область применения технологии охватывает любую отрасль промышленности, где существуют задачи моделирования и быстрого прототипирования функциональных единичных изделий сложной формы с уникальными физическими свойствами.

В настоящее время в лаборатории под руководством к.ф.-м.н. Кузнецова С.И. выполняются систематические исследования по изучению влияния лазерного ударного воздействия импульсами наносекундной длительности на структуру и напряженное состояние деформируемых алюминиевых сплавов, в результате которых впервые показана возможность формирования остаточных напряжений сжатия до 300 МПа на глубину до 1,5 мм. Под руководством лауреата Премии Губернатора д.т.н. Яресько С.И. в лаборатории проводятся исследования трибомеханических свойств модифицированной поверхности многокомпонентных сплавов при высоких контактных напряжениях. Под руководством к.ф.-м.н. П.В. Казакевича экспериментально реализованы методы синтеза наночастиц металлов в

жидких средах, в том числе при криогенных температурах и при наложении электрического поля напряженностью до 6 кВ/см.

**В теоретическом секторе СФ** в течение многих лет под руководством д.ф.-м.н, профессора, лауреата Премии Правительства РФ Игошина В.И. проводились исследования в рамках темы «Моделирование и оптимизация перспективных лазерных систем и технологий». Среди полученных научных результатов могут быть выделены:

- Теория автономных мощных химических импульсных лазеров на фотонно-разветвленной цепной реакции фтора с водородом, способных обеспечить по расчётам удельную энергию импульсного излучения в 250-300 Дж/л.;
- Теория химического кислородно-йодного лазера, способного по расчетам обеспечить удельную энергию непрерывной генерации в ~100 Дж/г;
- Теоретическая разработка физических основ моделирования и оптимизации процессов лазерной обработки материалов: поверхностной закалки сталей, аморфизации, обработки дисперсных материалов;
- Анализ и расчёт пространственно-временной структуры оптического поля в широкоапертурных лазерных системах с учетом нелинейных оптических эффектов.

В настоящее время теоретический сектор СФ ФИАН возглавляет д.ф.-м.н., профессор Молевич Н.Е. Продолжая традиции и развивая тематику исследований прежних лет, в секторе открыты новые перспективные работы, относящиеся к исследованиям в области нелинейной динамики неравновесных распределенных систем, включая газодинамику и магнитогазодинамику солнечной плазмы и межзвездной среды, а также пространственно-временную динамику оптических полей в широкоапертурных лазерных системах.

Из полученных результатов к наиболее значимым можно отнести следующие:

- В теории ударных волн в неравновесных тепловыделяющих средах предсказаны и рассчитаны трансформации ударных волн в изотермически неустойчивой плазменной среде, включая корональную горячую плазму и холодный межзвездный газ; эти исследования отмечены Губернской премией в области науки и техники 2002 г. (Молевич Н.Е.), Медалью РАН с Премией для студентов ВУЗов в области физики и астрофизики за 2009 г. (Галимов Р.Н.), Премией Физического института РАН за победу в конкурсе научных работ в области физики и астрофизики за 2011 г (Молевич Н.Е., Галимов Р.Н., Завершинский Д.И.);
- Теоретически исследованы свойства магнитогазодинамических волн в тепловыделяющей плазме с тепловым дисбалансом; предложен метод корональной сейсмологии, связанный с дисперсионными свойствами магнитогазодинамических волн в магнитно-структурированной плазме с тепловым дисбалансом; метод, в частности, позволяет определять магнитное поле, температуру и уточнять механизм нагрева в корональных структурах по регистрируемым сигнатурам волн;
- Теория нелинейных магнитоакустических и альфвеновских волн, процессов их взаимодействия и самовоздействия в тепловыделяющей плазме, в том числе с образованием течений корональной плазмы.

Общее число сотрудников в штате Самарского филиала ФИАН в настоящее время составляет около 100 сотрудников, включая 50 исследователей, половина из которых имеет учёную степень.

### 4.4.4 Поддержка и успехи молодых учёных

Коллектив стареет и потому в последние годы руководство СФ уделяет большое внимание притоку молодежи и повышению её квалификации. Для этого, например, поощряется участие молодых учёных в разных научных конкурсах.

Два года подряд молодые сотрудники Филиала становятся лауреатами конкурса научных работ ФИАН: в 2019 г. – сотрудники лаборатории физико-химической кинетики Медведков Я.А. и Торбин А.П., ставшие лауреатами премии им. П.Н. Лебедева за цикл работ «Измерение кинетических констант процессов с возбужденными частицами», а в 2020 – сотрудники теоретического сектора Белов С.А., Завершинский Д.И. и Рящиков Д.С., получившие премию им. Д.В. Скобельцына за цикл работ «Влияние теплового дисбаланса на магнитогидродинамические волны в атмосфере Солнца». К.ф.-м.н. Торбин А.П. стал и лауреатом стипендии Президента РФ на период 2022-2024 гг. с темой исследования «Реакции колебательно-возбужденного озона в плазме диэлектрического барьерного разряда».

В Филиале имеются также молодые лауреаты различных губернских грантов и премий. Так, по итогам областных конкурсов «Молодой ученый» 2018 -2021 гг. лауреатами конкурса в разделе «Естественные науки» стали научные сотрудники теоретического сектора Кренц А.А., Завершинский Д.И. (в номинации «кандидат наук»), Рящиков Д.С., Белов С.А. ( «аспирант») и Ярунова Е.А. («аспирант», «студент»), научные сотрудники лаборатории когерентной оптики Александров Е.В. ( «кандидат наук») и Прокопова Д.В. («аспирант»), а также научный сотрудник лаборатории физико-химической кинетики Николаев А.А. («студент»).

СФ участвует в мероприятиях всероссийского уровня. Ежегодно с 2003 г. Самарский научно-образовательный центр по оптике и лазерной физике (его учредителями являются СФ ФИАН и ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет») организует Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференцию научных работ по оптике и лазерной физике, который проводится при поддержке Министерства образования и науки Самарской области и Учебно-научного комплекса ФИАН. Принятые к участию в конкурсе научные работы студентов, аспирантов и молодых специалистов публикуются в Сборнике докладов конкурса, а избранные работы ещё и в журналах, индексируемых в WOS и Scopus.

В ноябре 2021 г. завершен XIX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. Его призёрами и дипломантами стали представители СФ ФИАН Роман Бикмурзин (III место в студенческой секции), Антон Быков (диплом за интересный доклад), Любовь Крикунова (II место в стендовой секции), Анатолий Николаев (III место в стендовой

секции), Георгий Толстов (диплом за интересный доклад), Елизавета Ярунова (диплом за интересный доклад).

СФ ФИАН по праву гордится достижениями своих ученых. Также по праву Отделение КРФ гордится достижениями Филиала, ведь сотрудники Отделения не только поддержали инициативу руководителя Отделения и директора ФИАН Н.Г. Басова по организации Филиала, делегировав в него специалистов и руководителя В.А. Катулина, но и всячески, словом и делом помогали сотрудникам Филиала на всех этапах его развития. В течение многих лет Отделение считало себя ответственным за деятельность Филиала и даже обсуждало отчёты о его деятельности на собраниях партийной организации и заседаниях Ученого совета Отделения КРФ ФИАН. На Рис. 4.24 приведена фотография участвовавшей в праздновании 25-летия Самарского филиала делегации ФИАН, большую часть которой составили сотрудники Отделения КРФ.

Рис. 4.24. Делегация ФИАН, участвовавшая в праздновании 25-летия Самарского филиала. Слева направо: гл. инженер М.И. Вольнов*, директор ОКРФ О.Н. Крохин*, зам директора ОКРФ А.Н. Стародуб*, руководитель РИИС П.Д. Березин*, зам. директора ВШФ МИФИ И.Н. Завестовская*, зам. директора СФ В.С. Казакевич*, директор СФ А.Л. Петров*, главный инженер СФ А.А. Якунин, зав. отделом ОКРФ И.Н. Компанец*, главный инженер ОКРФ Ю.И. Морозов*, директор Отделения ФТТ Ю.В. Копаев. Звёздочкой отмечены фамилии сотрудников и выходцев из Отделения КРФ

# 5. УЧАСТИЕ СОТРУДНИКОВ В ЖИЗНИ ЛКРФ – ОКРФ И ФИАН

## 5.1 Научные семинары и публикации

### 5.1.1 Научные семинары

В ФИАНе традиционно были отличные лабораторные семинары, например, семинары Г.С. Ландсберга, И.Е. Тамма. Лаборатория КРФ по сути вышла из Лаборатории колебаний, которую уже многие годы возглавлял А.М. Прохоров. Семинар А.М. Прохорова был организован в 1950 г. и к шестидесятым годам превратился в хорошо известный общеинститутский, а затем и общемосковский семинар по лазерной физике. Его посещали и сотрудники образованной в 1963 г. Лаборатории КРФ, так как постоянно действующего научного семинара в ЛКРФ ещё некоторое время не было, хотя для обсуждения научной работы можно было собрать группу заинтересованных лиц.

В 1966 г. уже в новом корпусе – корпусе КРФ начал регулярно работать семинар лаборатории КРФ – семинар Н.Г. Басова, которому Николай Геннадьевич уделял большое внимание. Кроме докладчиков текущих научных сообщений, необходимых для последующей публикации работы, на семинаре Лаборатории (Отделения) КРФ выступали известные учёные, в том числе зарубежные. Семинар посещали многие сотрудники ФИАН, работающие по лазерной тематике, включая и сотрудников Лаборатории колебаний. Постепенно он тоже превратился в общемосковский семинар.

В разные годы семинар Лаборатории (Отделения) вели Ю.М. Попов, И.Г. Зубарев, А.В. Виноградов, в настоящее время ведёт Л.В. Селезнёв. Руководитель ОКРФ и семинара Н.Г. Басов всегда сидел на семинаре в первом ряду (Рис. 5.1) и обычно одним из первых задавал вопросы докладчику. Этому следовали и последующие руководители Отделения и семинара А.Н. Стародуб (Рис. 5.2), О.Н. Крохин, А.А. Ионин.

Рис. 5.1. Н.Г. Басов, Д.Ш. Маш, П.Г. Елисеев и др. на научном семинаре Лаборатории КРФ

Рис. 5.2. На семинаре ОКРФ в 2003 г. (на переднем плане А.Н. Стародуб)

Кроме главного – «Басовского» семинара с преобразованием ЛКРФ в ОКРФ в новых секторах и лабораториях, а затем и в отделах стали работать:

- семинар по теоретической радиофизике, который долгое время вёл А.Г. Молчанов, а в настоящее время ведёт И.В. Сметанин,
- семинар «Физика высоких плотностей энергии», который вёл А.С. Шиканов, а теперь ведёт А.А. Рупасов,
- семинар по оптоэлектронике, который вели В.Н. Морозов и затем И.Н. Компанец,
- семинар Лаборатории газовых лазеров, а теперь Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий ОКРФ, руководимый А.А. Ионины́м.

Ежегодно в день рождения 14 декабря (если это не выходной) или в день именин 19 декабря в Отделении проводится семинар памяти Н.Г. Басова, именуемый «Басовскими» чтениями. На нём сотрудники ОКРФ или приглашённые учёные выступают с докладами – обзорами работ по проблемам, так или иначе связанным с именем Николая Геннадьевича.

Проводятся также семинары, посвящённые памяти других работавших в ОКРФ известных учёных, обычно в год их юбилея. Так, состоялись семинары, посвящённые памяти А.Н. Ораевского, В.А. Исакова, Ан.В. Виноградова, Л.П. Феоктистова.

### 5.1.2 Публикации

Число и качество публикаций – зеркало деятельности научного коллектива. Высокие требования Н.Г. Басова как руководителя работ обеспечивали и высокое качество публикаций. Статьи печатались в ЖЭТФ и в «Письма в ЖЭТФ», в ЖТФ и в «Письма в ЖТФ», в журналах «Оптика и Спектроскопия», «Физика и Техника Полупроводников».

Взрывной рост публикаций в конце 60-х годов по тематике КРФ заставил позаботиться о создании специализированного журнала и, благодаря усилиям Н.Г. Басова, с января 1971 г. был организован периодический выпуск Сборника статей «Квантовая электроника» в издательстве «Советское радио». В течение трёх лет было сделано 18 выпусков, а с 1974 г. в этом издательстве началась ежемесячная публикация номеров уже журнала «Квантовая электроника» (Рис. 5.3). Публикации (регулярные статьи, обсуждения и обзоры) охватывали все темы, относящиеся к лазерным исследованиям и их приложениям. Главным редактором сборника и журнала был Н.Г. Басов.

В настоящее время учредителями журнала являются: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Международный учебно-научный лазерный центр МГУ, ФГУП «НПО "Астрофизика"», НИИ лазерной физики, Институт лазерной физики СО РАН, ФГУП «НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха», а также трудовой коллектив редакции. Главный редактор журнала – О.Н. Крохин (Рис. 5.4), его заместители – И.Б. Ковш и А.С. Семёнов. В 2021 г. выпущен 51-ый том журнала. С самого начала журнал «Квантовая электроника» переводится на английский язык, в настоящее время перевод издаётся «IOP Publishing Limited» под названием «Quantum Electronics».

Рис. 5.3. Обложки журнала «Квантовая электроника» на русском и английском

Рис. 5.4. О.Н. Крохин, директор ФИАН в 1994-2004 гг. и руководитель ОКРФ в 2005-2010 гг., главный редактор журнала «Квантовая электроника»

Н.Г. Басов основал в 1980 г. и специализированный журнал «Лазерные исследования в СССР» (до 1993 г. «Journal of Soviet Laser Research»), который выпускается только на английском языке издательством «Springer», теперь как «Journal of Russian Laser Research». Ежегодно издаётся 6 номеров журнала. Его главным редактором также является О.Н. Крохин, редакторы – М.А. Манько, В.А. Щеглов и А.Н. Стародуб.

Наконец, некоторая часть оригинальных научных работ по тематике КРФ в сжатом изложении публикуется в ежемесячном журнале ФИАН «Краткие сообщения по физике», основанном в 1970 г. В каждом номере журнала печатается 5-8 статей о последних достижениях в области физики, сделанных учеными ФИАН, ИОФРАН и ИЯИ РАН. Журнал переводится и издается на английском языке в Allerton Press под названием «Bulletin of the Lebedev Physics Institute». Главным редактором является директор ФИАН Н.Н. Колачевский, его заместители – О.Н. Крохин и С.В. Гарнов (директор ИОФ РАН).

Заметим, что по примеру Н.Г. Басова в 1975 г. А.М. Прохоровым было организовано издание журнала «Физика плазмы», причём под руководством Отделения физических наук Академии наук СССР, а затем РАН. В состав учредителей журнала входят Российская академия наук, Институт общей физики им. А. М. Прохорова и Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». В журнале публикуются статьи и сотрудников ФИАН, включая работающих в ОКРФ.

Кроме советских журналов, научные статьи по лазерной физике и физике плазмы сотрудников ОКРФ охотно публикуют и зарубежные журналы Physical Review, Applied Optics, Applied Physics Letters, Plasma Physics, хотя их доля в советский период была невелика. Тогда существовало правило приоритетной публикации научного результата в отечественной печати (для патентов оно сохраняется поныне). Чтобы ускорить доведение публикации до читателей, зарубежные издательства делали переводы статей из советских журналов и даже выплачивали гонорар авторам. Другим вариантом быстрейшей апробации научного результата за рубежом были выступления научных сотрудников ОКРФ на международных конференциях, но выехать в ту пору в социалистическую страну и тем более в капиталистическую могли немногие. Ситуация в годы перестройки и в начале 2000-х изменилась в лучшую сторону, но в течение 2022 г. повернула вспять.

Данные по публикационной активности Лаборатории, а затем Отделения КРФ показывают, что число посланных в журналы статей и докладов на конференции в период с конца шестидесятых до середины восьмидесятых годов с каждым годом возрастало (что коррелирует с ростом числа сотрудников до максимального – около 500) и достигло в сумме порядка 200 публикаций, из которых около 120 составляли публикации в международных изданиях и около 80 в российских. С началом перестройки число публикаций начало сокращаться и упало почти вдвое в начале девяностых (опять же в корреляции с числом

сотрудников), но уже к 1996 г. прежние сумма и соотношение международных и российских публикаций восстановились и с небольшими отклонениями сохранялись до 2005 г., несмотря на уменьшенное число сотрудников (около 300).

Затем количество выпускаемой научной продукции стало возрастать и в период с 2010 по 2016 гг. в ОКРФ достигало абсолютного максимума: порядка 200 публикаций в международных изданиях (половина из них – статьи) и около 120 в российских (две трети из них – статьи). Требования министерства оценивать работу учёных по публикациям в WoS-индексируемых изданиях, принятые в середине 2010-х годов серьёзно уронили и перекосили статистику. Сразу число публикаций в международных изданиях упало вполовину (в силу невысокого научного уровня упавшей части), но в 2020-21 гг. почти восстановилось, а число публикаций в российских изданиях к 2021 г. сократилось в несколько раз. То, что российские издания оказались не нужными, и первыми с новыми плодотворными идеями российских учёных знакомятся иностранцы, характеризует работу министерских чиновников как бездумную. Однако с 2022 г. роль российских изданий всё же возрастает, но вынужденно, под влиянием санкционной политики Запада.

Всего в 2020-21 гг. в ОКРФ работало около 190 сотрудников (из них около 180 в научных подразделениях), и они выпустили в среднем 3 публикации на единицу ставки, что характеризует научную работу коллектива как эффективную.

Необходимо отметить также активное участие сотрудников ОКРФ в работе редколлегий научных журналов: в последние 5 лет в среднем около 20 сотрудников являлись членами редколлегий в 15 журналах.

Что касается активности сотрудников ОКРФ в подготовке патентных заявок на изобретения и в регистрации патентов, то её нельзя признать высокой. На протяжении многих лет подавалось всего от 3 до 6 заявок в год и почти столько же получалось патентов РФ (авторских свидетельств в советское время). Это больше, чем в других отделениях ФИАН, но явно отстаёт от возможностей научных работников ОКРФ, от требований конкурсов на получение грантов и от потребностей народного хозяйства.

Идеи, содержащиеся в большинстве публикуемых статей, имеют большой патентный потенциал. Все заявки, хотя и отличаются от статей спецификой оформления, базируются на тех же публикуемых результатах научных работ, прежде всего экспериментальных. Патентная служба ФИАН на протяжении многих лет профессионально помогает готовить и регистрировать патентные заявки. Эти обстоятельства позволяют добиваться хорошего результата (например, И.Н. Компанец имеет 80 зарегистрированных изобретений, подтверждённых 55 авторскими свидетельствами, 22 патентами РФ и 3 патентами США), но в целом в ОКРФ и ФИАН патентная деятельность, по-видимому, развита и стимулируется пока недостаточно.

### 5.1.3 Конференции

Для демонстрации широкого участия сотрудников ОКРФ в научных конференциях приводим название (тематику) и место проведения 37 международных конференций за рубежом, на которые были командированы сотрудники в одном только 2014 году:

- 17th International Conference Physics of Highly Charged Ions (HCI2014), Аргентина
- The 34th International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, Австрия
- 21 Central-European Workshop on Quantum Optics, Бельгия
- Форум мобильности ученых Россия-Евросоюз, Бельгия
- 40th International Conference Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'14), Болгария
- XXIII International Laser Phys. Workshop, Болгария
- Directed Energy Systems Conf., Великобритания
- Channeling Phenomena, 41st EPS Conference of Plasma Physics, Германия
- European Advanced Studies Conference 2014 «Symposium on Differential and Difference Equations», (Homburg), Germany
- International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers (ICUIL2014), Индия
- 25-я Международная конференция по жидким кристаллам, Ирландия
- Nanolight, Испания
- Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons, Италия
- Intern. Conf. Channeling 2014 - Charged & Neutral Particles, Италия
- Международная конференция COST «Когерентные и некогерентные методы получения рентгеновских томографических изображений» (COST 1203), Италия
- XIII International Conference on Multiphoton Processes, Китай
- 1st International Conference on Photoalignment and Photopatterning in Soft Materials (PhoSM2014), Китай
- The 3-rd Intern. Symposium on Laser Interaction with Matter, Китай
- The 5th International Symposium on Filamentaion (COFIL2014), Китай
- Progress In Electromagnetics Research Symposium, Китай
- Laser Precision Microfabrication 2014, Литва
- SPIE Remote Sensing, Security and Defence 2014, Нидерланды
- 2-nd International Conference of Photonics, Optics and Laser Technology, Португалия
- 17 Международный конгресс по физике плазмы, Португалия
- The 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Сингапур
- 14-я Международная конференция по рентгеновским лазерам, США

- High power laser ablation & Beam energy propulsion International Symposium HPLA/BEP 2014, США
- 41 IEEE конференция по физике плазмы, США
- Ежегодный симпозиум международного дисплейного общества (SID-14), Сан Диего, США
- International Conference of the Applied Physics, Турция
- 33rd European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM), Франция
- International Conference on Advanced Laser Technologies 2014 (ALT'14), Франция
- Joint Workshop on «LMJ-PETAL scientific program» and «COST MP 1208 Developing the Physics and the Scientific Community for Inertial Confinement Fusion – scientific kick-off meeting», Франция
- Рабочее совещание по проекту ICAN, Франция
- 12 Международный семинар «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах», Черногория
- IV Workshop on LIPSS, Чехия
- 28-й Европейский форум по времени и частоте, Швейцария.

Такому широкому участию сотрудников ОКРФ в работе конференций явно способствует и работа их коллег в программных и организационных комитетах конференций. В среднем на протяжении многих лет ежегодно в этих комитетах участвовало 15-20 научных сотрудников при таком же числе конференций.

Сотрудники ОКРФ также участвовали в организации и в проведении нескольких международных конференций в Москве и в ФИАН. Так, весной 2017 г. сотрудники ОКРФ приняли участие в организации совместного британо-российского рабочего совещания по квантовым технологиям, финансово поддержанным Посольством Великобритании в России, причем в рамках этого мероприятия двое сотрудников ОКРФ посетили научные центры Великобритании. По инициативе сотрудников ОКРФ осенью 2017 г. впервые в ФИАН была проведена Международная конференция по «сверхбыстрой» оптической науке (International Conference on Ultrafast Optical Science "UltrafastLight"). Эта конференция, с тех пор проводится в ФИАНе, ежегодно, и в октябре 2022 г. прошла уже шестая конференция. Председателем и вице- председателями программного комитета являются директор ФИАН Н.Н. Колачевский, руководитель ОКРФ А.А. Ионин и заведующий лабораторией Лазерной нанофизики и биомедицины С.И. Кудряшов. Первым председателем оргкомитета конференции был П.А. Данилов. В 2022 г. председателем и зам. председателя оргкомитета конференции являлись сотрудники ОКРФ С.Г. Бочкарев и Д.В. Мокроусова. Организаторами и участниками конференции стали несколько десятков молодых сотрудников ОКРФ.

В 2000, 2006 и 2007 гг. в Москве состоялись международные конференции «Передовые дисплейные технологии», причём в первой председателем оргкомитета был Н.Г. Басов, а в двух других О.Н. Крохин. Во всех трёх успешно проведённых

конференциях приняли участие И.Н. Компанец (как председатель программного комитета), И.П. Ревокатова и С.И. Торгова (как члены оргкомитета).

Важнейшей международной конференцией по физике высокотемпературной плазмы и лазерному термоядерному синтезу является «Европейская конференция по взаимодействию лазерного излучения с веществом» (ECLIM), впервые проведенная в Италии в 1968 году по инициативе ведущих европейских ученых и, прежде всего, Анджело Карузо. Идею проведения этой конференции активно поддержали Н.Г. Басов и О.Н. Крохин. Конференция успешно существует до настоящего времени и проводится на регулярной основе каждые 2 года поочередно в одной из европейских стран, представители которых являются членами постоянного международного оргкомитета конференции. Н.Г. Басов был членом этого оргкомитета с самой первой конференции и до конца своей жизни. Позже Россию в постоянном международном оргкомитете конференции представлял О.Н. Крохин, а с 2017г. -- С.Ю. Гуськов. Конференция ECLIM проводилась в Москве три раза - в 1978 г., 2002 г. и 2016 г., при этом активное участие в организации и проведении конференции принимали сотрудники ОКРФ В.Б. Розанов, Ю.В. Афанасьев, С.Ю. Гуськов, В.А. Исаков, А.С. Шиканов, А.А. Рупасов, Ю.А. Михайлов.

Другая важнейшая из конференций по физики высокотемпературной плазмы и УТС – «Европейская конференция по управляемому синтезу и физике плазмы» (ECCFPP) дважды состоялась у нас в стране, а именно в Москве (1981 г) и в Санкт-Петербурге (2003). Этой конференции Н.Г. Басов уделял большое внимание и стимулировал сотрудников ОКРФ к активному участию в ней со своими докладами. Сотрудники ОКРФ Розанов В.Б., Афанасьев Ю.В., Гуськов С.Ю., Шиканов А.С., Рупасов А.А., Романов И.В. и др. представили на этих конференциях последние достижения в области теоретических и экспериментальных исследований плазмы, создаваемой мощным лазерным излучением и в сильноточных электрических разрядах.

Ещё одной конференцией, в становление и развитие которой внесли большой вклад сотрудники ОКРФ, является ежегодная Международная Звенигородская конференция по физике плазмы. В 2023 году состоится юбилейная 50-я конференция. Среди 5-ти постоянно действующих секций конференции по инициативе Н.Г. Басова, О.Н. Крохина и В.Б. Розанова была организована секция «Лазерный термоядерный синтез», участие в работе которой стало одной из наиболее востребованных возможностей представления сотрудниками ОКРФ результатов своих исследований в области взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом и физики высокотемпературной лазерной плазмы. В программном комитете конференции Физический институт им. П.Н. Лебедева представляют С.Ю. Гуськов и Г.А. Вергунова.

## 5.2 Научные конкурсы и гранты

### 5.2.1 Конкурс научных работ ОКРФ на премию им. Н.Г. Басова

Начиная с 2001 г., в Отделении КРФ ежегодно проводится конкурс научных работ на премию им. Н.Г. Басова. Его условия регулируются Положением о конкурсе, подписанным в 2001 г. директором Отделения КРФ А.Н. Стародубом. Основными задачами конкурса являются стимулирование творческой инициативы сотрудников Отделения и. ознакомление научной общественности ФИАН с научными достижениями подразделений ОКРФ и его сотрудников.

Положением о конкурсе установлено не более 4-х премий, в том числе одна-две для поощрения научных достижений молодых (до 35-и лет) сотрудников Отделения, а также работающих в нём студентов и аспирантов. Фонд конкурса создает дирекция Отделения КРФ, величина фонда устанавливается ежегодно при объявлении очередного конкурса.

На конкурс принимаются только опубликованные научные работы (циклы работ) и крупные установки (в форме отчета с приложением оттисков первых научных публикаций, доказывающих работоспособность установки). Участники конкурса обязательно докладывают о своих работах на научном семинаре Отделения КРФ. Для оценки работ распоряжением директора ОКРФ ежегодно назначается жюри конкурса, включающее авторитетных учёных Отделения. Председателем жюри является заместитель директора Отделения КРФ ФИАН по научной работе, ученым секретарем - ученый секретарь Отделения. Решения жюри по премированию принимаются тайным голосованием. Работы, представленные с грифом «Молодежная», голосуются отдельно.

Каждому автору победивших работ вручается Диплом «Премия имени Н.Г. Басова» (Рис. 5.5). Денежная часть премии делится поровну между авторами, работающими в Отделении КРФ ФИАН.

Премия
имени Н.Г. Басова
присуждена
Александру Евгеньевичу
ДРАКИНУ
за работу
«Оптический диодный усилитель бегущей волны»
И. о. руководителя
Отделения квантовой радиофизики
им. Н.Г. Басова Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН
Профессор А. А. Ионин
Председатель жюри конкурса
Профессор И. Н. Компанец
14 декабря 2015

Рис. 5.5. Фото Диплома лауреата премии им. Н.Г. Басова

По годам премии им. Н.Г. Басова присуждены:

- В 2001 г. В.А. Алексееву и А.Н. Ораевскому за исследования по физике бозонов (соответственно за циклы работ «Статистика канонического ансамбля бозонов» и «Бозе-конденсаты с точки зрения лазерной физики»), а также

- О.Ю. Носачу, Е.П. Орлову и И.М. Сизовой за цикл работ «Исследования активных квантовых фильтров, разработанных на базе йодных лазеров, в интересах создания нового поколения лазерных комплексов специального назначения»,

- А.А. Стратонникову и А.А. Ляху за цикл работ «Особенности диаграммы направленности излучения $In_xGa_{1-x}As/AlGaAs/GaAs$ гетеролазеров с квантоворазмерной активной областью» (по разделу «Молодежная»).

- В 2002 г. А.Л. Андрееву, И.Н. Компанцу, Е.П. Пожидаеву за цикл работ «Исследования жидкокристаллических сегнетоэлектрических композитных материалов»,

- П.П. Васильеву за цикл работ «Исследование материалов и многослойных наноструктур в рентгеновском диапазоне длин волн», а также

- Р.В. Степанову за цикл работ «Исследования симметрии сжатия мишеней инерциального термоядерного синтеза» (по разделу «Молодежная»),

- Н.Л. Попову за цикл работ «Исследование материалов и многослойных наноструктур в рентгеновском диапазоне длин волн». (по разделу «Молодежная»).

- В 2003 г. В.В. Климову за цикл работ «Спонтанное излучение атома в присутствии нанотел», а также

- Ю.П. Подмарькову, Н.А. Распопову, М.П. Фролову за цикл работ «Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия на основе $Co:MgF_2$ лазера»,

- Ю.В. Шабалину за цикл работ «Применение цепей обратной связи для генерации стабильных ультракоротких лазерных импульсов» (по разделу «Молодежная»).

- В 2004 г. А.М. Акульшину, В.В. Васильеву, В.Л. Величанскому, А.С. Зиброву, В.А. Саутенкову за цикл работ «Инжекционные лазеры в атомной спектроскопии высокого разрешения», а также

- В.С. Зуеву за цикл работ: «Спектроскопия фотоассоциации столкновительных пар атомов ртути и пар атомов ксенона и йода»,

- Р.М. Фещенко за цикл работ «Применение метода связанных волн и теории возмущений к задачам рентгеновской оптики» (по разделу «Молодежная»),

- А.С. Нужному за цикл работ «Исследование возможности нейросетевого предсказания развития неустойчивости Релея-Тейлора в задачах лазерного термоядерного синтеза» (по разделу «Молодежная»).

- В 2006 г. И.М. Бельдюгину, В.Ф. Ефимкову, И.Г. Зубареву, С.И. Михайлову за цикл работ «Усиление сверхслабых сигналов, отраженных от удаленных объектов, и разработка принципов построения их неискаженных изображений в условиях турбулентной атмосферы», а также

- А.П. Богатову, А.Е. Дракину, Д.В. Батраку за цикл работ «Когерентность излучения полупроводникового α-DFB лазера»,

- А.А. Ионину, Ю.М. Климачеву, А.А. Коткову, Л.В. Селезневу, Д.В. Синицыну за цикл работ «Лазер на первом колебательном обертоне молекулы CO».
- С.А.Зиброву за цикл работ «Создание чистых суперпозиционных состояний атомов щелочных металлов с помощью бихроматического эллиптически поляризованного лазерного излучения».

- В 2007 г. И.А. Артюкову, А.В. Виноградову, Ю.А. Успенскому за цикл работ «Разработка и применение отражающей оптики на область длин волн 35-60 нм», а также

- В.Д. Зворыкину, П.Б. Сергееву, А.П. Сергееву за цикл работ «Радиационная стойкость оптических материалов для окон электронно-пучковых эксимерных лазеров УФ и ВУФ диапазона»,
- А.В. Брантову, В.Ю. Быченкову за цикл работ «Теория нелокального переноса в лазерной плазме»,
- А.В. Таусеневу за цикл работ: «$Er^{3+}$ волоконные фемтосекундные лазеры для применений в оптических часах».

- В 2008 г. А.Н. Кирееву, А.В. Конященко, А.В. Таусеневу, Д.А. Тюрикову, А.С. Шелковникову за цикл работ «Разработка и реализация компактных фемтосекундных оптических часов», а также

- П.Г. Крюкову за книгу: «Фемтосекундные импульсы»,
- А.Л. Антипову, А.А. Егорову за цикл работ «Методы защищенного многозначно-логического кодирования сообщений в оптоэлектронных многоагентных системах» (по разделу «Молодежная»).

- В 2010 г. В.С. Зуеву за цикл работ «Спонтанное излучение атома вблизи тела наноразмера», а также

- А.А. Андрееву, Т.Б. Андреевой, И.Н. Компанцу за цикл работ «Исследования по созданию быстродействующих низковольтных жидкокристаллических материалов и ячеек для дисплейных применений»,
- А.Т. Саакяну, А.А. Фроне за цикл работ «Исследование взаимодействия лазерного излучения управляемой когерентности с веществом» (по разделу «Молодежная»).

- В 2011 г. М. В. Минченко, В. Е. Молькину, Е. П. Пожидаеву, С. И. Торговой за цикл работ «Открытие и исследование квадратичного электрооптического эффекта в жидкокристаллических сегнетоэлектриках», а также

- А.А. Ионину, С.И. Кудряшову, Л.В. Селезневу, Д.В. Синицыну за цикл работ «Наблюдение, физические механизмы формирования и применения мини-филаментов ультракоротких лазерных импульсов в газовых и конденсированных средах»,

- В 2012 г. С.Ю. Гуськоу, Н.Н. Демченко, В.Б. Розанову за цикл работ «Теоретическая модель генерации быстрых ионов, учитывающая пондермоторную силу и резонансное поглощение, при лазерном облучении твердотельных мишеней», а также

- П.П. Васильеву за цикл работ «Электронно-дырочный конденсат и его когерентность, исследованная с помощью опытов Юнга и Майкельсона».
- С.В. Макарову за цикл работ «Формирование периодических поверхностных нано - и микроструктур под действием ультракоротких лазерных импульсов. Фундаментальные и прикладные аспекты» (по разделу «Молодежная»).

- В 2013 г. Е.С. Сунчугашевой за цикл работ «Филаментация сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов: создание плазменных каналов и управление их параметрами».
- В 2014 г. И.Е. Проценко, А.В. Ускову за цикл работ «К теории фотоэлектронной эмиссии из плазмонных наноантенн», а также
- А.В. Богацкой за цикл работ «Распространение и усиление микроволнового излучения в плазменных каналах, создаваемых ультракороткими лазерными импульсами в воздухе и благородных газах» (по разделу «Молодежная»).
- В 2015 г. А.П. Богатову, А.Е. Дракину (Рис. 5.5), Н.В. Дьячкову, Т.И. Гущику за цикл работ «Оптический диодный усилитель бегущей волны», а также
- Ю.Я. Масловой за цикл работ «Формирование регулярной временной структуры излучения твердотельного лазера в диапазоне от единиц до сотен времен обхода светом резонатора с помощью комбинации обратных связей» (по разделу «Молодежная»).
- В 2016 г. В.Ю. Быченкову, А.В. Брантову, Е.А. Говрасу за цикл работ «Фундаментальные основы новых методов лазерного ускорения ионов», а также
- И.Н. Сараевой, П.А. Данилову за цикл работ «Поиск новых типов оптических сенсорных устройств для высокочувствительного экспресс-детектирования патогенных микроорганизмов» (по разделу «Молодежная»).
- Н.В. Заляпину за цикл работ «Пространственно-неоднородная фазовая модуляция лазерного излучения в жидкокристаллической ячейке для разрушения его когерентности и подавления спеклов» (по разделу «Молодежная»).
- В 2017 г. И.А. Артюкову, Н.В. Дьячкову, А.В. Виноградову, Н.Л. Попову, Р.М. Фещенко за цикл работ «Расчет и моделирование рентгеновского пучка лазер-электронного генератора для задач материаловедения и медицины».
- В 2018 г. О.А. Бурдуковой, В.А. Петухову, М.А. Семенову за цикл работ «Лазеры на красителях, накачиваемые полупроводниковыми лазерами», а также
- Я.В. Грудцыну, А.В. Корибуту, Л.Д. Михееву, В.А. Трофимову за цикл работ «Самосокращение фемтосекундных импульсов в режиме оптического затвора на основе керровской нелинейности»,
- М.В. Горбункову, П.В. Кострюкову, А.Л. Коромыслову, В.Г. Тункину, Е.А Чешеву за цикл работ «Синхронизация поперечных мод твердотельных лазеров с продольной накачкой: теория, эксперимент, применения».
- В 2019 г. А.А. Ионину, С.И. Кудряшову, Л.В. Селезневу за цикл работ «Настольный абляционный фемтосекундный лазерный источник мегабарных давлений»,

- А.П. Богатову за цикл работ «Спонтанное излучение в диодном лазере, его роль в формировании оптического спектра. История некоторых заблуждений в радиофизике и в физике диодных лазеров относительно роли шумов в автогенераторе».

- В 2020 г. П.А. Данилову, С.И. Кудряшову, А.О. Левченко, Н.А. Смирнову за цикл работ «Атомистические процессы лазерной генерации оптических центров в объеме алмазов», а также

- А.В. Брантову, В.Ю. Быченкову, М. Г. Лобоку за цикл работ «Эффективное ускорение электронов в режиме релятивистского самозахвата лазерного света».

- В 2021 г. И.О. Киняевскому, А.В. Корибуту, В.И. Ковалеву за цикл работ «Нестационарное вынужденное комбинационное рассеяние ультракоротких сине-зеленых лазерных импульсов в кристалле $BaWO_4$ для генерации двухцветного излучения с разностью частот ~900-1000 $см^{-1}$», а также

- С.Ю. Гуськову, П.А. Кучугову, Г.А. Вергуновой за цикл работ «Эффект сверхвысокого сжатия вещества в ударной волне, образованной под воздействием потока релятивистских лазерно-ускоренных электронов»,

- И.А. Артюкову, А.С. Бусарову, А.В. Виноградову, Н.Л. Попову, Р.М. Фещенко за цикл работ «Прямая и обратная задача дифракции от наклонной поверхности для применений в рентгеновской микроскопии и литографии».

### 5.2.2 УНК и конкурс молодёжных научных работ ФИАН на премию имени Н.Г. Басова

В целях поддержки молодёжи в начале 2005 г. директором Института академиком Г.А. Месяцем подписан приказ об образовании при дирекции ФИАН Учебно-научного комплекса (УНК). Основными направлениями деятельности УНК стали: решение комплекса задач по привлечению молодежи к научной и педагогической работе, обеспечение преемственности поколений научной школы ФИАН, укрепление кадрового потенциала института на важнейших направлениях фундаментальных исследований РАН и Федеральных программ, координация работы базовых подразделений в совместных учебно-образовательных программах с ВУЗами. Из представителей научных Отделений ФИАН и базовых подразделений ВУЗов был сформирован Совет УНК. Заведующим УНК был утверждён профессор В.Н. Очкин.

Для молодых сотрудников, аспирантов и студентов, выполняющих в ФИАН учебно-исследовательскую работу, Учебно-научный комплекс при поддержке дирекции Института организует чтение лекций и проведение конференций и школ по актуальным проблемам физики, проводит конкурсы научных работ на премии имени П.Н. Лебедева (по общей физике и теоретической физике), имени С.И. Вавилова (по оптике, атомной физике и физике твердого тела). имени Д.В. Скобельцына (по физике высоких энергий, ядерной физике и астрофизике) и имени Н.Г. Басова ( по лазерной физике, радиофизике и физике плазмы). Через УНК по рекомендациям научных отделений выделяется финансовая поддержка молодёжи в

виде стипендий УНК, а также осуществляется выдвижение работ молодых учёных на региональные и федеральные премии и гранты.

Премия им. Н. Г. Басова на конкурсе молодёжных научных работ ФИАН присуждалась:

в 2005 г. – В.А. Акимову, А.А. Воронову, А.И. Ландману за цикл работ «Эффективные ИК лазеры на монокристаллах ZnSe, легированных ионами Cr2+»;

в 2006 г. – Д.А. Санникову за цикл работ «Выращивание низкоразмерных гетероструктур соединений $A_2B_6$ и создание лазеров с катодно-лучевой накачкой на их основе»;

в 2007 г. – И.В. Николаеву за цикл работ «Измерение предельно малых поглощений в атмосфере методами диодной лазерной спектроскроскопии»;

в 2009 г. – С.А. Зиброву и А.В. Сиваку за цикл работ «Разработка квантового дискриминатора для малогабаритных атомных часов»;

в 2010 г. – А.О. Левченко за цикл работ «Нестационарное поглощение и флюоресценция благородных газов и эксимерных смесей»;

в 2012 г. – И.О. Киняевскому и А.Ю. Козлову за цикл работ «Обогащение спектра излучения СО-лазерных систем за счет генерации суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах»;

в 2013 г. – Е.С. Сунчугашевой за цикл работ «Управление параметрами плазменных каналов при помощи филаментации сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов»;

в 2014 г. – Д.В. Мокроусовой, Е.С. Сунчугашевой за работу «Распространение сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе и управление протяженностью плазменных каналов, образующихся при их филаментации» и Ю.Я Масловой за работу «Томсоновский источник рентгеновского излучения для медицинских применений»;

в 2016 г. – И.О. Киняевскому за цикл работ «Преобразование частоты излучения лазера на окиси углерода в спектральный интервал от 2.5 до 16.6 мкм»;

в 2017 г. – Д.В. Мокроусовой, Е.С. Сунчугашевой за цикл работ «Увеличение зоны действия и пиковой интенсивности мощных ультракоротких лазерных импульсов для задач удаленного зондирования среды» и О.А. Бурдуковой за цикл работ «Эффективная накачка перестраиваемых лазеров на красителях полупроводниковыми лазерами»;

в 2018 г. – Н.А. Смирнову, А.А. Настулявичус, И.Н. Сараевой, П.А. Данилову, Нгуен Ван Лыонг за цикл работ «Высокопроизводительная фабрикация наноструктурных покрытий и их применение для антибактериальной защиты»;

в 2021 г. – А.В. Корибуту, А.А. Рогашевскому, Ю.А. Герасимовой за цикл работ «Измерение сечений многофотонного и обратного тормозного поглощений».

Молодые учёные Отделения КРФ на конкурсной основе также получили следующие поощрения федерального уровня:

в 2014 г. – Е.С. Сунчугашева, Стипендия Президента РФ для молодых ученых;

в 2016г. – А.О. Левченко, Грант Президента РФ для молодых ученых - кандидатов наук;

в 2017 г. – Е.С. Сунчугашева , С.В. Макаров, М.К. Тарабрин, О.Е. Вайс и П.А. Данилов, Стипендия Президента РФ для молодых ученых и аспирантов;

в 2018г. – О.Е. Вайс и П.А. Данилов, Стипендия Президента РФ для молодых ученых;

в 2019 г. – А.М. Сагитова и А.А. Настулявичус, Стипендия Президента РФ для молодых ученых;

в 2020 г. – А.М. Сагитова и А.А. Настулявичус, Стипендия Президента РФ для молодых ученых;

в 2021 г. – А.М. Сагитова, Стипендия Президента РФ для молодых ученых,

– А.Е. Рупасов, Стипендия Правительства РФ для молодых ученых.

### 5.2.3 Конкурс научных работ на премию Физического института

Об уровне и значимости научных работ, выполняемых сотрудниками ОКРФ и ФИАН по тематике ОКРФ, свидетельствуют полученные ими престижные премии Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, присуждённые, например:

- в 2006 г. – О.Н. Крохину, В.Я. Никулину, А.А. Тихомирову за работу «Плазменный фокус как инструмент: при создании новых сплавов, получения нанодисперсных материалов и создания высокоадгезийных покрытий»;
- в 2007 г. – В.И. Козловскому, Ю.В. Коростелину, А.И. Ландману, Ю.П. Подмарькову, М.П. Фролову за работу «Эффективные лазеры диапазона 2-5 мкм на кристаллах $A_2B_6$ с двухвалентными ионами переходных металлов и их применение в методе внутрирезонансной лазерной спектроскопии» и

– Ю.Г. Морозову, А.Л. Петрову, В.И. Щербакову, И.В. Шишковскому за цикл работ «Лазерный синтез объёмных изделий. Перспективы и приложения»;

- в 2008 г. – А.Л. Андрееву, И.Н. Компанцу, Е.П. Пожидаеву за работу «Исследования по созданию трехмерного дисплея с объемным экраном»;
- в 2009 г. – Ю.М. Климачеву, А.Ю. Козлову, А.А. Коткову, Л.В. Селезневу, Д.В. Синицыну за работу «Криогенный обертонный CO лазер с накачкой ВЧ разрядом» (вторая премия);
- в 2010 г. – А.Н. Кирееву, А.В. Конященко, А.В. Таусеневу, Д.А. Тюрикову, А.С. Шелковникову за работу «Фемтосекундные метановые оптические часы»;
- в 2011 г. – В.Б. Розанову, С.Ю. Гуськову, Н.Н. Демченко, Г.А. Вергуновой, И.Я. Доскочу, Р.В. Степанову, Р.А. Яхину за работу «Развитие моделей сжатия и быстрого зажигания мишеней лазерного термоядерного синтеза на основе интерпретации современных экспериментов» и

– Зуеву В.С. за работу «Спонтанное излучение атома вблизи тела наноразмера»;

• в 2012 г. – Н.Е. Молевич, Р.Н. Галимову, Д.И. Завершинскому за работу «Теоретическое исследование структуры и устойчивости ударных волн в тепловыделяющих неравновесных газовых средах» и
– Н.Д. Зворыкину, А.О. Левченко, И.В. Сметанину, Н.Н. Устиновскому за работу прикладного характера «Высоконаправленная передача СВЧ-излучения в плазменных волноводах скользящих мод, создаваемых в атмосфере KrF лазером»;
• в 2013 г. – В.И. Ковалеву, Н.Е. Котовой за работу ««Медленный свет» при ВРМБ: спекуляции и реальность» и
– А.И. Аристову, Л.Д. Михееву, Н.А. Ратахину за работу прикладного характера «Гибридная фемтосекундная система THL-100 мультитераваттной мощности излучения в видимом диапазоне»**;**
• в 2014 г. – П.П. Васильеву за цикл работ «Сверзизлучательный квантовый фазовый переход в полупроводниках при комнатной температуре»,
– В.Д. Зворыкину, А.А. Ионину, С.И. Кудряшову, А.О. Левченко, Л.В. Селезнёву, Д.В. Синицыну, И.В. Сметанину, Е.С. Сунчугашевой, Н.Н. Устиновскому, А.В. Шутову за цикл работ «Формирование плазменных каналов при филаментации мощных ультракоротких лазерных импульсов и управление с их помощью высоковольтными электрическими разрядами» и
– Е.П. Пожидаеву, С.И. Торговой, М.В. Минченко, В.А. Барбашову за цикл работ прикладного характера «Спиральные наноструктуры жидкокристаллических сегнетоэлектриков: физические эффекты и физико-химические основы их применения в дисплейных и фотонных устройствах нового поколения».

Видно, что фактически каждый год из четырёх премируемых работ одна, а часто и две научные работы, выдвинутые Отделением КРФ, удостаивались институтской премии. В этом есть заслуга и ведущих учёных ОКРФ, привлекаемых для рассмотрения всех конкурсных работ ФИАН. Наиболее часто в конкурсной комиссии участвовали В.Ю. Быченков, А.В. Виноградов, А.З. Грасюк, С.Ю. Гуськов, И.Г. Зубарев, И.Н. Компанец.

### 5.2.4 Конкурсы на получение грантов

В советский период основным источником средств, привлекаемых на развитие перспективных научных направлений лазерной физики и новых изделий лазерной техники дополнительно к плановым бюджетным ассигнованиям, были практически только Постановления ЦК КПСС и Правительства, инициируемые Н.Г. Басовым и руководством ВПК в целях решения всегда актуальной проблемы обеспечения обороноспособности государства. В постсоветский и тем более в постперестроечный период на рубеже столетий дополнительные средства на исследования и разработки черпались на конкурсной основе из специализированных фондов грантодателей (как отечественных, так и зарубежных) или посредством рабочей кооперации (сотрудничества) с заинтересованными российскими или зарубежными партнёрами, обладающими необходимыми

ресурсами. Не менее важно получение таких грантов было и для выделения дополнительной заработной платы работникам.

Сотрудники Лаборатории (Отделения) КРФ всегда активно участвовали в конкурсах на получение грантов от Президиума и отделений РАН, Министерства науки и высшего образования РФ, от Министерства экономического развития РФ, финансирующего Федеральные целевые программы (ФЦП), от Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Российского научного фонда (РНФ), Фонда прикладных исследований (ФПИ), а также от международных организаций (МНТС, МАГАТЭ, ИНТАС, CRDF, EORD и др.), особенно в последние годы прошлого и в первые годы текущего столетия. Например, в период 2000-2004 гг. в среднем ежегодно финансировалось 7 проектов МНТС, 3 проекта CRDF и 4 проекта INTAS.

На протяжении последнего десятилетия Отделение КРФ дополнительно к бюджетному финансированию, получаемому за выполнение государственного задания (ГЗ), имело ежегодно 25-30 грантов (проектов) РФФИ, 4 гранта РНФ, 10-20 грантов Президиума РАН, 4 гранта Отделения физических наук РАН, 1-2 ФЦП. Каждый из грантов был величиной от полумиллиона до нескольких миллионов рублей, так что средства грантов обеспечивали добавку порядка трети бюджетных средств. Некоторую часть дополнительного финансирования Отделение также получило под организацию в нём Новых научных групп (ННГ): уже проработавших до июля 2020 г. семи групп (А.В. Брантова, С.И. Кудряшова, Л.В. Селезнёва, Д.В. Синицына, Р.А. Яхина, М.В. Горбункова, Н.В. Дьячкова) и пяти групп (первых пяти из вышеперечисленных), работа которых поддержана с осени 2020 г. Группы имеют, в основном, молодёжный состав и ведут исследования в актуальных научных направлениях.

Признанием высокого уровня работ учёных ФИАН, демонстрируемого в научных конкурсах, является приглашение его сотрудников в экспертные советы конкурсов для участия в рассмотрении конкурсных работ. В последние годы в среднем 7 сотрудников ОКРФ осуществляли экспертизу проектов РФФИ, 6 являлись экспертами РНФ, 2 – экспертами РНФ и 2 привлекались для экспертизы проектов «ГК Роснанотех».

## 5.3 Учёные, диссертационные, экспертные советы; научно-педагогическая деятельность; пропаганда знаний

### 5.3.1 Учёные, диссертационные и экспертные советы

Напомним, что в образованной в 1963 г. Лаборатории КРФ членами Учёного совета являлись двенадцать научных сотрудников, включая его председателя Н.Г. Басова – единственного доктора наук. Со временем квалификация членов Учёного совета росла и в последнем составе Отделения КРФ, в котором председательствовал Н.Г. Басов, докторами наук были уже 20 из 26 членов совета. В составе действующего в настоящее время Учёного совета, в связи с уходом

«старых кадров» и его омоложением, из 25 членов совета 14 являются кандидатами наук, причём двое из них выбраны по отдельному молодёжному списку.

На заседаниях Учёного совета ОКРФ обсуждаются планы и результаты научной работы, отчёты руководителей подразделений, выдвижение на вакантные должности и аттестация кадров, предзащита диссертаций и др. вопросы текущей жизни.

После Н.Г. Басова председателями Учёного совета ОКРФ были руководители отделения А.Н. Стародуб (с 2001 г.) и О.Н. Крохин (с 2005 г.), а с 2010 г. председателем является А.А. Ионин (Рис. 5.6).

Рис. 5.6. Профессор А.А. Ионин, руководитель ОКРФ с 2010 г.

Девять сотрудников ОКРФ участвуют в работе Учёного совета ФИАН. Руководитель Отделения А.А. Ионин входит в него по должности, О.Н. Крохин как академик РАН, а 7 избраны на собрании научных сотрудников Отделения по квоте, в том числе 1 по молодёжной.

Аспиранты и сотрудники ОКРФ защищают диссертации в диссертационном совете 24.1.262.01 по специальностям: оптика, физика конденсированного состояния (ранее называлась «физика твёрдого тела»), лазерная физика (ранее называлась «радиофизика, включая квантовую»). В настоящее время диссертационный совет работает в составе 26 членов – докторов наук, возглавляет его директор ФИАН член-корреспондент РАН Колачевский Н.Н. Руководитель Отделения КРФ профессор А.А. Ионин является его заместителем. Ещё 8 членов диссертационного совета – научные сотрудники ОКРФ, причём один из них – И.Г. Зубарев является также членом экспертного совета ВАК.

В своё время, будучи директорами ФИАН, академики Н.Г. Басов и О.Н. Крохин возглавляли Учёный совет ФИАН и диссертационный совет по указанным

выше специальностям. Они же в течение многих лет возглавляли Государственную аттестационную комиссию (ГАК) в МИФИ, которая оценивала дипломные работы выпускников института. К работе в ГАК вузов и в диссертационных советах вузов и др. организаций ежегодно привлекается до 20 учёных Отделения КРФ.

Некоторые сотрудники ОКРФ входят в экспертные советы, привлекаемые для экспертизы проектов, поступающих в Российскую академию наук или в Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы Министерства науки и высшего образования РФ. Отбор экспертов проводится на основе документов, подтверждающих их квалификацию, и опыта, приобретённого в процессе проведённых ранее экспертиз. Эксперт зарегистрирован в Федеральном реестре экспертов научно-технической сферы, и его статус зафиксирован соответствующим Свидетельством. В настоящее время официальными экспертами РАН являются 8 сотрудников ОКРФ и ещё 7 сотрудников – экспертами ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ.

### 5.3.2 Научно-педагогическая деятельность и пропаганда знаний

От 20 до 30 научных сотрудников, то есть до 10% от состава научного коллектива ОКРФ, преподают в высших учебных заведениях, главным образом, в МФТИ, МГУ, МИФИ, а также в МИРЭА, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МИЭМ (теперь ВШУ), МЭИ, МАИ. В подразделениях ОКРФ проходят преддипломную практику, выполняют дипломные работы студенты и обучаются аспиранты ФИАН и вышеуказанных вузов.

МФТИ и МИФИ имеют в ФИАН базовые кафедры, в работе которых участвуют сотрудники Отделения КРФ. Базовой кафедрой МФТИ является Кафедра квантовой радиофизики, заведующий которой профессор Лебедев В.С. руководит Отделением оптики ФИАН.

Наиболее тесное взаимодействие Отделение КРФ имеет с МИФИ, и не только по линии Высшей школы физиков, научным руководителем которой является академик О.Н. Крохин. Он же руководит кафедрой №88 «Полупроводниковая квантовая электроника и биофотоника», которая организована в декабре 2013 г. в рамках соглашения между ФИАН и МИФИ. Кафедра входит в состав Инженерно-физического института биомедицины НИЯУ МИФИ и готовит специалистов по магистерской программе «Перспективные полупроводниковые лазеры и технологии».

Кроме выпускников кафедры №88 в ОКРФ выполняют исследования аспиранты и выпускники кафедры № 37 «Лазерная физика», которую под названием «Квантовая электроника» основал Н.Г. Басов. Кафедра готовит специалистов по лазерной физике, по применению лазеров и лазерных систем и по взаимодействию лазерного излучения с веществом. Заведует кафедрой профессор Н.Н. Евтихиев.

О.Н. Крохин являлся многие годы председателем подкомиссии физики Экспертной комиссии РАН по анализу и оценке научного содержания

государственных образовательных стандартов и учебных материалов для высшей и средней школы, президентом Ассоциации кафедр физики технических вузов России, членом президиума Научно-методического совета по физике Минобрнауки. В течение ряда лет он был членом дирекции Целевой федеральной программы «Государственная поддержка интеграции фундаментальной науки и высшего образования», руководил крупнейшим и эффективно работавшим Учебно-научным центром «Фундаментальная оптика и спектроскопия».

Вклад сотрудников Отделения КРФ В.А. Алексеева, Н.Г. Басова и О.Н. Крохина, а также А.П. Шотова (Отделение ФТТ ФИАН) в подготовку высококвалифицированных кадров отмечен в 2000 г. премией Президента РФ в области образования «За создание и реализацию проекта «Высшая школа физиков МИФИ – ФИАН»». В 2003 г. такой же премии «За Учебно-научный центр «Фундаментальная оптика и спектроскопия» – комплекс подготовки кадров высшей квалификации, новых научных и образовательных технологий» удостоены сотрудник ОКРФ И.Н. Завестовская и сотрудники др. отделений ФИАН Л.В. Келдыш, Ю.В. Копаев, В.Н. Очкин и Л.П. Пресняков.

С 1977 г. Н.Г. Басов являлся заместителем председателя, а в 1978-1990 гг. возглавлял Всесоюзное просветительское общество «Знание». Его заместителем в Обществе был к.ф.-м.н. А.Н. Стародуб, сменивший Н.Г. Басова в 2001 г. на посту директора ОКРФ. Общество располагало издательством «Знание», которое выпускало целый ряд журналов и книг, популяризирующих достижения науки и техники и расширяющих кругозор читателей, в том числе журналы «Наука и жизнь», «Международная жизнь», «Природа», «Квант», «Наука и религия», научно-методический ежемесячник «Слово лектора», подписные серии брошюр по 23 отраслям знаний, научно-популярные книги для чтения, методическую литературу в помощь лекторам.

В 1967-1990 гг. Н.Г. Басов являлся главным редактором научно-популярного журнала «Природа». Он привлек многих сотрудников ОКРФ и др. ученых ФИАН к написанию для этого журнала статей, доступно описывающих достаточно сложные вопросы современной физики, включая квантовую. В Политехническом музее организовывались лекции учёных, популярно излагающих новые знания по естественным наукам (Рис. 5.7). Н.Г. Басов придавал серьезное значение популяризации и пропаганде нового направления в энергетике будущего. В серии статей в журнале «Природа», в книге "Физика лазерного термоядерного синтеза" (1988 г.) им подробно и интересно рассказывается о физических явлениях, инженерных задачах и решениях тех проблем, которые связаны с лазерным термоядерным синтезом.

К сожалению, в 90-е годы правопреемник Общества «Знание России» пришёл в упадок и прекратил свою деятельность. В настоящее время предпринимаются усилия для его воссоздания.

Рис. 5.7. Сотрудники Института в Политехническом музее на выпуске Научной кинопанорамы, посвящённом 250-летию ФИАН (1974 г.). Слева направо: А.Н. Ораевский, А.П. Шотов, Н.Г. Басов, Н.В. Карлов, В.М. Каслин, Г.Г. Петраш

## 5.4 Научное и техническое сотрудничество

### 5.4.1 Сотрудничество в рамках ФИАН и страны

В ФИАН в советский период никогда не существовало искусственных препятствий для сотрудничества разных лабораторий, и оно процветало, если в нём были заинтересованы обе стороны. Консультацию можно было получить в любой лаборатории по любому вопросу в рамках компетенции консультирующего, причём доброжелательные люди (а их большинство) всегда помогали получить нужный контакт. Лаборатория КРФ была организована, когда исследования уже вовсю шли в рамках темы «Фотон» и они только способствовали развитию сотрудничества. В постсоветский период сотрудники стали вести себя более сдержано (время – деньги), но тем не менее общая атмосфера осталась благоприятной для контактов и сотрудничества, что очень помогает в работе и потому радует.

Сотрудничеству между сотрудниками разных организаций обычно препятствует режим безопасности от неизвестных, но возможных хлопот и особенно режим секретности. Но контакт Н.Г. Басова с руководством нужной организации и/или обратный контакт, санкционирующие начало совместной работы, и общий настрой на решение архиважных и актуальных задач помогали налаживанию и расширению сотрудничества с научными и промышленными организациями. Уже в конце шестидесятых годов в лаборатории КРФ регистрировалось до нескольких десятков различных договоров о сотрудничестве, а в семидесятых - восьмидесятых годах их количество достигло максимума в 100-130 договоров.

Сотрудничество распространилось на академические институты и вузы, на отраслевые НИИ и «почтовые ящики», причём не только Москвы, а всего СССР, т. е. охватывало и организации из союзных республик. Число прикомандированных к ЛКРФ сотрудников из этих организаций в течение года достигало полутора сотен. Вот только несколько примеров организаций, с которыми имелись наиболее близкие и устойчивые связи: МИФИ и МГУ МВССО, ФТИ, ИРЭ и ИНЭОС АН СССР, ГОИ, ЦКБ «Астрофизика», НИИ «Геодезия» и ГИПО МОП, РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ Росатома, ВНИИОФИ и ВНИИФТРИ Росстандарта, ВНИИТ, НИИ «Платан», НИИ «Исток», МЭЛЗ, НИИМВ и НИИГРП МЭП, НИИ «ХИММАШ», ГНИИХТЭОС и ГИАП МХП, НИИВК и ЦНИИ «Комета» МРП, НИИАС МАП, ГИРЕДМЕТ МЦМ. В Приложении к ежегодным отчётам ОКРФ о важнейших результатах научной деятельности отдельно указывались важнейшие результаты внедрения (сотрудничества) с указанием заключённых договоров.

### 5.4.2 Международное сотрудничество

Несмотря на «холодную» войну и обострение международных отношений на рубеже 70–80-х годов, международное сотрудничество Лаборатории (Отделения) КРФ в рамках ФИАН продолжало успешно развиваться, что подтверждает высокий уровень проводимых в них исследований и связанную с этим заинтересованность зарубежных организаций в сотрудничестве.

В советский период прежде всего реализовывались программы сотрудничества с социалистическим странами. Наиболее тесные связи ОКРФ имело с научно-техническими организациями ГДР (Центральный институт оптики и спектроскопии АН ГДР в Берлине, предприятие «Карл Цейс Йена»), ПНР (Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза им. С. Калиского в Варшаве), ВНР (Центральный институт физических исследований в Будапеште). Многие сотрудники ОКРФ ездили в тот период для проведения исследований в социалистические страны и принимали учёных – гостей из них. Выполнение программ сотрудничества с соцстранами планировалось и контролировалось, в том числе и партийными органами.

Существовали программы сотрудничества и с капиталистическими странами, особенно в постсоветский период и особенно с теми странами (США, Франция, Великобритания, Германия, Италия), в которых были широко развёрнуты исследования по лазерам, их применениям и лазерной плазме. Проводились специализированные международное семинары, например, советско-американский семинар по оптической обработке информации, прошедший в 1975 г. в Вашингтоне и в 1976 г. в Новосибирске.

Организовывались научно-технические проекты, например, совместный российско-британо-французский проект «Эврика-113» («СО-Евролазер») в 1992 - 1996 гг. и другой европейский проект «Эврика-1390» («Ультралаз») в 1995-1997 гг. с участием российских, британских, немецких, австрийских и др. ученых. Совещания по проекту «Эврика-113» («СО-Евролазер») проходили не только за

рубежом, но и в ФИАНе, С. Петербурге и Екатеринбурге, причем в Екатеринбурге выполнялись совместные исследовательские работы на технологическом CO-лазере с участие молодых британских и французских ученых.

В Лаборатории газовых лазеров в 90-х годах на разработанных в ФИАНе уникальных лазерных установках выполнялись совместные экспериментальные исследования с компанией DuPont (США) по устранению характерного блеска синтетических тканей при помощи воздействия лазерного излучения на поверхность этих тканей. С Горным университетом Колорадо, США (Colorado School of Mines) изучалось воздействие излучения CO и $CO_2$ лазеров на горные породы, характерные для нефтеносных полей. Совместно с научной командой с ракетного полигона Белые пески, США (White Sands Missile Range, NM, USA), прибывших в ФИАН со своей исследовательской аппаратурой, изучалось обращение волнового фронта CO и $CO_2$ лазеров при помощи четырехволнового смешения. В рамках международных проектов, поддерживаемых Международным Научно-Технологическим Центром (МНТЦ), совместно с Исследовательской лабораторией ВВС США (Air Force Research Laboratory, NM, USA) с конца 90-х до декабря 2013 г. выполнялись исследования по CO лазеру на обертонных переходах, по генерации синглетного кислорода в электрическом разряде для электроразрядного кислород-йодного лазера, по дистанционному управлению протяженным электрическим разрядом в атмосферном воздухе при помощи УФ фемтосекундных лазерных .импульсов.

Устанавливалось прямое двухстороннее сотрудничество с конкретными зарубежными научными обществами (например, с обществом Макса Планка в Германии) и университетами (например, с Университетом Нью-Мексико, США). Существовали также программы обмена учёными для работы в университете продолжительностью до нескольких месяцев.

Понимая, что проблема получения неисчерпаемого безопасного и относительно экологически чистого источника энергии превосходит на данном этапе возможности нашей страны, Н.Г. Басов неоднократно ставил вопрос о международном сотрудничестве в решении проблемы ЛТС. Это было непросто в условиях закрытого характера работ по мощным лазерам и физике инерциального синтеза в нашей стране и в США, но развитие двусторонних отношений, начатое Н.Г. Басовым с ведущими лабораториями многих стран, принесло свои плоды. В области ЛТС ФИАН успешно сотрудничал и сотрудничает с учеными США, Франции, Японии, Великобритании, Индии, Испании, Германии, Польши и других стран.

Для Н.Г. Басова более привлекательной, однако, представлялась идея создания международного лазерного термоядерного центра (или в более общем виде центра по инерциальному синтезу). В 1990–91 гг. идея получила поддержку влиятельных международных организаций МАГАТЭ и ЮНЕСКО, и в начале 90-х годов даже разрабатывались ее практические аспекты. Этот вклад Н.Г. Басова в развитие международного сотрудничества в области ЛТС был отмечен почетными

премиями в США, Индии и других странах. В итоге развитие работ по ЛТС всё же пошло по созданию национальных центров ЛТС в индустриально развитых странах (США, Франция, Япония, Китай, Корея, Россия). Наиболее мощные, мегаджоульного уровня установки для ЛТС были созданы в США и во Франции. В России подобная установка создаётся в г. Сарове, и сотрудники ОКРФ на договорной основе принимают активное участие в совместных исследованиях лазерной плазмы с РФЯЦ ВНИИЭФ.

Многие конкретные зарубежные научные центры, с которыми сотрудничали подразделения ОКРФ, уже указаны в разделах 2 и 3 при изложении результатов проведённых работ. Дополним эти сведения лишь некоторыми комментариями. Можно отметить, что наиболее активное международное сотрудничество имело место в первые годы этого столетия, и больше всего международных контактов и контрактов в этот период имели лаборатории диагностики плазмы (16), стандартов частоты (14), газовых лазеров (10), фотохимических процессов (9), оптоэлектронных процессоров (6), рентгеновской оптики (5), а также сектор теоретической радиофизики (19) и сектор теории лазерной плазмы (5). Всего отделение КРФ сотрудничало тогда с научными центрами 20 стран (Австралия, Великобритания, Дания, Израиль, Индия, Ирландия, Испания, Италия, Канада, Китай, Корея, Польша, Сингапур, США, Тайвань, Турция, Чехия, Франция, ФРГ, Япония). В 2010 г. международное сотрудничество осуществлялось с 15 странами.

В 2010-2012 гг. в ОКРФ реализовывались следующие международные программы:

- Европейский проект «Экстремальная инфраструктура света» (ELI)
- Европейская программа HiPER (I этап)
- Грант №.238556 Евросоюза «Голубой фемтосекундный лазер на основе соединений GaN» по программе FP-7 «Фемтоблю»
- Европейский проект COST MP0601 «Коротковолновые лабораторные источники»
- Европейский проект COST MP0702 «Навстречу функциональным субволновым фотонным структурам»
- Грант Института Передовых Технологий Самсунг на исследование в области адаптивных автостереоскопических дисплеев
- Программа Марии Кюри № 230777 (в рамках 7-ой европейской программы), проект «Взаимодействие сверхинтенсивных лазерных импульсов с плазмой».

В 2013-2019 гг. ОКРФ принимало участие в международных программах с:

- НИИ Монокристаллов НАН Украины, Харьков (соглашение РФФИ с НАНУ)
- Кембриджский университет, Великобритания (соглашение РФФИ с Королевским обществом),
- Лёвенский католический университет, Лёвен, Бельгия (договор с ФИАН)
- Институт химико-физических процессов CNR, Рим, Италия (договор с ФИАН)
- Туринский политехнический университет, Италия (договор ФИАН-МИФИ-ТПУ)

- Институт физики НАН Украины, Киев (договор с ФИАН)
- CNRS, Марсель, Франция (договор с ФИАН)
- МАМИ, Германия (договор с ФИАН).

В последние 2 года (2020-2021) ОКРФ имеет с зарубежными партнёрами 1 трёхсторонний договор о сотрудничестве, 6 договоров о прямых связях с организациями и 2 международные программы сотрудничества.

### 5.5 Работа общественных организаций в советский период

В советский период Н.Г. Басов в своей работе руководителем Отделения КРФ опирался на помощь партийной организации, которая насчитывала в 70–80-е годы более 80 членов КПСС и была самой крупной в ФИАН. Она избирала партбюро во главе с секретарём, а на Троицкой площадке ОКРФ коммунисты избирали ещё и партгрупорга. Секретарями партбюро в разные годы были Ю.С. Иванов, В.В. Никитин, И.Н. Компанец, А.Н. Ораевский. В порядке напутствия новому секретарю партбюро Николай Геннадиевич говорил, что на время секретарства партийная работа по отношению к научной должна быть приоритетной. Н.Г. Басов сам был членом КПСС (вступил в 1951 г., будучи аспирантом МИФИ) и в своё время избирался в партбюро и в партком ФИАН, в 1960-61 гг. был членом Октябрьского райкома и в 1974-1981 гг. членом Московского горкома КПСС.

Наиболее серьёзными вопросами, обсуждавшимися в те годы на заседаниях партбюро и партийных собраниях, являлись: выполнение планов научно-исследовательских работ, о чём отчитывались руководители подразделений и сам Н.Г. Басов (Рис. 5.8 и 5.9); строительство «пристройки» к корпусу КРФ (фактически не меньшей, чем основной корпус) и крупно-габаритной установки «Дельфин» для исследований по лазерному инициированию термоядерной реакции; поддержка исследовательских работ со стороны вспомогательных подразделений ОКРФ и ОКБ ФИАН и обеспечение работ необходимым оборудованием; международное сотрудничество, прежде всего, с учёными социалистических стран; работа в ОКРФ научного семинара; политсеминары и политинформации; обсуждение программных документов КПСС и страны (Рис. 5.10); работа профсоюзной и комсомольской организаций (Рис. 5.11); рекомендации для выдвижения сотрудников на премии и звания и для заграничных командирований.

В рабочей обстановке обсуждались не только плановые мероприятия, но также возникающие проблемы, просчёты и ошибки в работе отдельных подразделений и Отделения КРФ в целом. Правда, некоторые из них выяснились только спустя годы. Например, на этапе проектирования корпуса №1 для лаборатории КРФ в Москве своевременно не было запланировано создание специализированных особо чистых технологических помещений с необходимым оборудованием и инфраструктурой; принятая в 1970 г. программа создания оптико-

электронной вычислительной машины базировалась на устаревших к тому времени положениях; некоторые ошибочные представления о физике процессов в полупроводниках задержали появление, а затем и создание инжекционных лазеров; первоначальные успехи в исследованиях ЛТС были переоценены, а затраты на создание экспериментальной установки и необходимых для этого дополнительных исследований занижены; первоначальное недоверие к возможностям персональных компьютеров и ограниченная финансовая поддержка задержали оснащение ими лабораторий ОКРФ.

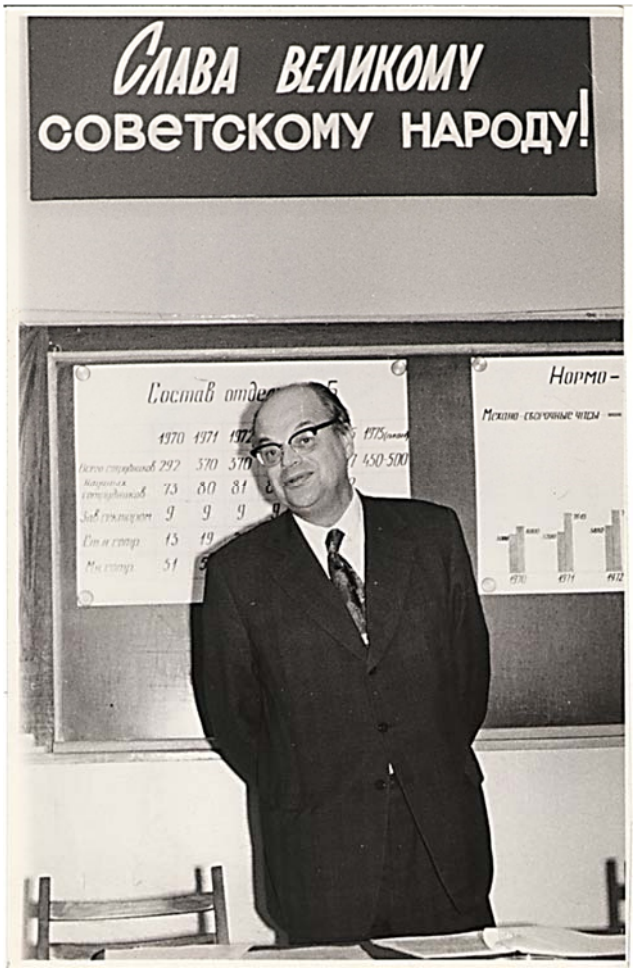



Рис. 5.8. Отчёт руководителя Отделения КРФ Н.Г. Басова (1975 г.)

Партийную-комсомольскую-профсоюзную школу прошли многие сотрудники ОКРФ, ставшие известными учёными и руководителями. Например, бывший секретарь комсомольской организации И.Б. Ковш, доктор физ.-мат. наук, профессор, лауреат Госпремии СССР и заслуженный деятель наук РФ, работал заместителем руководителя отделения КРФ, а в течение последних 30 лет является президентом Лазерной ассоциации. Доктор физ.-мат. наук, профессор, дважды лауреат Госпремии (СССР и РФ) В.А. Катулин непосредственно перед тем, как стать директором Самарского филиала ФИАН, являлся председателем профбюро Отделения КРФ.

Рис. 5.9. Сотрудники ОКРФ – внимательные слушатели

Рис. 5.10. Выступление Н.Г. Басова на партийном собрании в Отделении КРФ в 1977 г. Справа – секретарь партбюро И.Н. Компанец

Рис. 5.11. Президиум отчётно-выборного собрания комсомольской организации ОКРФ в 1978 г. (слева направо): секретарь партбюро И.Н. Компанец, зам. руководителя ОКРФ И.Б. Ковш, секретарь комсомольской организации В.Т. Глыва

Совместно с комсомольской и профсоюзной организациями партийная организация ОКРФ организовывала поездки сотрудников на уборку урожая в подшефный совхоз, весенние («ленинские») субботники (Рис. 5.12 и 5.13), праздничные и юбилейные мероприятия, включая майскую и ноябрьскую демонстрации, а также выходы на Ленинский проспект для встречи с высокими зарубежными гостями и на последние проводы нескольких руководителей страны.

Рис. 5.12. На субботнике (слева направо): Е.П. Маркин, И.Н. Компанец, В.А. Щеглов

Рис. 5.13. На субботнике (слева направо): В.С. Казакевич, А.А. Ионин, В.А. Соболев, И.Б. Ковш

В стране в ту пору изобиловали различные формы соцсоревнования. Но если в производственных коллективах были в ходу формы «Лучший по профессии», «Ударник коммунистического труда» и подобные, то в ФИАН активно проводилось соревнование научных групп. Кроме научных результатов (статей, докладов, патентов, демонстрационных моделей и экспериментальных установок), что для оценки безусловно являлось главным, учитывалось также участие сотрудников группы в общественной жизни (в выборных органах, в общественно-политических мероприятиях и т. п.). Научная группа от ОКРФ практически всегда являлась одним из призёров этого достаточно престижного соревнования, а научные группы А.С. Шиканова и И.Н. Компанца являлись его победителями даже дважды (Рис. 5.14).

Рис. 5.14. Сотрудники и аспиранты группы, победившей в 1977 и 1983 гг. в соревновании научных групп ФИАН (слева направо): С.П. Котова и М.Е. Сергеева, стоят А.Г. Соболев, А.Н. Малов, А.Ф. Денисов, П.Д. Березин, А.В. Парфёнов, И.Н. Компанец (руководитель группы) и А.А. Васильев

Спортивные соревнования по мини-футболу и волейболу и эстафета по территории ФИАН привлекали много зрителей. На игру волейбольной команды лаборатории КРФ приходил «болеть» и Н.Г. Басов (Рис. 5.15). В 1969 г. эта команда (Рис. 5.16) выиграла первенство среди лабораторий ФИАН.

Рис. 5.15. Болельщики – сотрудники Лаборатории КРФ (слева направо): Н.Г. Басов, В.И. Трошагин, И.В. Красавин, В.П. Страхов, А.С. Семёнов (1969 г.)

Рис. 5.16. Волейбольная команда Лаборатории КРФ – победитель первенства ФИАН 1969 г. (слева направо): В. Леонов, В. Смирнов, О. Крохин, О. Туманов, В. Самойлов, И. Компанец, В. Александров

К сожалению, был случай, когда партийная организация оказалась не помощником Н.Г. Басова, а причиной доставленных ему хлопот. Весной 1982 г. партгруппа Троицкой площадки ОКРФ проводила собрание трудового коллектива, на котором обсуждался проект закона о трудовых коллективах, и было совершенно справедливо высказано соображение о некорректности формулировки в проекте о партийном руководстве беспартийными членами коллектива. Районное и городское партийное начальство узнало раньше, что в руководимых Н.Г. Басовым Институте и Отделении КРФ подвергнут сомнению основополагающий принцип КПСС, и сообщило в партком и руководству ФИАН об этом факте и о необходимости взысканий. Конечно, известие было очень неприятным для Николая Геннадиевича, если помнить, кем он был в Академии наук СССР и какие посты занимал в обществе. Вопрос обсуждался даже в Октябрьском райкоме партии с привлечением Н.Г. Басова и секретаря партбюро И.Н. Компанца. Один из членов райкома КПСС всё же признал, что формулировка проекта действительно является «недостаточно взвешенной». Но Николаю Геннадиевичу пришлось приложить усилия, чтобы закрыть проблему без последствий для участников событий и Института.

А однажды в 70-ые годы партийная организация была привлечена Октябрьским райкомом КПСС для обсуждения деликатного вопроса о некоторой конфронтации сотрудников отделений «А» и «Б» ФИАН, информация о которой была «на слуху» на самых разных уровнях научного (обычно академического) сообщества, и которая негласно проявлялась в «натянутых» отношениях самих сотрудников и их коллег, примыкавших к тому или иному «лагерю», в непубличном («заглаза») выпячивании или в принижении успехов (достижений) или, наоборот, проколов (провалов) той или иной стороны, в «проталкивании» (лоббировании) своих интересов и своих кадров или, наоборот, в организации им препятствий и т. п.

На заседание Октябрьского райкома КПСС, которое вела его первый секретарь Т.П. Архипова, были приглашены руководитель Отделения «А» А.М. Прохоров с секретарём партбюро Н.В. Карловым и руководитель Отделения «Б» Н.Г. Басов с секретарём партбюро Отделения И.Н. Компанцом. Заседание прошло достаточно спокойно и быстро, поскольку оба академика уведомили присутствующих о своём искреннем уважении и почтении по отношению друг к другу, а проявления конфронтации посчитали только внешними. Они в обоих отделениях инициировались сотрудниками (вплоть до заместителей), не вполне адекватно понимающими процесс и особенности научных исследований, имеющих по сути соревновательный характер, а также превратно понимающими вопросы защиты интересов своих отделений и их руководителей. Оба академика посчитали это своими недоработками и обещали принять необходимые меры.

У сотрудников ФИАН и ОКРФ действительно имеется множество свидетельств уважительно-почтительного, а с возрастом и заботливого отношения академиков друг к другу. Например, директор Пущинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра ФИАН, д.ф.м.н. Р.Д. Дагкесаманский

рассказал [14], что в один из визитов в обсерваторию, а именно 11 июля 1980 г., Н.Г. Басов попросил разрешить ему позвонить в Москву А.М. Прохорову. Услышав в трубке голос Александра Михайловича, Николай Геннадиевич произнёс: «От всей души, Александр Михайлович, поздравляю Вас с замечательным юбилеем». На вопрос удивленного собеседника, о каком юбилее говорит Николай Геннадьевич, тот ответил: «Ну так сегодня Вам исполняется 64 года, а это ведь 2 в шестой степени, и следующий такой день будет только через следующие 64 года!».

А вот что говорил А.М. Прохоров в день 75-летия Н.Г. Басова (Рис. 5.17) «об одном из первых с 1951 г. и ближайших своих сотрудников в Лаборатории колебаний ФИАН»: «9 декабря 1994 года была пятница. Кто-то из старых сотрудников Лаборатории колебаний вспомнил, что завтра, 10 декабря, исполнится 30 лет с того памятного дня, когда Чарльзу Таунсу и нам с Николаем Геннадиевичем в Стокгольме была вручена Нобелевская премия по физике 1964 г. Тут же возникла идея отметить эту дату. Позвонили Николаю Геннадиевичу. Он живо откликнулся на предложение собраться ненадолго в моем кабинете. Присутствовали еще несколько сотрудников нашего института из числа работавших в Лаборатории колебаний ФИАН в 50-е годы. Незаметно в непринужденной теплой беседе прошли два часа. Было хорошее настроение, говорили о сегодняшнем дне, о прошедших годах. Что-то звучало вслух, что-то проходило перед мысленным взором» [12].

Рис. 5.17. Академик А.М. Прохоров (слева) выступает на чествовании юбиляра – академика Н.Г. Басова на заседании Учёного совета ФИАН, которое проводит директор ФИАН академик Л.В. Келдыш

Не менее красноречиво дополняет сказанное и общая фотография (Рис. 5.18) А.М. Прохорова и Н.Г. Басова с внуком первого Александром и сыном второго Дмитрием ([8], стр. 189), 189]). Так уж получилось, что и на Новодевичьем кладбище оба академика упокоились по-соседству (Рис. 5.19).

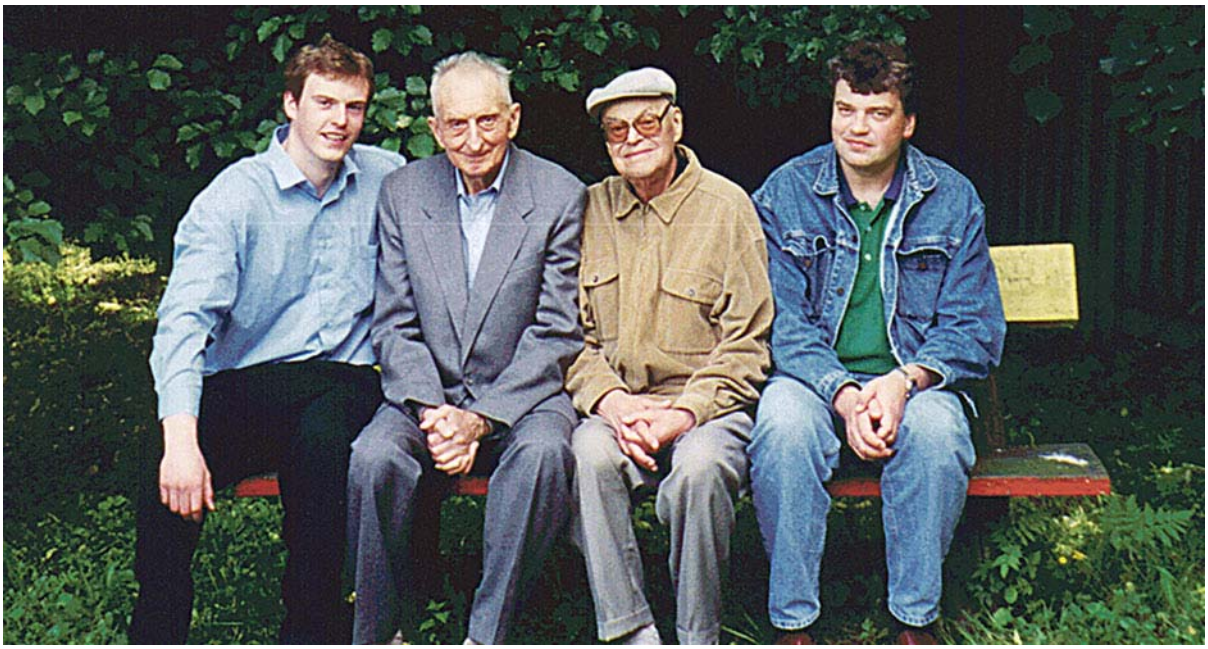


Рис. 5.18. Александр Михайлович Прохоров с внуком Александром (слева) и Николай Геннадиевич Басов с сыном Дмитрием (справа), 2001 г.

Рис. 5.19. Могилы Н.Г. Басова (на переднем плане) и А.М. Прохорова (слева, по-соседству) на Новодевичьем кладбище в Москве

В конце 80-х годов кризис в стране общественно-политического уклада общества заставил переосмыслить роль компартии как «ведущей и направляющей силы», а вместе с этим из жизни научных работников в последующем выбросить «соцобязательства и соцсоревнования с поголовным охватом, различные типы так называемых общественных нагрузок и отчетность по ним, субботники, базы, колхозы и т. д., и т. п.… Мы забыли, что главная общественная функция человека - это производительный труд, и если он ее выполняет хорошо, то никаких других «общественных нагрузок» ему не надо, они только понижают его производительность труда. Искажение этого принципа привело нашу страну на грань катастрофы. Восстановление этого принципа - это и есть, с моей точки зрения, главная задача всех членов нашего общества, в том числе и партийной организации». Так безусловно справедливо высказался зам. руководителя Отделения КРФ беспартийный И.Г. Зубарев в заключении к годовому отчёту ОКРФ на партийном собрании в марте 1988 г.

Николай Геннадиевич очень остро переживал разрушение СССР и крах гегемонии КПСС, урезание финансирования на фундаментальную науку и прикладные научные разработки, уход ученых из сферы науки или их эмиграцию. По сути рушилось многое из того, что он сам создавал. В довершение всего поздней осенью ему приходилось сидеть в верхней одежде в своём кабинете, который, как и все помещения ФИАН, тогда не отапливался. Возможно, что стрессы, которые Николай Геннадиевич испытал в 90-е годы, могли быть причиной его раннего ухода от нас.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Редко кому удаётся так ярко прожить свою жизнь и так много передать потомкам как Николаю Геннадиевичу Басову. Сотрудники Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова свято чтут его память, бережно относятся к его научному наследству и обогащают его новыми идеями и практическими результатами своих исследований.

Работать под руководством Н.Г. Басова и общаться с ним – великая честь, выпавшая на удачу и счастье старшему поколению. В то же время жизнь и деятельность Николая Геннадиевича, гениального учёного и простого в общении человека, служит примером молодому поколению и призывает его к осмыслению своей жизни и деятельности.

Отмечая 100-летний юбилей со дня рождения Николая Геннадиевича, выделим следующие главные предложенные им идеи, вошедшие в анналы квантовой радиофизики и определившие черты наступившей лазерной эры:

1952 г. – Идея генерации и усиления электромагнитного излучения с помощью квантовых систем (совместно с А.М. Прохоровым), сформулированная уже через два года после окончания МИФИ и реализованная в мазере, что обеспечило прорыв в повышении точности метрологических измерений и в космической навигации;

1958 г. – Идея о возможности генерации при использовании индуцированных переходов в оптическом диапазоне, давшая толчок к созданию множества типов лазеров на основе твердотельных и газовых активных сред, нашедших разнообразное применение в различных сферах науки и техники;

1959 г. – Идея полупроводникового лазера, приведшая к созданию самого эффективного, самого миниатюрного и самого массового лазера, используемого в оптической связи, оптической памяти, в коммуникациях, в быту и даже для накачки самых мощных твердотельных лазеров;

1962 г. – Идея получения высокотемпературной плазмы для термоядерного синтеза с помощью сфокусированного излучения лазера (совместно с О.Н. Крохиным), единственная не реализованная при жизни Н.Г. Басова (потребовала существенно больших, чем ожидалось, затрат и дополнительных исследований), но обещающая в будущем создание практически неисчерпаемого источника энергии – глобальной мечты человечества.

Были и другие замечательные идеи и реализации с участием Николая Геннадиевича: молекулярные лазеры с тепловой накачкой (1962 г.), повышение мощности лазера путем модуляции добротности резонатора (1962), полупроводниковый лазер с возбуждением среды быстрыми электронами (1964), использование вынужденного рассеяния для когерентного суммирования лазерных пучков, повышения плотности, направленности, а также расширения спектрального диапазона лазерного излучения (1964), работы по мощным фотодиссоционным лазерам (1965), принцип автостабилизации частоты лазера с помощью нелинейно поглощающей ячейки (1967), первые термоядерные нейтроны в плазме, полученной

при воздействии лазерного излучения на твердую мишень (1968), химические реакции, инициируемые лазерным излучением (1970), возбуждение благородных газов электронными пучками для получения излучения в вакуумном ультрафиолете и создания эксимерных лазеров (1970), лазер с электроионизационным возбуждением (1971), лазерная электронно-лучевая трубка для трехцветного телевидения и для оптической памяти (1972), фазовая модуляция когерентного света с помощью жидких кристаллов (1972) и ещё многое – многое другое, предложенное и выполненное в Лаборатории (Отделении) квантовой радиофизики при жизни Николая Геннадиевича.

Результаты работ Н.Г. Басова, его сподвижников и учеников – сотрудников Отделения ОКРФ нашли всеобщее признание, и многие из них получили заслуженные награды и премии. Велика и богата научная школа как самого Н.Г. Басова (более 40 докторов наук), так и его учеников. Лазерная тематика продолжает активно развиваться и наверняка обогатит науку и технику новыми достижениями.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

**Сотрудники Лаборатории (Отделения) КРФ и специалисты тесно сотрудничавших организаций, защитившие до 2022 г. докторские диссертации по тематике КРФ (всего 90)**

Алексанян А.Г.
Алексеев В.А.
Амбарцумян Р.В.
Афанасьев Ю.В.
Башкин А. С.
Беленов Э.М.
Богатов А.П.
Богданкевич О.В.
Бойко В.А.
Брантов А.В.
Быковский Ю.А.
Быченков В.Ю.
Васильев Б.И.
Васильев П.П.
Виноградов А.В.
Ву Ван Лык
Гамалий Е.Г.
Гончуков С.А.
Грасюк А.З.
Грибков В.А.
Губин М.А.
Гуськов С.Ю.
Данилейко М.В.
Данилычев В.А.
Долгих В.А.
Дуванов Б.Н.
Елесин В.И.
Елисеев П.Г.
Завестовская И.Н.
Зельдович Б.Я.
Земсков Е.М
Зубарев И.Г.
Зуев В.С.
Ионин А. А.
Исаков В.А.
Исмаилов И.
Катулин В.А.
Керимов О.М.
Климов В В.
Клозе Э.
Ковалёв В.И.
Ковалёв В.Ф.
Ковш И.Б.
Козловский В.И.
Кокурин Ю.Л.
Компанец И.Н.
Косарева О.Г.
Красюк И.К.
Крохин О.Н.
Крюков П.Г.
Кудряшов С.И.
Летохов В.С.
Лосев Л.Л.
Манько О.В.
Микаэлян Г.Т.
Молчанов А.Г.
Морозов В.Н.
Напартович А.П.
Насибов А.С.
Никитин В.В.
Николаев Ф.А.
Ораевский А.Н.
Плотников А..Ф.
Пожидаев Е.П.
Позднеев С.А.
Полуэктов И.А.
Попов А.М.
Попов Ю.М.
Проценко Е.Д.
Пятахин М.В.
Рагульский В.В.
Розанов В.Б.
Савельев-Трофимов А.Б.
Сапожников М.Н.
Селезнев В.Н.
Селезнёв Л.В.
Сенатский Ю.В.
Склизков Г.В.
Соболев А.Г.
Стойлов Ю.Ю.
Страховский Г.Л.
Сучков А.Ф.
Татаренков В.М.
Тимошенко В.Ю.
Хайдаров А.В.
Холин И.В.
Шведунов В.И.
Шиканов А.С.
Шубин В.Э.
Щеглов В.А.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Премии, медали и почетные звания сотрудников Лаборатории (Отделения) квантовой радиофизики за научные достижения в области науки и техники

### Нобелевская премия по физике

**1964 г.** Басов Н.Г.

За фундаментальные исследования в области квантовой электроники, приведшие к созданию на мазерно-лазерном принципе генераторов и усилителей излучения

### Ленинская премия

**1959 г.** Басов Н.Г.

За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн (создание молекулярных генераторов и усилителей)

**1964 г.** Крохин О.Н., Попов Ю.М.

За фундаментальные исследования, приведшие к созданию полупроводниковых квантовых генераторов

**1984 г.** Маркин Е.П., Ораевский А.Н.

За цикл работ «Фундаментальные исследования химических лазеров на цепных реакциях»

**Ленинская премия** за результаты исследований, выполненных во время работы в других организациях

**1958 г.** Феоктистов Л. П.

За работы по новой технике

**1963 г.** Склизков Г.В.

За работы по новой технике

**1966 г.** Розанов В.Б.

За работы по новой технике

**1980 г.** Борисевич Н.А.

За создание нового научного направления «спектроскопия свободных сложных молекул»

### Государственная премия СССР

**1974 г.** Крюков П.Г.

За разработку оптических квантовых генераторов на неодимовом стекле и освоение их серийного производства

**1978 г.** Беленов Э.М., Данилычев В.А., Ковш И.Б., Попов Ю.М., Сучков А.Ф.

За разработку физических принципов, создание и исследование газовых лазеров, возбуждаемых с использованием ионизирующего излучения

**1980 г.** Зуев В.С., Катулин В.А., Собельман И.И.

За работы в области фотодиссоционых лазеров

**1981 г.** Николаев Ф.А., Розанов В.Б

За цикл работ «Физика сильноточных излучающих разрядов»

**1981 г.** Грасюк А.З., Ефимков В.Ф.

За работы по новой технике

**1982 г.** Крохин О.Н.

За цикл работ по лазерному излучению и его взаимодействию с веществом

**1983 г.** Зельдович Б.Я., Зубарев И.Г., Носач О.Ю., Рагульский В.В., Файзуллов Ф.С.

За цикл работ «Самообращение волнового фронта света при вынужденном рассеянии на гиперзвуке»

**1983 г.** Михайлов Ю.А., Федотов С.И., Шиканов А.С.

За разработку и применение фотографических материалов для астрономии, спектроскопии и диагностики термоядерной лазерной плазмы

**1983 г.** Никитин В.В.

За создание и внедрение комплекса средств, повышающих на порядок ($10^{-13} \div 10^{-14}$) уровень метрологического обеспечения частотно-временных измерений страны

**1984 г.** Богатов А.П., Елисеев П.Г., Свердлов Б.Н.

За цикл работ «Изопериодические гетероструктуры многокомпонентных (четверных) твердых растворов полупроводниковых соединений $A_3B_5$»

**1984 г.** Насибов А.С.

За разработку и создание новых энергетических устройств

**1985 г.** Васильев А.А., Компанец И.Н., Парфенов А.В.

За фундаментальные исследования фоторефрактивных и жидких кристаллов для оптических систем обработки информации

**1986 г.** Грибков В.А., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А.

За «Комплекс лазерных методов исследования высокотемпературной плазмы на крупномасштабных термоядерных установках»

**1986 г.** Сагитов С.И.

За создание новых материалов

**1989 г.** Басов Н.Г., Беленов Э.М., Пантелеев В.И.

За исследования неравновесной диссоциации и синтеза неорганических молекул в плазме электроионизационного и сверхвысокочастотного разрядов

**1991 г.** Виноградов А.В.

За создание многослойной оптики мягкого и ультрамягкого рентгеновского диапазона длин волн

**Государственная премия СССР** за результаты исследований, выполненных во время работы в других организациях

**1973 г**. Борисевич Н.А.

За исследования рассеяния излучения дисперсными системами и создание нового класса оптических фильтров для широкой области инфракрасного спектра

**1978 г**. Феоктистов Л. П.

За разработку новой техники

**Государственная премия Российской Федерации**

**1997 г.** Катулин В. А.

За создание мощных импульсных йодных лазерных систем "Искра-4" и "Искра-5" с выходной мощностью излучения до 100 ТВт

**1998 г.** Алексеев В.А., Губин М.А.

За создание ультрастабильных по частоте лазеров, средств измерения оптических частот и их применение в прецизионных измерениях

**Премия Правительства Российской Федерации**

**2003 г.** Юрышев Н.Н.

За разработку новой техники

**Премия Президента РФ в области образования**

**2000 г.** Алексеев В. А., Басов Н. Г., Крохин О.Н.

За создание и реализацию проекта «Высшая школа физиков МИФИ – ФИАН»

**2003 г.** Завестовская И.Н. за Учебно-научный центр «Фундаментальная оптика и спекторскопия» - комплекс подготовки кадров высшей квалификации, новых научных и образовательных технологий

**Премия Ленинского комсомола**

**1970 г.** Захаров С.Д., Крюков П.Г., Сенатский Ю.В.

За разработку метода генерации мощных лазерных импульсов и использование их для высокотемпературного нагрева плазмы

**1972 г.** Беленов Э.М., Губин М.А.

За разработку методов получения сверхузких резонансов в оптическом диапазоне волн

**1977 г.** Борович Л.А., Васильев Б.И., Козловский В.И.

За исследования и создание сканирующих полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением для проекционных телевизионных систем

**1979 г.** Виноградов Ан.В., Ковалев В.И.

За цикл работ «Физические основы оптического пробоя стекол»

**1981 г**. Быченков В.Ю. Стародуб А. Н.

За цикл работ «Физические эффекты в плазменных параметрических системах»

**Именные премии**

**Премия им. Д.С. Рождественского** – Сучков А.Ф. (1983 г.)

За цикл работ «Теоретическая и экспериментальная разработка метода внутрирезонаторной лазерной спектроскопии»

**Премия им. Л.И. Мандельштама** – Зуев В.С., Носач О.Ю., Орлов Е.П. (2003 г.)

За цикл работ «Физические процессы в фотодиссоционных лазерах»

**Демидовская премия** – Крохин О.Н. (2005 г.)

За выдающийся вклад в квантовую электронику и открытие полупроводниковых лазеров

**Именные медали**

**Золотая медаль Героя Социалистического Труда** – Басов Н.Г. (1969, 1982)
За большие заслуги в развитии советской науки

**Большая золотая медаль им. М.В. Ломоносова** – Басов Н.Г. (1989 г.)
За выдающиеся достижения в области физики

**Золотая медаль им. Н.Г. Басова** – Крохин (2010 г.), Попов Ю.М. (2015)
За выдающиеся работы в области физики

**Медаль им. А.М. Прохорова** – Компанец И.Н.
За выдающиеся достижения в области инженерных наук

**Почётные звания**

**Заслуженный деятель науки –** Ораевский А.Н. (1999 г.), Попов Ю.М. (1999 г.), Зуев В.С. (2011 г.), Компанец И.Н. (2014 г.)

**Зарубежные награды**

**Золотая медаль** Чехословацкой академии наук – Басов Н.Г. (1975)

**Золотая медаль им. А. Вольты** Итальянского физического общества – Басов Н.Г. (1977)

**Орден Кирилла и Мефодия** I степени (Болгария) – Басов Н.Г. (1981 г.)

**Золотая медаль им. Э. Генкеля** общества «Урания» (ГДР) – Басов Н.Г. (1986 г.)

**Командорский крест** ордена «За заслуги» (Польша) – Басов Н.Г. (1986 г.), Крохин О.Н. (2001 г.)

**Медаль Эдварда Теллера** «За достижения в области энергии термоядерного синтеза» – Басов Н.Г. (1991 г.)

**Зарубежные премии**

**Премия АН СССР и АН ГДР**
Богатов А.П., Елисеев П.Г., Манько М.А., Страхов В.П. (1979)

**Премия АН СССР и Польской АН**
Басов Н.Г., Рупасов А.А., Склизков Г.В., Шиканов А.С., Захаренков Ю.А., Ерохин А.А. (1981 г.)

**Премия Калинги**
Басов Н.Г. (1986)

**Премия имени Н. Холоньяка Оптического общества Америки**
Елисеев П.Г. (2004)

**Премия Общества электроинженеров Великобритании**
Васильев П.П. (1990)

## ЛИТЕРАТУРНЫЕ ИСТОЧНИКИ


1. http://www.lebedev.ru/ru/xviii-vek-nachalo-xx-veka.html
2. http://www.lebedev.ru/ru/xviii-vek-nachalo-xx-veka/posle-oktyabrskoj-revolyutsii-1917-goda.html
3. Геккер И.Р., Стародуб А.Л., Фридман С А. От Физической лаборатории Академии наук в Петрограде до Физического института Академии наук СССР (К истории Физического института имени П.Н. Лебедева АН СССР) / Препринт ФИАН. 1985. № 224.
4. http://www.lebedev.ru/ru/xviii-vek-nachalo-xx-veka/velikaya-otechestvennaya-vojna-i-poslevoennye-gody.html
5. http://www.lebedev.ru/ru/xviii-vek-nachalo-xx-veka/dostizheniya-fian-i-fianovtsev-v-sovetskij-period.html
6. Наталия Лескова. https://www.nkj.ru/open/37412/
7. http://biograph.ru/index.php/whoiswho/1/972-prokhorovam
8. Николай Геннадиевич Басов. Книга-альбом к 95-летию со дня рождения /под ред. А.А. Ионина, авторы-составители: В.М. Березанская, М.А. Лукичёв, Н.М. Шаульская/, Ярославль, ООО «Издательство «РМП», 2017, 200 с.
9. Записки архивариуса / Сост. А.Н. Стародуб. - М.: Издание Архива Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, 1992, т. 1; 1997, т. 2.
10. Басов Н.Г. О применении лазеров для управляемого термоядерного синтеза. Доклад на заседании президиума АН СССР, 1962; Доклад на III Международной конференции по квантовой электронике. Париж, 1963.
11. Как это было... // Воспоминания создателей отечественной лазерной техники, части 1-6 / Ред.-сост. И.Б. Ковш, Лазерная ассоциация. - М.: Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА», 2006-2018.
12. А.М. Прохоров. Квантовая электроника, **24**, № 12, 1061-1962 (1997).
13. Кокурин Ю.Л. Лазерная локация Луны. 40 лет исследований, КЭ, **33**, №1, 45-47 (2003).
14. А.В. Виноградов. Н.Г. Басов во главе Физического института Академии Наук СССР (1973-1988). В кн. Исследования по истории физики и механики 2019 – 20120. Отв. редактор Вл. П. Визгин. Изд.-во Янус-К (234-248).
15. Николай Геннадиевич Басов / Сост. И.Г. Бебих, Н.Я. Гончарова, Л.М. Жукова; Авт. вступ. ст. Ю.М. Попов, В.Б. Розанов, Ф.С. Файзуллов. 2-е изд., доп. - М.: Наука, 1993. - 266 с. - (Материалы к биобиблиографии ученых. Серия физики / Рос. АН; вып. 37).
16. Завестовская И.Н., Крохин О.Н., Сорока И.В., Фроня А.А., Яшин И.И. Высшая школа физиков имени Н. Г. Басова МИФИ – ФИАН: 50 лет успеха.
17. Аполлонов В.В. Гений, живший рядом. Военно-промышленный курьер, выпуск №36 (899) от 21 сентября 2021 г.
18. О.Н. Крохин. Воспоминания о Н.Г. Басове (к 70-летию НИЯУ МИФИ). http://library.mephi.ru/vistavki/basov/memoirs.html

19. Крохин О.Н. Слово о Николае Геннадиевиче Басове // Квантовая электроника, т. 47, № 12, С. 1075−1076 (2017).
20. Указ Президента РФ "О праздновании 100-летия со дня рождения Н.Г. Басова". 18 августа 2022 г., № 562. https:// 3c8174dZyzmdt4astxATiOSLmEjqpIK2.pdf
21. Масалов А.В. Отделение оптики ФИАН: первые работы по созданию лазеров. Успехи физических наук, т. 181, №1, 93-97 (2011).
22. Кривохижа С.В., Масалов А.В., Чижикова З.А. Из истории оптических исследований в Физическом институте им. П.Н. Лебедева. В сб. «ФИАН, 80 лет: люди, работы, достижения», с. 22-37. Москва, ФИАН (2014).
23. Меркульев Ю.А. Миниатюрные критические массы термоядерного горючего и делящихся элементов. Препринт ФИАН №167, 136с., 2011 г
24. Любченко Е., АНИ «ФИАН-информ». Успешное настоящее и великое будущее фемтосекундных лазеров https://fian-inform.ru/priborostroenie/item/183-uspeshnoe-nastoyashchee-i-velikoe-budushchee-femtosekundnykh-lazerov
25. Продукция компании «Авеста»: http://avesta.ru/company/; http://avesta.ru/contacts/
26. Сайт СФ ФИАН http://www.fian.smr.ru/
27. Петров А.Л., Казакевич В.С., Яресько С.И. «Самарский филиал ФИАН: становление, развитие и достижения», с. 92-101. В сб. «ФИАН, 80 лет: люди, работы, достижения». Москва, ФИАН (2014).
28. Майорова А. и Афримович В. «В.А. Катулин и Самарский филиал ФИАН» (в связи с 85-ой годовщиной со дня рождения В.А. Катулина - первого директора СФ ФИАН), Информ. бюллетень Лазерной Ассоциации "Лазер-Информ" (2021).

Игорь Николаевич Компанец

# Н.Г. БАСОВ
# И ИССЛЕДОВАНИЯ
# ПО КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ
# В ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ
# им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА (ФИАН)

Книга посвящена 100-летию со дня рождения и деятельности гениального советского и российского учёного, лауреата Нобелевской премии в области физики академика Николая Геннадиевича Басова, а также 60-летней деятельности Лаборатории (затем Отделения) квантовой радиофизики, основанной им в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) в Москве. Выполненные здесь исследования по квантовой радиофизике привели к созданию мазеров и лазеров и открыли новую – «лазерную» эру, причём не только в развитии науки и техники, но и в повседневной жизни людей. Исследования, проводимые теперь учениками Н.Г. Басова и их учениками, продолжают активно обогащать науку новыми идеями и практическими результатами.

ISBN 978-5-6048205-5-1

И.Н. Компанец

# Н.Г. БАСОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ В ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА (ФИАН)