

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Сагитова Адиля Маратовна

**Генерация излучения в спектральном диапазоне 1.7–19.3 мкм
при преобразовании частоты излучения СО- и СО₂-лазеров
в нелинейных кристаллах**

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель: **Климачев Юрий Михайлович**,
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Потёмкин Фёдор Викторович**,
доктор физико-математических наук, доцент
физического факультета ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет им. М. В. Ломоносова»,
руководитель группы нелинейной оптики и
сверхсильных световых полей

Бойко Андрей Александрович,
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник Лаборатории квантовых
оптических технологий – 2.4 ФГБУН «Институт
лазерной физики Сибирского Отделения
Российской Академии Наук» (ИЛФ СО РАН)

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный
центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований»

Защита состоится 14 октября 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного
совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский
проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте
института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.262.01,
доктор физ.-мат. наук

Золотко Александр Степанович

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

Средний инфракрасный (ИК) диапазон длин волн 2–20 мкм, известный как область молекулярных «отпечатков пальцев» (molecular-fingerprint mid-infrared region [1]), представляет большой интерес для многих важных приложений: исследования сверхбыстрых явлений [2], спектроскопии с помощью оптических частотных гребёнок [3], генерации высоких гармоник [4], зондирования атмосферы [5] и многих других. Это обуславливает активное развитие широкополосных источников среднего ИК-излучения в настоящее время.

Значительный прогресс был достигнут в разработке различных типов твердотельных лазеров среднего ИК-диапазона [6, С. 225]. Однако разнообразие лазеров, работающих в среднем ИК-диапазоне на длинах волн от 5 до 12 мкм, значительно меньше. В этой спектральной области были разработаны квантово-каскадные лазеры [7, 8], которые уже коммерчески доступны (например, продукты Hamamatsu Photonics, Thorlabs), но при этом имеют довольно низкую выходную мощность. Также был разработан ряд лазерных устройств на основе параметрических генераторов света, совмещенных с генерацией разностной частоты (ГРЧ) в дополнительном кристалле [6, С. 495]. Тем не менее, пока ещё ощущается недостаток лазеров, генерирующих в длинноволновой области (длины волн от ~12 до 20 мкм) среднего ИК-диапазона. В данном диапазоне работает несколько квантово-каскадных лазеров: на базе гетероструктуры на основе Sb или системы InGaAs/AlInAs [9]. Однако их длинноволновая генерация ограничена фоновыми полосами поглощения материалов.

Одним из способов получения широкополосного излучения среднего ИК-диапазона является преобразование частоты лазерного излучения в кристаллах с квадратичной нелинейностью [10] или в нелинейных волокнах [11]. Для эффективного преобразования лазерного излучения в нелинейных кристаллах требуется высокая мощность излучения накачки. Большое число линий накачки

позволяет получить еще большее число линий преобразованного излучения за счет не только удвоения, но и суммирования частот линий накачки. Кроме этого, совместное использование как излучения накачки, так и преобразованного излучения может значительно расширить возможности зондирования с помощью такого широкополосного лазерного источника. Дистанционная многокомпонентная спектроскопия атмосферы требует широкополосного излучения среднего ИК-диапазона со спектральными линиями высокой яркости. Набор близких линий с общей спектральной шириной $\approx 0.01 \text{ см}^{-1}$ [12, С. 248] достаточно хорош для регистрации профиля линий поглощения тропосферных газов и оценки метеорологических параметров атмосферы. Для генерации такого широкополосного излучения можно использовать молекулярные газовые лазеры, которые имеют ряд преимуществ: узкую ширину линии, высокую мощность, множество спектральных линий в среднем ИК-диапазоне.

Примерами таких лазеров являются лазеры на углекислом газе (CO_2) и на окиси углерода (CO). CO -лазер может работать на сотнях узких спектральных линий как основной полосы генерации от 4.7 мкм [13] до 8.7 мкм [14] с КПД до 50% [15], так и оберточной ($\lambda = 2.5\text{--}4.2$ мкм) [16] с КПД до 16% [17]. CO_2 -лазер может работать на десятках узких линий в спектральном интервале от 9 до 11 мкм [18].

Атмосфера имеет высокое пропускание в спектральном диапазоне генерации суммарных частот (ГСЧ) излучения CO -лазера (2.5–4.0 мкм) и содержит уникальные полосы поглощения множества различных веществ, поэтому данный диапазон очень привлекателен для зондирования атмосферы. Более того, совместное использование излучения спектрального диапазона 2.5–4.0 мкм с лазерным излучением основной колебательной полосы CO -лазера (5–8 мкм) может значительно расширить возможности зондирования такого лазерного источника. Поэтому представляет интерес получать как излучения основной полосы CO -лазера, так и излучения генерации суммарных частот.

Стоит иметь в виду, что при преобразовании большого числа линий CO -лазера с модуляцией добротности резонатора (МДР) временное перекрытие

импульсов генерации отдельных линий друг относительно друга может отличаться. Данный факт может повлиять на характеристики преобразования частоты излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах. Ранее спектрально-временные характеристики подобного лазера были исследованы как экспериментально, так и теоретически в работах [19, 20]. Хотя в указанных публикациях было показано, что длительности генерации на отдельных колебательно-вращательных линиях очень сильно отличаются, однако приведенные в этих работах экспериментальные результаты достаточно ограничены. Динамика на большом числе линий СО-лазера с МДР и преобразование частоты большого числа линий не измерялись.

В настоящее время разрабатываются компактные и надежные СО- и СО₂-лазеры (см. например, [21–23]) с ВЧ-накачкой, в том числе коммерческие [23]. Поэтому разработка систем, основанных на щелевых ВЧ-разрядных СО- и СО₂-лазерах с преобразованием частоты в нелинейных кристаллах, является очень привлекательным способом получения широкополосного излучения в среднем ИК-диапазоне.

Цель и задачи работы

Цель данной работы – формирование лазерного излучения с большим числом линий в широком интервале длин волн среднего ИК-диапазона (~2–20 мкм) за счёт генерации суммарных и разностных частот излучения многолинейчатых СО- и СО₂-лазеров в нелинейных кристаллах, включая новые нелинейные кристаллы ВаGa₂GeSe₆ и PbIn₆Te₁₀.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать динамику генерации колебательно-вращательных линий многочастотного СО-лазера с МДР;
2. Экспериментально исследовать структуру спектра генерации суммарных частот излучения многочастотного СО-лазера в кристалле ZnGeP₂;

3. Экспериментально исследовать внутрирезонаторную генерацию суммарных частот излучения щелевого СО-лазера с модуляцией добротности резонатора в нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$;
4. Экспериментально исследовать широкополосное преобразование щелевого СО-лазера в нелинейных кристаллах $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ в область 1.7–1.9 мкм;
5. Экспериментально исследовать генерацию разностных частот излучения щелевых СО- и CO_2 -лазеров в нелинейных кристаллах AgGaSe_2 , $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ и $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ в область 12–20 мкм.

Научная новизна

1. Экспериментально исследована динамика генерации излучения на большом количестве (~ 100) колебательно-вращательных переходов СО-лазера с модуляцией добротности резонатора в диапазоне длин волн 4.9–6.5 мкм.
2. Проведен численный расчёт спектра излучения суммарных частот СО-лазера, сформированного в кристалле ZnGeP_2 , с учетом динамики генерации на каждом колебательно-вращательном переходе.
3. Экспериментально показано наличие тонкой структуры спектра суммарных частот многолинейчатого СО-лазера и продемонстрирована возможность измерения с его помощью профиля линии поглощения молекул CO_2 .
4. С новым нелинейным кристаллом $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ реализовано широкополосное преобразование излучения СО-лазера (в том числе внутрирезонаторное) и преобразование частот излучения СО- и CO_2 -лазеров в диапазон длин волн 1.7–14.0 мкм.
5. Экспериментально получена широкополосная генерация излучения на разностных частотах СО- и CO_2 -лазеров в новом нелинейном кристалле $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ в диапазоне длин волн от 12 до 19.3 мкм.

Научная и практическая значимость

1. Широкополосные лазерные системы на основе конверсии частоты излучения СО-лазеров и смешения частот СО- и CO_2 -лазеров в нелинейных кристаллах,

действующие в интервале длин волн $\sim 2\text{--}20$ мкм, могут быть применены для многокомпонентного газоанализа атмосферы и её загрязняющих компонент.

2. Тонкая структура спектра генерации суммарных частот СО-лазера в условиях некритичного фазового синхронизма, даёт возможность измерить профиль линии поглощения атмосферных газов.
3. Экспериментальные данные по условиям, обеспечивающим преобразование частот излучения СО-лазера ($\sim 5\text{--}6$ мкм) в новых нелинейных кристаллах $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ и $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$, могут быть использованы для других типов лазеров, действующих в этом же спектральном диапазоне.
4. Лазерный источник на базе СО- и СО₂-лазеров и нелинейных кристаллов может использоваться для детектирования меркаптановой одоризационной смеси природного газа в реальном масштабе времени. Данная задача решается путем одновременного или циклического во времени измерения поглощения излучения анализируемой газовой смеси на четырех волнах, каждая из которых должны быть в одном из диапазонов длин волн: 7.6–7.8 мкм, 9.0–9.2 мкм, 10.3–10.5 мкм, 15.6–15.8 мкм [24]. Появляется возможность использования лазерной системы на базе двух лазеров (СО- и СО₂-лазеров) и нелинейного кристалла (для генерации разностных частот СО- и СО₂-лазеров), а не четырёх отдельных лазерных источников.

Положения, выносимые на защиту

1. Динамика импульсов генерации на колебательно-вращательных переходах многолинейчатого СО-лазера с МДР не оказывает существенного влияния на интегральную по спектру пиковую мощность и число линий излучения на суммарных частотах при конверсии частоты излучения этого лазера в нелинейном кристалле ZnGeP_2 .
2. Спектр суммарных частот излучения многолинейчатого СО-лазера с МДР, генерируемого в нелинейном кристалле ZnGeP_2 в условиях некритичного фазового синхронизма, представляет собой широкий (~ 1000 см⁻¹) набор

частот, состоящий из групп линий со спектральным расстоянием между группами $\sim 5 \text{ см}^{-1}$.

3. За счёт соблюдения условий не критичного фазового синхронизма в диапазоне длин волн генерации СО-лазера ($\sim 4.9\text{--}5.9 \text{ мкм}$) реализуется широкополосное внутриврезонаторное преобразование его спектра излучения в нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ в диапазон длин волн $2.45\text{--}2.95 \text{ мкм}$. Суммирование частот излучения обоих диапазонов во втором врезонаторном нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ приводит к генерации многолинейчатого излучения в интервале длин волн $1.7\text{--}1.9 \text{ мкм}$.
4. Генерация разностных частот излучения импульсно-периодических СО- и CO_2 -лазеров с накачкой высокочастотным электрическим разрядом в нелинейном кристалле $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ обеспечивает расширение спектра излучения такой многолинейчатой лазерной системы до 19.3 мкм .

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждена хорошим согласием экспериментальных результатов с результатами теоретических расчётов и моделирования, а также с результатами теоретических и экспериментальных работ других авторов. В экспериментах использовались высокоточные откалиброванные измерительные и регистрирующие приборы, что обеспечило достоверность энергетических, временных и спектральных измерений.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были опубликованы в 5 научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science [1*–5*] и 6 материалах конференций [6*–11*], а также были доложены на 16 всероссийских и международных конференциях:

- III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017», 24–27 января 2017, Москва, Россия;

- XI Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 25–28 апреля 2017, Саров, Россия;
- VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 17–21 апреля 2017, Москва, Россия;
- IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2018», 30 января – 01 февраля 2018, Москва, Россия;
- VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 16–21 апреля 2018, Москва, Россия;
- XXIX Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине», 16–18 мая 2018, Москва, Россия;
- 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), 04–08 June 2018, Saint Petersburg, Russia
- XXII International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, 9–12 October 2018, Frascati, Italy
- XIII Международная конференция «Прикладная оптика-2018», 18–21 декабря 2018, Санкт-Петербург, Россия;
- VIII Международная конференция «Фотоника и информационная оптика», 23–25 января 2019, Москва, Россия;
- SPIE Security + Defence (High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects III), 9–12 September 2019, Strasbourg, France;
- XII Международная конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение», 16–18 декабря 2020, Москва, Россия;
- X Международная конференция «Фотоника и информационная оптика», 27–29 января 2021, Москва, Россия;
- VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2021», 23–26 марта 2021, Москва, Россия;

- VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022», 22–25 марта 2022, Москва, Россия;
- XXVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Орион), 25–27 мая 2022, Москва, Россия.

Отдельные результаты, представленные в диссертационной работе и объединенные в цикл работ под названием «Широкополосное преобразование частоты излучения лазера на окиси углерода в новом нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ », были удостоены Премии им. Н. Г. Басова молодежного конкурса научных работ ФИАН в 2019 г. в составе научного коллектива: И. О. Киняевский и А. М. Сагитова. Также по представленным в диссертации отдельным результатам была присуждена поощрительная премия на молодежном конкурсе научных работ ФИАН/МИФИ по оптике и лазерной физике за работу «Структура спектра широкополосного излучения суммарных частот лазера на окиси углерода, полученного в кристалле ZnGeP_2 » в 2017 году.

Личный вклад

Все расчетные и экспериментальные результаты, которые изложены в данной работе, получены лично автором или при непосредственном участии автора. Экспериментальные исследования проводились на лазерных установках в лаборатории Газовых лазеров Отделения квантовой радиофизики (ОКРФ) им. Н. Г. Басова Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН, г. Москва).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 115 страниц, включая 56 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 98 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, необходимые для достижения поставленной цели, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

Глава 1 представляет собой подробный литературный обзор, посвященный преобразованию излучения СО- и СО₂-лазеров в нелинейных кристаллах. В данной главе приведены краткие сведения о работе СО- и СО₂-лазеров. СО-лазер сочетает в себе следующие преимущества: большое количество линий, малая спектральная ширина отдельной линии и высокая стабильность частоты излучения.

На момент начала выполнения диссертационной работы в научной литературе были отмечены следующие полученные результаты, подводящие к задачам работы, выполнение которых необходимо для достижения поставленной цели.

1. Реализована генерация суммарных частот СО-лазера в кристаллах ZnGeP₂, AgGaSe₂, GaSe, и PbIn₆Te₁₀ с внутренними коэффициентами преобразования 8.2%, 1%, 0.3% и 0.01%, соответственно. Наибольшее число экспериментальных работ по преобразованию частоты излучения СО-лазера проведено с использованием кристалла ZnGeP₂. Данный кристалл имеет высокие механические свойства и лучевую стойкость, а также высокую внутреннюю эффективность преобразования.
2. Для кристаллов ZnGeP₂, AgGaSe₂, GaSe возможен некритичный фазовый синхронизм в диапазоне длин волн излучения СО-лазера и осуществление широкополосного двухкаскадного преобразования частоты СО-лазера. Данное преобразование было реализовано экспериментально в кристаллах ZnGeP₂ и AgGaSe₂. Наивысший коэффициент преобразования и наиболее

широкий спектр при двухкаскадном преобразовании частот был получен в кристалле $ZnGeP_2$.

3. Проведены первые эксперименты по преобразованию излучения СО-лазера в новом нелинейном кристалле $BaGa_2GeSe_6$, в которых было показано, что у кристалла $BaGa_2GeSe_6$ высокий оптический порог разрушения ($\sim 110 \text{ МВт/см}^2$), что делает данный кристалл интересным для внутрирезонаторного преобразования.
4. Создан многочастотный CO_2 -лазер с МДР. Использование данного лазера совместно с СО-лазером для смешения их излучения в нелинейном кристалле и генерации разностных частот может позволить охватить спектральный диапазон до $\sim 16 \text{ мкм}$.
5. Созданы компактные СО- и CO_2 -лазерные установки с ВЧ-накачкой, работающие в импульсно-периодическом режиме.

В **Главе 2** приводится описание используемых в работе экспериментальных установок. В экспериментах по исследованию динамики генерации излучения СО-лазера и исследованию структуры спектра генерации суммарных частот излучения многочастотного СО-лазера в кристалле $ZnGeP_2$ использовался криогенный СО-лазер низкого давления с накачкой разрядом постоянного тока, конструкция которого подробно описана в [25]. В экспериментах по двухкаскадной внутри- и внерезонаторной генерации суммарных частот излучения СО-лазера в новом нелинейном кристалле $BaGa_2GeSe_6$ и преобразованию излучения СО- и CO_2 -лазеров в диапазон длин волн $12\text{--}19.3 \text{ мкм}$ использовался компактный криогенный щелевой СО-лазер с накачкой ВЧ-разрядом, устройство которого подробно описано в [26]. В экспериментах по преобразованию излучения СО- и CO_2 -лазеров в диапазон длин волн $12\text{--}19.3 \text{ мкм}$ совместно с СО-лазером использовался компактный щелевой CO_2 -лазер с накачкой ёмкостным ВЧ-разрядом, устройство которого сходно с [26].

В **Главе 3** приведены результаты экспериментального исследования динамики генерации колебательно-вращательных линий многочастотного СО-лазера с модуляцией добротности резонатора, а также численное моделирование

спектра генерации суммарных частот с учетом динамики генерации линий СО-лазера.

Эксперименты проводились с использованием криогенного СО-лазера низкого давления с накачкой разрядом постоянного тока. Спектр СО-лазера при частоте модуляции добротности 70 Гц насчитывал 113 линий в диапазоне длин волн от 4.89 до 6.54 мкм, а при 120 Гц – 99 линий в диапазоне длин волн от 4.90 до 6.44 мкм. В обоих случаях наиболее сильные линии наблюдались в диапазоне длин волн от 4.8 до 5.3 мкм. Максимальная пиковая мощность приходилась на переход $8 - 7 P(9)$. В каждой из колебательных полос наиболее сильными были вращательные компоненты с $J = 9 - 12$. Пиковая мощность полного импульса СО-лазера составила ~ 3.0 и 2.3 кВт для МДР 70 и 120 Гц, соответственно. Средняя мощность достигала ~ 111 и 106 мВт, соответственно.

На рисунке 1 представлена динамика генерации полного импульса и отдельных вращательных компонент колебательной полосы $5 \rightarrow 4$.

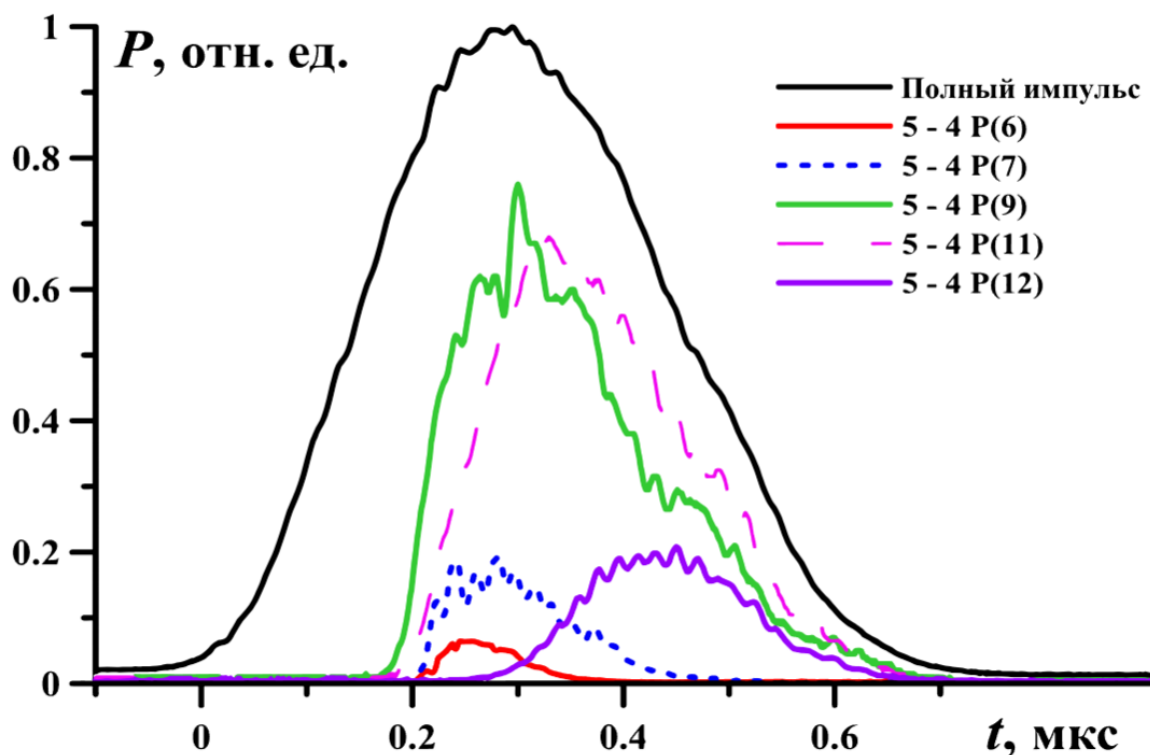


Рисунок 1 — Динамика генерации полного импульса и отдельных вращательных компонент колебательной полосы 5–4

Из рисунка 1 видно, что наиболее сильные линии, например, $P(11)$ и $P(12)$ перекрываются по времени полностью. То есть они будут взаимодействовать в нелинейном кристалле при суммировании частот наиболее эффективно. Есть линии, например, $P(7)$ и $P(12)$, которые перекрываются по времени только частично. Они дадут вклад в эффективность суммирования частот существенно меньший. Но есть и такие линии, например, $P(6)$ и $P(12)$, которые по времени практически не перекрываются, то есть не дадут суммарной частоты в принципе.

При проведении численного моделирования ГСЧ в ZnGeP_2 была использована теоретическая модель (см. [27]), основанная на приближении плоской волны и малой эффективности преобразования, где мощность излучения генерации суммарных частот $P_{\text{ГСЧ}}$ может быть рассчитана из формулы [28, С. 50]:

$$P_3 = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2 P_1 P_2}{\varepsilon_0 c n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 A} \text{sinc}^2 \left(\frac{|\Delta k| L_{\text{eff}}}{2} \right), \quad (1)$$

где d_{eff} — эффективный нелинейный коэффициент; n_1 , n_2 , n_3 — показатели преломления нелинейного кристалла на длинах волн; λ_3 — длина волны ГСЧ; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; P_1 и P_2 — мощность излучения лазера накачки для двух линий СО-лазера; P_3 — мощность суммарной частоты; Δk — волновая расстройка; L_{eff} — эффективная длина кристалла; A представляет собой поперечное сечение лазерного луча; c — скорость света в вакууме.

При этом для правильного моделирования ГСЧ необходимо учитывать временные характеристики многочастотного СО-лазера с МДР. Для этого мощность ГСЧ ($P_{\text{ГСЧ}}$) рассматривалась как амплитуда произведения импульсов на двух длинах волн λ_1 и λ_2 :

$$P_{\text{ГСЧ}} \sim \max(P_1 \cdot P_2). \quad (2)$$

Моделирование проводилось для угла синхронизма 47.4° и длины кристалла 7 мм. Результаты моделирования с учетом (красные столбцы) и без учёта (синие столбцы) временного поведения импульсов линий генерации многочастотного СО-лазера с МДР представлены на рисунке 2.

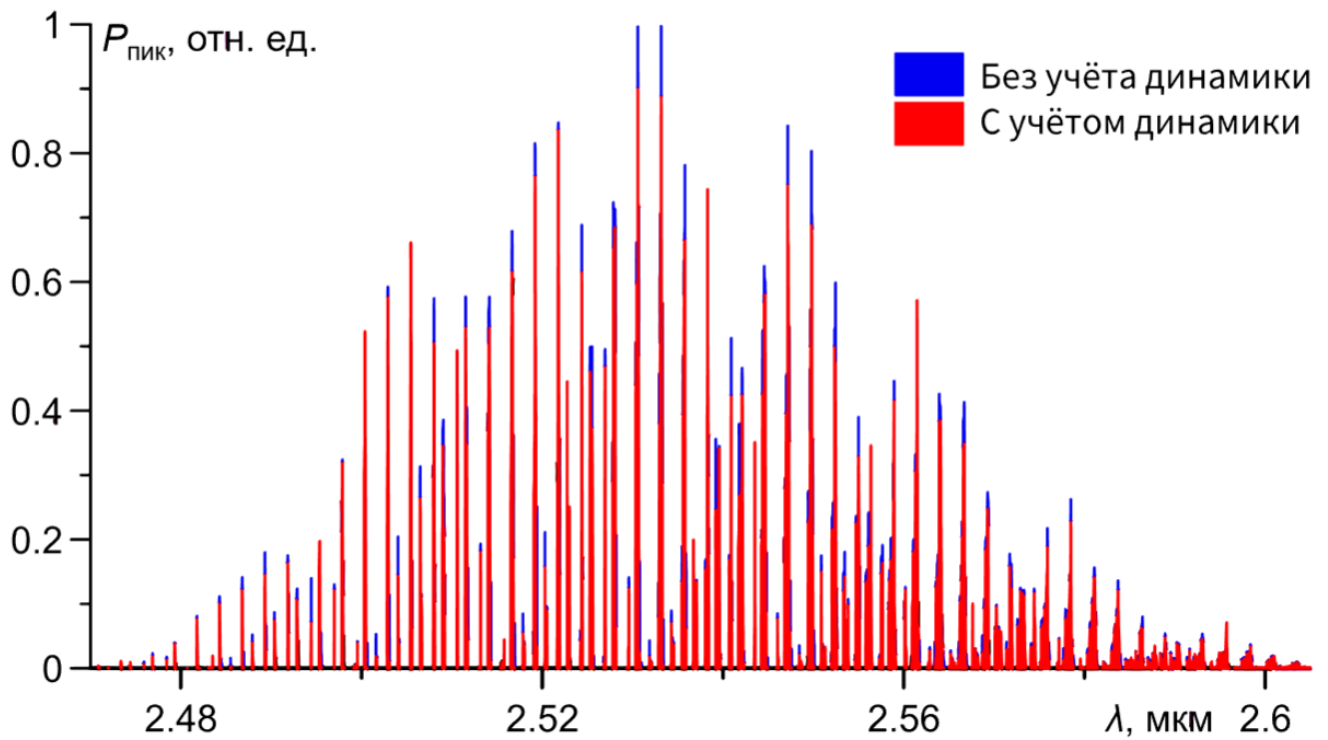


Рисунок 2 — Моделирование мощности линий ГСЧ с учетом и без учета спектрально-временной структуры излучения многочастотного СО-лазера с МДР

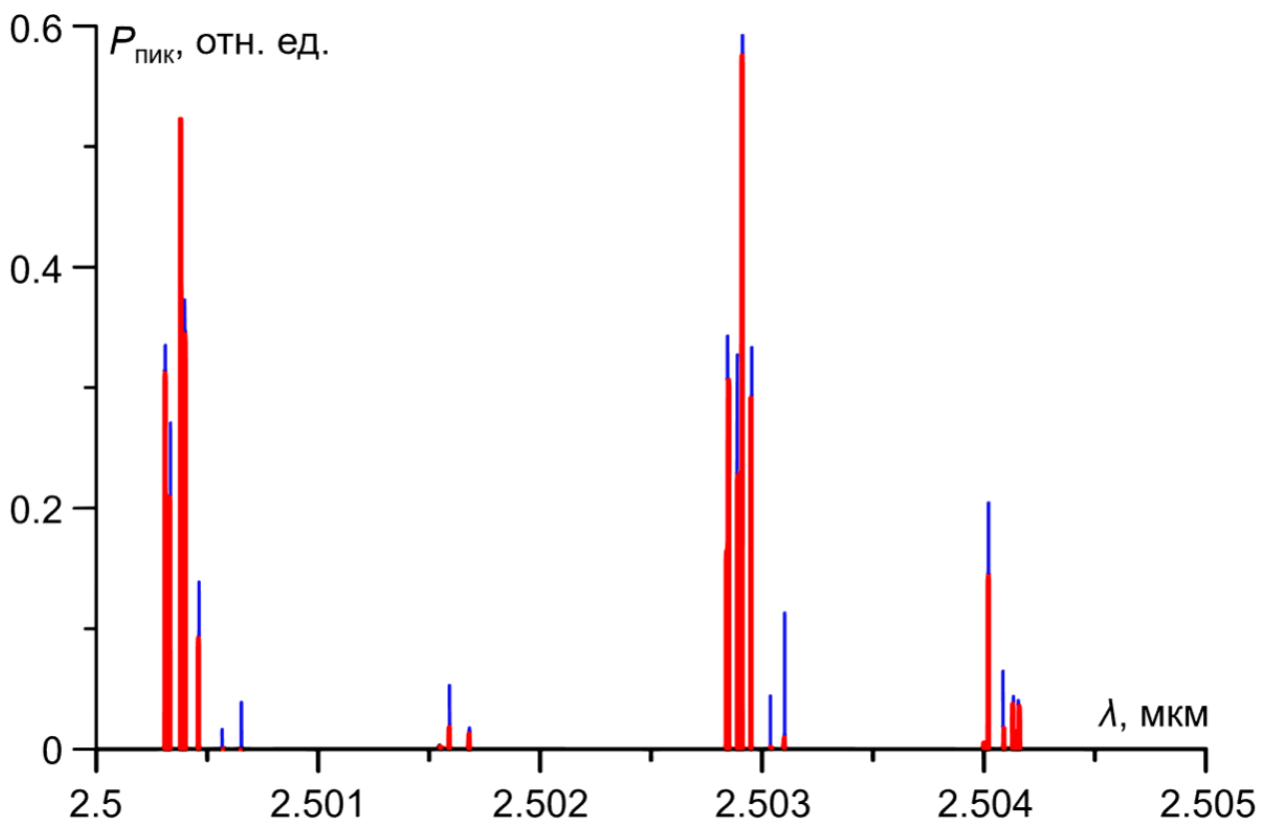


Рисунок 3 — Часть спектра ГСЧ в области длины волны 2.5025 мкм

На рисунке 3 видно, что ослабление наиболее мощных спектральных линий было небольшим. Значительное падение мощности линий ГСЧ наблюдалось для слабых линий ГСЧ. Этот факт можно объяснить тем, что слабые линии СО-лазера при генерации были значительно сильнее разделены по времени, в то время как мощные линии СО-лазера генерировались одновременно.

В **Главе 4** приведены результаты экспериментального исследования структуры спектра генерации суммарных частот излучения многочастотного СО-лазера в кристалле $ZnGeP_2$ и измерения профиля линии поглощения молекул CO_2 с помощью суммарных частот СО-лазера.

В эксперименте использовался криогенный СО-лазер низкого давления с накачкой разрядом постоянного тока. СО-лазер с МДР работал с частотой следования импульсов 80 Гц. Пиковая мощность импульсов достигала 3 кВт, при этом длительность импульсов была 0.6 мкс на полувысоте. Спектр излучения состоял из 113 зарегистрированных спектральных линий в диапазоне длин волн от 4.9 до 6.5 мкм. Каждая линия лазера работала на одной продольной моде, ширина линии генерации каждого колебательно-вращательного перехода составляла несколько мегагерц.

Спектры суммарных частот и СО-лазера измерялись импульс за импульсом путем вращения дифракционной решетки монохроматора. В первой серии экспериментов был получен спектр, насчитывавший 97 линий. Для более аккуратной прописи спектра были произведены следующие модификации. Спектральное разрешение было увеличено за счет использования дифракционной решетки с числом штрихов $d = 300$ штр/мм по сравнению с ранее использовавшейся решеткой с $d = 150$ штр/мм, а также за счет оптимизации оптической схемы, в результате которой была использована вся площадь дифракционной решетки 100×100 мм. Сбор данных был улучшен за счет уменьшения скорости сканирования. Эти модификации улучшили спектральное разрешение до ~ 0.1 см⁻¹ (~ 0.05 нм). Более аккуратная пропись спектра позволила наблюдать его тонкую структуру с общим числом линий уже 587.

Спектр широкополосной генерации суммарной частоты многолинейного СО-лазера с МДР состоит из групп близко расположенных узких спектральных линий. Иными словами, такой лазерный источник дает спектр, напоминающий широкополосный оптический частотный набор среднего ИК-диапазона, имеющую сложную подструктуру из близко расположенных узких линий (см. рисунок 4). Оптический частотный набор может быть расширен на $\sim 10^3$ см^{-1} в интервале длин волн от ~ 2.5 до ~ 4 мкм, в которой среднее расстояние между группами («грубая» шкала частот) составляет ~ 5 см^{-1} . Эта «грубая» шкала частот может применяться для анализа многокомпонентных газов методом дифференциального поглощения.

Ширина групп около 1 см^{-1} , и они состоят примерно из десятка узких ($\sim 10^{-4}$ см^{-1}) линий, что можно рассматривать как «тонкую» частотную шкалу. Расстояние между спектральными компонентами внутри таких групп варьируется от 10^{-3} до 10^{-1} см^{-1} . Поэтому «тонкая» шкала частот очень привлекательна для измерения профиля линии поглощения атмосферных газов.

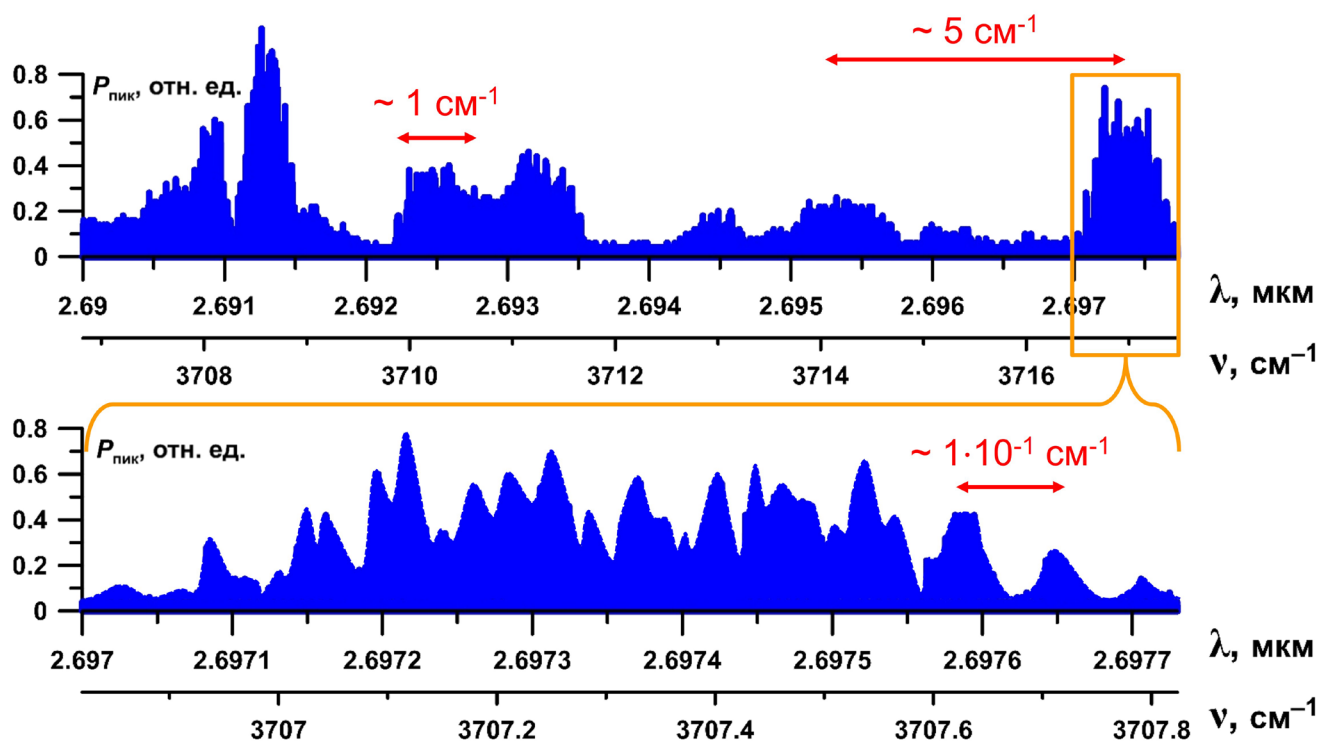


Рисунок 4 — Структура спектра широкополосного излучения ГСЧ

В **Главе 5** приведены результаты экспериментального исследования внутрирезонаторного преобразования излучения многочастотного щелевого СО-лазера с накачкой ВЧ-разрядом и модуляцией добротности резонатора и

двухкаскадной генерации суммарных частот (ДГСЧ) СО-лазера в нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$.

В данной серии экспериментов источником лазерного излучения служил СО-лазер с накачкой импульсно-периодическим ВЧ-разрядом при криогенном охлаждении электродов. Импульсно-периодический режим работы лазера достигался за счёт МДР с помощью вращающегося зеркала, частота вращения которого составляла ~ 100 Гц.

Работа проводилась для трех конфигураций резонатора с выходными зеркалами: $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$, пластины из Ge и пластины из GaAs с диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения $\sim 90\%$ для излучения основной полосы и $\sim 50\%$ для излучения суммарных частот. Полученные средние мощности излучения СО-лазера на выходе и внутри резонатора, ГСЧ и эффективность преобразования излучения для различных конфигураций резонатора представлены в таблице 1. Увеличение мощности СО-лазера внутри резонатора почти в 2 раза позволило увеличить мощность ГСЧ в ~ 4 раза.

Таблица 1 — Полученные значения средней мощности излучения СО-лазера на выходе и внутри резонатора, ГСЧ и эффективность преобразования излучения для различных конфигураций резонатора

Выходное зеркало	$\langle P_{\text{CO}} \rangle$, мВт	$\langle P_{\text{CO}}^{\text{in}} \rangle$, мВт	$\langle P_{\text{ГСЧ}} \rangle$, мВт	K , %
Кристалл $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ ($T \sim 70\%$)	166	243	0.17	0.1
Пластина из германия Ge ($T \sim 50\%$)	111	348	0.47	0.3
Зеркало с диэлектрическим покрытием ($T \sim 10\%$)	31	446	0.8	0.4

Второй каскад ГСЧ осуществлялся внерезонаторно во втором кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ путем генерации суммарной частоты основного излучения СО-лазера и его суммарных частот, полученных внутррезонаторно в первом образце кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$. Для второго каскада ГСЧ важно, чтобы произведение мощностей основной полосы СО-лазера (P_{CO}) и ГСЧ ($P_{\text{ГСЧ}}$) было максимальным,

так как мощность второго каскада ГСЧ пропорциональна этому произведению. Поэтому для ДГСЧ использовалась конфигурация резонатора с пластиной из Ge.

В отличие от работы по внутрирезонаторной ГСЧ излучения СО-лазера в нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$, в работе по ДГСЧ излучения СО-лазера использовался оптимизированный состав активной среды $\text{CO} : \text{Воздух} : \text{He} = 1 : 1.5 : 8.8$ при общем давлении 30 Торр, предложенный в [29], диафрагма с круглым отверстием диаметра 5 мм была заменена на щелевую с шириной щели 4 мм. Данная оптимизация лазера привела к уменьшению длительности импульса в два раза, однако при этом удалось увеличить пиковую мощность с ~ 2 кВт до 4.7 кВт в основной полосе, средняя мощность увеличилась с 111 мВт до 285 мВт.

Излучение лазерной системы фокусировалось линзой CaF_2 с фокусным расстоянием 12 см во второй образец кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$, расположенный вне резонатора. Имелась возможность изменять углы фазового синхронизма поворотом кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ по углу φ (в плоскости Z) и по углу θ (в плоскости 110). Максимальная мощность ДГСЧ достигается при выходном зеркале – пластине из Ge, средняя и пиковая мощность достигают 35 мкВт и 0.5 Вт соответственно. Эффективность преобразования составляет около 0.013%. Средняя мощность излучения СО-лазера была 285 мВт, а средняя мощность излучения ГСЧ, полученная внутрирезонаторно, – 1.5 мВт.

Спектральные характеристики основного излучения СО-лазера, ГСЧ и ДГСЧ представлены на рисунке 5.

Спектр основной полосы СО-лазера состоял из 77 линий в диапазоне длин волн 4.9–6.0 мкм. Было зарегистрировано около 80 линий в диапазоне длин волн от 2.50 до 2.95 мкм излучения ГСЧ. Значения мощностей отдельных линий на данном рисунке откалиброваны на значения пиковых мощностей, суммарных по спектру, рассчитанных исходя из результатов измерения формы импульса и средней мощности излучения ГСЧ и основной полосы.

Спектры ДГСЧ, измеренные при различных углах фазового синхронизма, представлены на рисунке 5 (в). Спектральная ширина ДГСЧ составляла около 50 нм с положением максимума, зависящим от угла фазового синхронизма θ . ДГСЧ

наблюдалась в диапазоне длин волн от 1.7 до 1.9 мкм в виде набора очень близко расположенных узких линий (они не были разрешены в эксперименте), который можно рассматривать как непрерывный спектр.

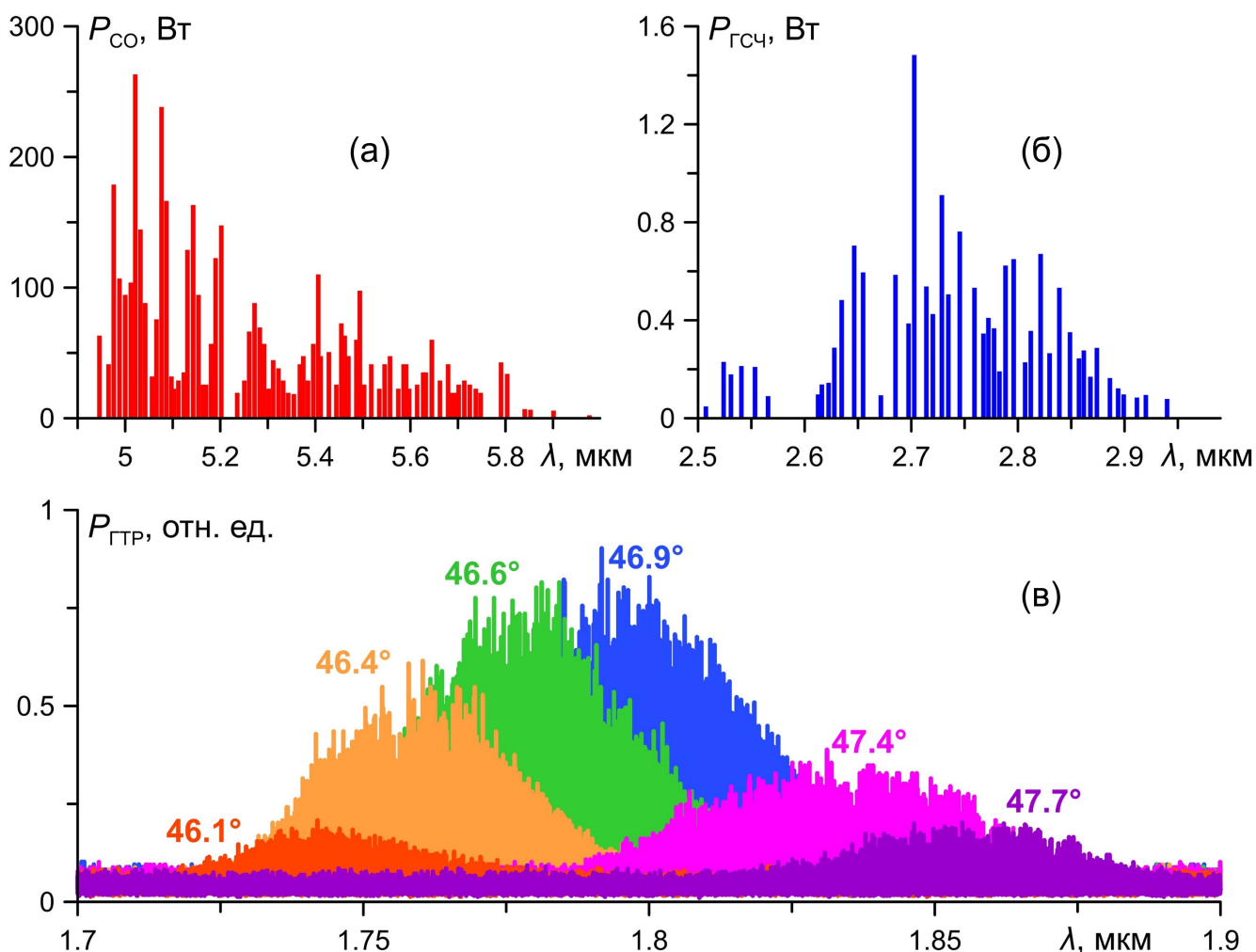


Рисунок 5 — Спектры основной полосы СО-лазера (а), ГСЧ (б), ДГСЧ при различных углах фазового синхронизма (в)

В Главе 6 приведены результаты экспериментального исследования генерации разностных частот излучения щелевых СО- и СО₂-лазеров в нелинейных кристаллах AgGaSe₂, BaGa₂GeSe₆ и PbIn₆Te₁₀ в диапазоне длин волн 12–20 мкм.

СО- и СО₂-лазеры работали в режиме МДР с частотой следования импульсов 100 Гц, обеспечиваемым одним общим вращающимся зеркалом. Длительности импульсов генерации на полувисоте составили ~ 0.25 мкс для СО₂-лазера и 0.75 мкс для СО-лазера. Для генерации разностных частот не требовалось коротковолновое излучение СО-лазера, поэтому излучение СО-лазера спектрально модифицировали оптическим фильтром. Падающая на кристалл суммарная

пиковая мощность CO₂-лазера достигала 0.3 кВт, суммарная пиковая мощность СО-лазера составляла ~ 0.5 кВт.

В первых экспериментах измерялась мощность ГРЧ, интегрированная по его спектру. Зависимости пиковой мощности ГРЧ от углов фазового синхронизма для рассматриваемых кристаллов представлены на рисунке 6.

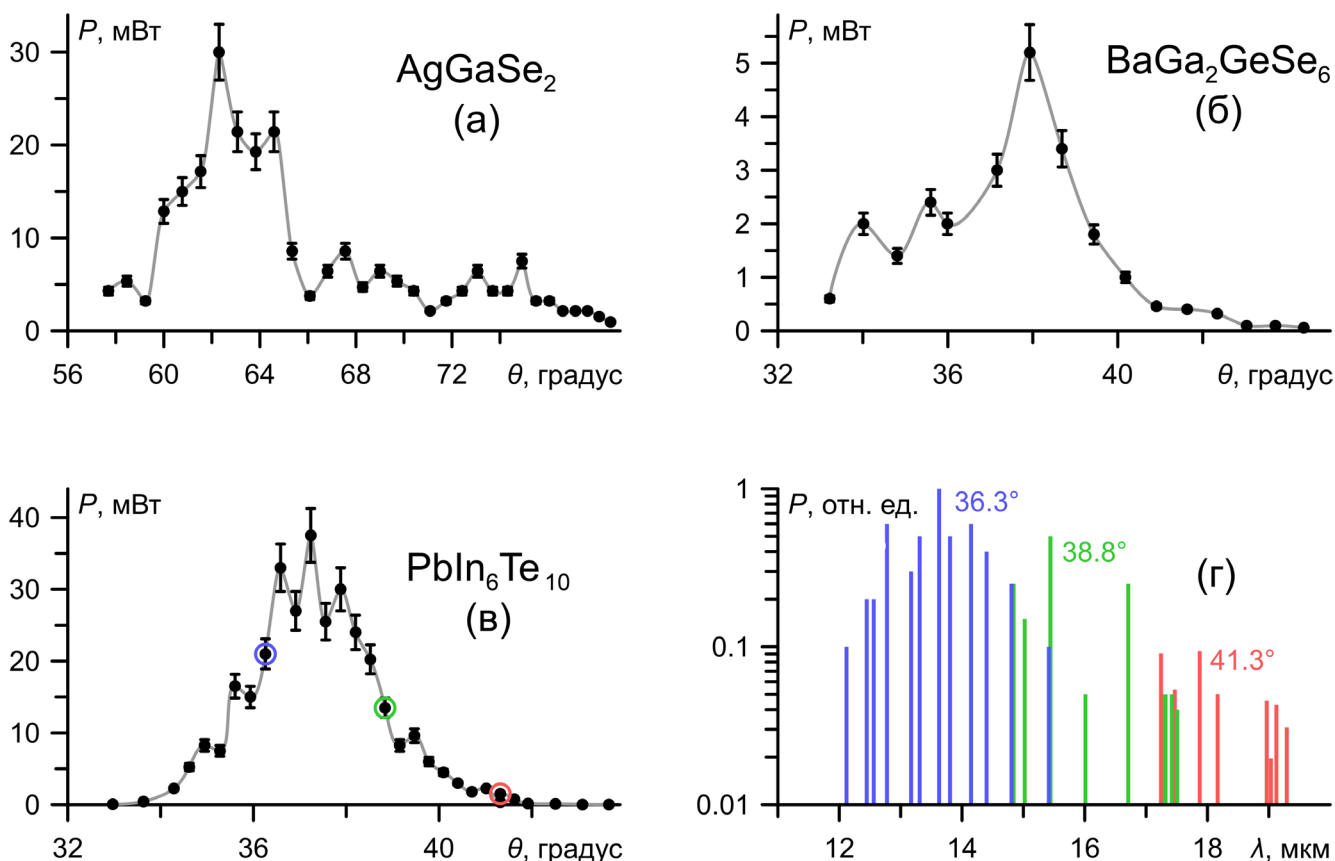


Рисунок 6 — Зависимость пиковой мощности излучения ГРЧ от угла фазового синхронизма для кристаллов AgGaSe_2 (а), $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (б) и $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ (в); спектр ГРЧ, измеренный при углах фазового синхронизма 36.3° , 38.8° и 41.3° кристалла $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ (г)

Зависимости имеют несколько всплесков из-за дискретной структуры спектра излучения накачки. Наибольшая пиковая мощность ГРЧ была получена для кристалла $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ и достигала 37 ± 4 мВт, что соответствовало эффективности внутреннего преобразования (с учетом френелевских потерь на непокрытых гранях кристалла) $\sim 10^{-4}$. Пиковая мощность ГРЧ для кристалла AgGaSe_2 составляла 32 ± 4 мВт. Более высокая эффективность $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ по сравнению с AgGaSe_2 связана с его более высокой спектральной шириной фазового синхронизма. Эффективность

кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ была примерно на порядок меньше, вероятно, из-за поглощения излучения ГРЧ.

Затем были измерены спектры ГРЧ в длинноволновой области среднего ИК-диапазона. При перестройке угла фазового синхронизма нелинейного кристалла $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ от 33 до 38 градусов было зарегистрировано 25 узких спектральных линий ГРЧ с длинами волн от 12 до 19.3 мкм (рисунок 6 (г)). Для нелинейного кристалла AgGaSe_2 максимальная длина волны ГРЧ была 15.5 мкм, для $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ – 14.0 мкм.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы настоящего исследования, представленные ниже.

1. Показано, что при генерации второй гармоники и суммарных частот ($\lambda = 2.49\text{--}2.72$ мкм) СО-лазера с МДР с длительностью импульса ~ 1 мкс и числом спектральных линий ~ 100 ($\lambda = 4.9\text{--}6.5$ мкм) в нелинейном кристалле ZnGeP_2 число спектральных линий в спектре преобразованного излучения достигает ~ 600 , а эффективность преобразования 5%.
2. Расчёт спектра излучения суммарной частоты с учетом динамики генерации на каждом колебательно-вращательном переходе СО-лазера с МДР показал, что пиковая мощность излучения ГСЧ меньше (на 18% при частоте вращения зеркала 70 Гц, 13.5% – при 120 Гц), число линий излучения на суммарных частотах меньше (на 13% – при 70 Гц, 7.5% – при 120 Гц) по сравнению теми же параметрами, рассчитанными без учета динамики излучения на отдельных линиях СО-лазера с МДР.
3. Структура спектра генерации суммарных частот излучения СО-лазера с МДР в кристалле ZnGeP_2 представляет собой широкополосный (до 1000 см^{-1}) набор частот в диапазоне длин волн 2.49–2.72 мкм, состоящий из групп со сложной структурой. Спектральное расстояние между группами составляет $\sim 5\text{ см}^{-1}$. Группы, в свою очередь, состоят из ~ 10 спектральных линий с интервалом $\sim 10^{-1}\text{ см}^{-1}$. При помощи спектра генерации суммарных частот получен профиль линии поглощения молекул CO_2 при давлении газа 1 атм.

4. При внутрирезонаторной накачке нелинейного кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ осуществлено преобразование излучения СО-лазера с МДР ($\sim 4.9\text{--}5.9$ мкм) в диапазон суммарных частот с длинами волн $2.45\text{--}2.95$ мкм. Суммирование излучения обоих диапазонов во втором нелинейном кристалле $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ позволило получить излучение в диапазоне длин волн $1.7\text{--}1.9$ мкм с эффективностью двухступенчатого преобразования $\sim 1.3 \cdot 10^{-4}$.
5. При генерации разностных частот излучения импульсно-периодических СО- и CO_2 -лазеров ($\lambda_{\text{CO}} = 5.0\text{--}6.5$ мкм, $\lambda_{\text{CO}_2} = 9.2\text{--}9.6$ мкм) в нелинейных кристаллах AgGaSe_2 , $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ и $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ максимальная длина волны 19.3 мкм и максимальная эффективность преобразования 10^{-4} получена в нелинейном кристалле $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$.
6. На основе СО-, CO_2 -лазеров и нелинейных оптических кристаллов разработана лазерная система, излучающая в интервале длин волн ближнего и среднего ИК-диапазонов $1.7\text{--}19.3$ мкм.

Проведенные исследования показали перспективность преобразования частоты излучения СО- и CO_2 -лазеров в нелинейных кристаллах для расширения и обогащения их спектров в среднем ИК-диапазоне. Полученные в работе результаты могут быть использованы в проектировании и разработке лазерных систем для решения различных прикладных задач: спектроскопии, газового анализа (в том числе анализе многокомпонентных газовых смесей), зондирования атмосферы и разделения изотопов. СО-лазер, действующий на основных переходах, с высокой эффективностью генерации второй гармоники в нелинейных кристаллах ZnGeP_2 и $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ может быть энергетически выгодной альтернативой СО-лазеру на переходах первого колебательного обертона. Лазерная система на базе СО- и CO_2 -лазеров и нелинейных кристаллов позволяет за счёт генерации разностных частот получить лазерное излучение в диапазоне длин волн $12\text{--}19.3$ мкм, для которого до сих пор существует недостаточно источников лазерного излучения.

**Список публикаций, в которых содержатся основные результаты
диссертации**

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в
международных базах данных Web of Science и Scopus**

1*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kryuchkov D.S., Sagitova A.M., Sunchugasheva E.S. Spectral characteristics of multi-line Q-switched CO laser radiation frequency converted in ZnGeP₂ // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2017. – Vol. 123. – No. 9. – P. 234.

2*. Ionin A.A., Badikov D.V., Badikov V.V., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y., Sagitova A.M., Sinitsyn D.V. Sum frequency generation of multi-line slab radio frequency discharge carbon monoxide laser system with intracavity nonlinear BaGa₂GeSe₆ crystal // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43. – No. 18. – P. 4358–4361.

3*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu., Sagitova A.M., Sinitsyn D.V., Badikov V.V., Badikov D.V. Broadband (1.7-6.0 μm) multiline CO laser system with intra- and extracavity sum frequency generation in BaGa₂GeSe₆ crystals // Optics & Laser Technology. – 2019. – Vol. 115. – P. 205–209.

4*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Sagitova A.M., Andreev Y.M. CO laser sum-frequency comb for atmosphere sensing // Infrared Physics & Technology. – 2019. – Vol. 100. – P. 62–66.

5*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y., Sagitova A.M., Sinitsyn D. V., Rulev O.A., Badikov V.V., Badikov D.V. Frequency conversion of mid-IR lasers into the long-wavelength domain of 12-20 μm with AgGaSe₂, BaGa₂GeSe₆ and PbIn₆Te₁₀ nonlinear crystals // Optics Express. – 2019. – Vol. 27. – No. 17. – P. 24353–24361.

Публикации в материалах научных конференций

6*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kryuchkov D.S., Sagitova A.M. Spectral characteristics of Q-switched CO laser // III International Conference on Laser and Plasma Researches and Technologies : Journal of Physics Conference Series. – Inst Laser & Plasma Technologies, 2017. – Vol. 941. – P. 012006.

7*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kryuchkov D.S., Sagitova A.M. Numerical simulation of sum frequency generation spectrum in nonlinear crystals with considering dynamics of generation // III International Conference on Laser

and Plasma Researches and Technologies : Journal of Physics Conference Series. – Inst Laser & Plasma Technologies, 2017. – Vol. 941. – P. 012005.

8*. Klimachev Yu.M., Badikov V.V., Badikov D.V., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu., Sagitova A.M., Sinitsyn D.V. Intracavity frequency conversion of multiline CO laser radiation in nonlinear crystal BaGa₂GeSe₆ // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO 2018). – IEEE, 2018. – P. 83.

9*. Ionin A., Kinyaevskiy I., Klimachev Y., Kotkov A., Kozlov A., Sagitova A., Seleznev L., Sinitsyn D. Hybrid molecular gas laser systems operating within wavelength range of 1.7–19.3 micron // Proc. SPIE 11162, High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects III. – 2019. – Vol. 11162. – P. 111620D.

10*. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.A., Sagitova A.M., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Super-broadband hybrid mid-infrared laser systems // XXII International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications : Proceedings of SPIE/ ed. P. DiLazzaro. – Italian Natl Agcy New Technologies, Energy & Sustainable Econ Dev; EI En SpA, 2018. – Vol. 11042. – P. 1104204.

11*. Сагитова А.М., Бадиков В.В., Бадиков Д.В., Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Можаяева В.А., Синицын Д.В. Генерация суммарных частот излучения СО-лазера в кристалле BaGa₂GeSe₆ при внутрирезонаторном варианте преобразования // XXIX Международная конференция ЛАЗЕРЫ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ, МЕДИЦИНЕ: Сборник научных трудов. – М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2018. – Т. 29. – С. 81–85.

Список литературы

1. Picqué N., Hänsch T.W. Frequency comb spectroscopy // Nature Photonics. – 2019. – Vol. 13. – No. 3. – P. 146–157.

2. Stepanov E.A., Lanin A.A., Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. Solid-State Source of Subcycle Pulses in the Midinfrared // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 117. – No. 4. – P. 043901.

3. Schliesser A., Picqué N., Hänsch T.W. Mid-infrared frequency combs // Nature Photonics. – 2012. – Vol. 6. – P. 440–449.

4. Neyra E., Videla F., Pérez-Hernández J.A., Ciappina M.F., Roso L., Torchia G.A. Extending the high-order harmonic generation cutoff by means of self-phase-modulated chirped pulses // *Laser Physics Letters*. – 2016. – Vol. 13. – No. 11. – P. 115303.
5. Petersen C.R., Møller U., Kubat I., Zhou B., Dupont S., Ramsay J., Benson T., Sujecki S., Abdel-Moneim N., Tang Z., Furniss D., Seddon A., Bang O. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre // *Nature Photonics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 830–834.
6. Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I.T., eds. *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications : NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*. – Springer Dordrecht, 2007. – 626 p.
7. Yao Y., Hoffman A.J., Gmachl C.F. Mid-infrared quantum cascade lasers // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – No. 7. – P. 432–439.
8. Vitiello M.S., Scalfari G., Williams B., De Natale P. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23. – No. 4. – P. 5167–5182.
9. Ohtani K., Beck M., Faist J. Double metal waveguide InGaAs/AlInAs quantum cascade lasers emitting at 24 μm // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 105. – No. 12. – P. 121115.
10. Rudy C.W. Mid-IR Lasers: Power and pulse capability ramp up for mid-IR lasers // *Laser Focus World*. – 2014. – Vol. 50. – No. 5. – P. 63–66.
11. Babushkin I., Tajalli A., Sayinc H., Morgner U., Steinmeyer G., Demircan A. Simple route toward efficient frequency conversion for generation of fully coherent supercontinua in the mid-IR and UV range // *Light: Science & Applications*. – 2017. – Vol. 6. – P. e16218.
12. Hinkley E.D., ed. *Laser Monitoring of the Atmosphere : Topics in Applied Physics*. – 1. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1976. – 14. – 382 p.
13. McCord J.E., Miller H.C., Hager G., Lampson A.I., Crowell P.G. Experimental investigation of an optically pumped mid-infrared carbon monoxide laser // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1999. – Vol. 35. – No. 11. – P. 1602–1612.
14. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y. Frequency tunable CO laser operating on the highest vibrational transition with wavelength of 8.7 μm // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42. – P. 498–501.
15. Ionin A.A. *Electric Discharge CO Lasers // Gas Lasers/* eds. M. Endo, R.F. Walter. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – P. 201–237.

16. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V. Lasers on overtone transitions of carbon monoxide molecule // *Laser Physics*. – 2010. – Vol. 20. – P. 144–186.
17. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Курносков А.К., Напартович А.П., Рулев О.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Хагер Г.Д., Шнырев С.Л. Импульсный обертоновый СО лазер с КПД 16% // *Квантовая электроника*. – 2006. – Т. 36. – № 12. – С. 1153–1154.
18. Витteman В. СО₂-лазер. – М.: Мир, 1990. – 360 с.
19. Басиев А.Г., Голубев А.А., Гурашвили В.А., Изюмов С.В. Расширение спектра генерации СО лазера с модулированной добротностью // *Журнал технической физики*. – 1980. – Т. 50. – С. 1740–1744.
20. Басиев А.Г., Гальцев В.Е., Гурашвили В.А., Изюмов С.В., Кочетов И.В., Курносков А.К., Певгов В.Г. Особенности спектрообразования СО-лазера с модулированной добротностью : Препринты ИАЭ. – М.: ИАЭ, 1981. – Вып. 3448/12. – 32 с.
21. Ionin A.A., Kochetkov Y.V., Kozlov A.Y., Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Zemtsov D.S. Q-switched slab RF discharge CO laser // *Laser Physics Letters*. – 2017. – Vol. 14. – No. 5. – P. 055001.
22. Минеев А.П., Нефедов С.М., Пашинин П.П., Гончаров П.А., Киселев В.В., Дроздов П.А. Экспериментальные исследования работы планарного СО-лазера с ВЧ накачкой при комнатной температуре // *Вестник воздушно-космической обороны*. – 2018. – Т. 2. – № 18. – С. 61–68.
23. Wallace J. Gas Lasers: Carbon monoxide laser aims at high-power applications // *Laser Focus World*. – 2015. – Vol. 51. – No. 6. – P. 28–31.
24. Патент № RU2267114C1. Способ детектирования меркаптановой одоризационной смеси природного газа в реальном масштабе времени: № 2004134703/28 : заявл. 30.11.2004 : опубл. 27.12.2005 / В.А. Усошин, Н.Г. Петров, В.М. Клищевская, Ю.И. Есин, С.В. Киреев, С.Л. Шнырев, Е.М. Подоляко.
25. Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Рулев О.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. Многочастотное лазерное зондирование активных сред СО:He, СО:N₂ и СО:О₂ в широкоапертурном импульсном усилителе : Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева. – М.: ФИАН, 2005. – Вып. 13. – 55 с.
26. Ionin A.A., Kozlov A.Y., Rulev O.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Repetitively pulsed cryogenically cooled quasi-sealed-off slab RF discharge first-overtone CO laser // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2016. – Vol. 122. – P. 183.

27. Андреев Ю.М., Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В., Шайдуко А.В. Широкополосная лазерная система на монооксиде углерода, действующая в интервале длин волн 2.5–8.3 мкм // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – № 2. – С. 139–143.
28. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals : Springer Series in Optical Sciences. Vol. 64. – 3. – Springer, Berlin, Heidelberg, 1999. – 414 p.
29. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Rulev O.A., Sagitova A.M., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. Q-switched repetitively pulsed cryogenic slab RF discharge CO laser with active medium comprising air // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2018. – Vol. 124. – No. 9. – P. 173.