

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Кандидат технических наук,

Ильин Кирилл Игоревич



2024 г.

### Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Сагитовой Адилы Маратовны «Генерация излучения в спектральном диапазоне 1.7–19.3 мкм при преобразовании частоты излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в нелинейных кристаллах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

### Актуальность темы исследования

На сегодняшний день задача разработки источников когерентного излучения в среднем инфракрасном диапазоне (2–20 мкм) является актуальной. Интерес к таким источникам обусловлен несколькими обстоятельствами: в этой части спектра находятся основные окна прозрачности атмосферы, где широко представлены характеристичные линии поглощения колебательно-вращательных переходов различных газов (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, NH<sub>3</sub> и др.), органических соединений (ацетон, бензол, метан, этанол и др.) и взрывчатых веществ (ТНТ, ТЕН, гексоген, и др.). Всё это делает средний ИК-диапазон идеальным для молекулярного зондирования. Кроме этого, подобные источники могут быть применены для лазерной обработки (резка, сверление, обработка поверхности и т. д.) неметаллов, таких как пластмассы, стекла или биологические ткани за счёт избирательного поглощения этими веществами излучения среднего ИК-диапазона. Лучшее поглощение означает лучший контроль, точность, эффективность и скорость для лазерной хирургии и обработки материалов или лучшую селективность и отношение сигнал/шум для спектроскопии.

Один из способов освоения спектрального диапазона 2–20 мкм – преобразование частоты существующих лазеров методами нелинейной оптики, в частности, путём генерации суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах, параметрического преобразования частоты и пр. В настоящее время синтезируются новые нелинейные среды для решения различных задач нелинейно-оптического преобразования частоты, и все они нуждаются в исследованиях их свойств и характеристик.

Поэтому несомненна актуальность представленных в диссертации А. М. Сагитовой исследований, посвященных получению лазерного излучения в спектральном диапазоне от 1.7–19.3 мкм за счёт преобразования излучения лазеров на окиси углерода и оксиде углерода методами нелинейной оптики. Стоит отметить, что на момент выполнения диссертационной работы в ней использовались новые, не до конца исследованные, нелинейные кристаллы BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub> и PbIn<sub>6</sub>Te<sub>10</sub>, синтезированные в Лаборатория новейших технологий Кубанского государственного университета.



## Структура и содержание 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.

Во Введении дается актуальность темы исследования, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы цель и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту. Отмечены достоверность результатов, личный вклад соискателя, описана апробация результатов.

Первая глава представляет собой литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований, посвященных конверсии частоты излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в нелинейных кристаллах. Приведены научные результаты, полученные на момент начала выполнения диссертационной работы, которые в том числе подводят к задачам, решаемым в данной диссертационной работе.

Во второй главе представлены описания используемых в экспериментах установок: криогенного СО-лазера низкого давления и щелевых СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров с накачкой ВЧ-разрядом. Приведены их конструктивные особенности и основные параметры.

В третьей главе исследуется динамика генерации колебательно-вращательных линий многочастотного СО-лазера с модуляцией добротности резонатора и её влияние на конверсию частоты такого лазера в нелинейном кристалле. В ходе эксперимента были по отдельности измерены характеристики каждой колебательно-вращательной линии для двух разных частот модуляции добротности резонатора (113 и 99 линий): средняя мощность, длительность и форма импульса. Был проведен численный расчёт спектра генерации суммарных частот в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub> с учётом временной динамики спектра СО-лазера. При проведении численного расчёта была использована теоретическая модель, основанная на приближении плоской волны и малой эффективности преобразования. Расчёт показал, что при преобразовании излучения основной вклад в мощность линий суммарных частот вносят колебательно-вращательные линии СО-лазера с большей мощностью (длительность которых близка к длительности всего импульса). В диссертации приводится выражение для расчёта мощности каждой линии суммарных частот.

В четвёртой главе описывается исследование спектра широкополосной генерации суммарных частот излучения многочастотного СО-лазера в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub>. Форма спектра, полученного экспериментально, имела вид, схожий с расчётным спектром из третьей главы, ширина спектров и длина волны максимумов у экспериментального и расчётного спектров совпадали. Было показано, что спектр генерации суммарных частот, насчитывавший 587 линий в диапазоне длин волн 2.5–2.7 мкм, имеет сложную структуру: он состоит из групп, каждая из которых состоит из десятка линий. Расстояние между линиями спектра составляло от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  см<sup>-1</sup>. Также в этой главе демонстрируется возможность измерения профиля линии поглощения молекул СО<sub>2</sub> с помощью спектра суммарных частот. Приводится сравнение значений коэффициентов поглощения как рассчитанных по экспериментальным данным, так и по данным «NITRAN», было показано хорошее согласие между ними. Таким образом, был сделан вывод, что широкополосная генерация суммарной частоты многочастотного СО-лазера с МДР может быть использована для измерения профиля линии поглощения.



В пятой главе исследуется генерация суммарных частот в новом нелинейном кристалле  $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ , причём сначала исследуется внутриврезонаторный вариант преобразования, а затем и второй каскад преобразования в кристалле, расположенном вне резонатора.

Для внутриврезонаторного преобразования рассматривались различные конфигурации выходных зеркал, получена генерация излучения в спектральном диапазоне 2.45–2.95 мкм, средняя мощность излучения суммарных частот достигала  $\sim 6.0$  мВт с эффективностью 1.7%. Спектры генерации суммарных частот для внутри- и внерезонаторного преобразования отличались по внешнему виду: при внутриврезонаторном преобразовании в спектре наблюдался «провал», который отсутствовал при внерезонаторном преобразовании. Предположение, что причиной этого провала является влияние условий фазового синхронизма (а именно волновой расстройки и эффективной длины кристалла) на эффективность преобразования, подтвердилось расчётами.

Для генерации суммарных частот во втором образце кристалла  $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ , расположенном уже вне резонатора (второй каскад преобразования), подбирались конфигурация выходного зеркала резонатора, обеспечивающая максимальную мощность второго суммирования частот излучения СО-лазера с преобразованным излучением, полученным внутриврезонаторно в первом кристалле. Были проведены расчёты, показавшие какой тип синхронизма является оптимальным для второго каскада. В результате получено излучение суммарных частот в диапазоне длин волн 1.7–1.9 мкм со средней мощностью 35 мкВт.

В шестой главе приводятся результаты генерации разностных частот излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров. В литературном обзоре указывалось, что на момент диссертации подобным образом был освоен спектральный диапазон до  $\sim 16$  мкм. В данной главе ставится задача продвинуться ещё дальше в длинноволновую область среднего ИК-диапазона. В исследованиях использовались следующие кристаллы:  $\text{AgGaSe}_2$ , а также более новые  $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$  и  $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ . С помощью генерации разностных частот в нелинейном кристалле  $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$  удалось получить излучение на длине волны 19.3 мкм. Показано хорошее согласие измеренных в эксперименте углов фазового синхронизма и рассчитанных из уравнений дисперсии показателя преломления для кристалла  $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ , что показывает их корректность. Кристалл РИТ имеет широчайший диапазон фазового синхронизма и прозрачности (до 31 мкм), что делает его наиболее подходящим для ГРЧ в длинноволновой области.

В Заключение сформулированы основные выводы и результаты диссертации. В конце дается список используемой литературы.

### **Научная новизна исследования**

В рамках диссертационной работы А. М. Сагитовой было проведено комплексное исследование динамики генерации излучения на большом количестве ( $\sim 100$ ) колебательно-вращательных переходов СО-лазера с модуляцией добротности резонатора в диапазоне длин волн 4.9–6.5 мкм. Теоретически показано, что основной вклад при преобразовании излучения такого лазера в нелинейном кристалле вносят импульсы линий большей мощности, которые наиболее полно перекрываются во времени. Впервые показано наличие тонкой структуры у спектра генерации суммарных частот, а также продемонстрирована возможность его применения в газоанализе. С новыми нелинейными кристаллами удалось осуществить преобразование излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров как в



диапазон длин волн ближнего ИК-диапазона (1.7–1.9 мкм), так и более длинноволновой области среднего ИК-диапазона.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты исследований, проведенных А. М. Сагитовой, представляют несомненный интерес с научной и практической точки зрения и могут быть использованы при создании установок с преобразованием частоты излучения в нелинейных кристаллах для дистанционного зондирования атмосферы, анализа многокомпонентных газовых смесей, лазерного разделения изотопов. Полученные экспериментальные результаты по динамике генерации колебательно-вращательных линий СО-лазера могут быть использованы для уточнения кинетической и плазмохимической моделей активных сред криогенных СО-лазеров.

Таким образом, полученные в работе результаты могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в области лазерной физики высоких энергий, таких как Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Институт лазерной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ и в других институтах РАН и организациях Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### **Обоснование и достоверность результатов**

Результаты, полученные в ходе исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, являются хорошо обоснованными. Обоснованность используемых упрощений и приближений подтверждается хорошим согласием результатов, полученных в экспериментах, с результатами численного моделирования и расчётов, выполненных с верифицированными программными кодами.

Полученные результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах и в полной мере изложены в 5 статьях, которые были опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 6 материалах конференций.

### **Замечания по работе**

При изучении диссертационной работы возник ряд замечаний:

1. В пятой главе диссертационной работы был получен набор спектров двухкаскадной генерации суммарных частот. Было указано, что линии данных спектров были слишком близко расположены друг другу и не были разрешены. Однако не было приведено никаких теоретических оценок, в которых бы приводилось предположительное число линий и расстояние между ними.
2. В диссертационной работе не приводятся данные о спектральной чувствительности используемых монохроматоров и фотодетекторов, а также в 4–6 главах не указывается, учитывались ли они при построении спектрального распределения мощности излучения СО-лазера по отдельным линиям в многочастотных спектрах генерации.
3. Не всегда явно указано, что подразумевается под эффективностью преобразования, что особенно имеет смысл указывать для внутрирезонаторного преобразования частот и второго каскада.

Приведённые замечания не снижают высокую научную ценность работы и не оказывают влияния на общую положительную оценку работы.

### Общая оценка работы

Диссертационная работа «Генерация излучения в спектральном диапазоне 1.7–19.3 мкм при преобразовании частоты излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в нелинейных кристаллах» является законченным научно-квалификационным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Диссертация по тематике и содержанию соответствует заявленной специальности (1.3.19 – лазерная физика), подтверждает научную квалификацию Сагитовой А. М. и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 г.), а её автор, Сагитова Адила Маратовна, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Автореферат полно и правильно отражает содержание работы, её результаты и выводы.

Доклад Сагитовой А. М. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на заседании секции №6 научного совета Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» 19 августа 2024 г. (протокол № 14 заседания секции НТС). Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., профессором Гурашвили Виктором Арчельевичем.

Главный научный сотрудник  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
д.ф.-м.н., профессор



Гурашвили Виктор  
Арчельевич

Ученый секретарь научного  
совета АО «ГНЦ РФ  
ТРИНИТИ»,  
к.ф.-м.н.



Ежов Александр  
Александрович

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12

Телефон: +7 (495) 841-56-80

e-mail: [liner@triniti.ru](mailto:liner@triniti.ru)



Список основных работ ведущей организации Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») по тематике диссертации Сагитовой Адилы Маратовны «Генерация излучения в спектральном диапазоне 1.7–19.3 мкм при преобразовании частоты излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в нелинейных кристаллах» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. А.А. Воскобоев, В.А. Кузьменко, В.С. Межевов, А.Р. Саутин: Экспериментальное изучение дрейфового движения молекул SF<sub>6</sub> под действием излучения СО<sub>2</sub>-лазера. Журнал Технической Физики. 93, 191-197 (2023).  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2023.02.54491.142-22>
2. А.А. Воскобоев, А.Н. Кириченко, В.С. Межевов, С.П. Яцков: Нанесение алмазоподобного покрытия импульсно-периодическим СО<sub>2</sub> лазером. Журнал Технической Физики. 93, 1679-1683 (2023).  
<https://doi.org/10.61011/JTF.2023.II.56501.196-23>
3. О.Б. Христофоров, А.В. Ельцов: Компактный импульсно-периодический эксимерный лазер. Уральский Научный Вестник. 3, 47-56 (2022)
4. А.А. Васеленок, В.А. Гурашвили, И.Д. Джигайло, Д.А. Кириленко, А.К. Кондратенко, В.Н. Кузьмин, В.С. Немчинов, А.Е. Полтанов, В.И. Сень, Н.Г. Туркин: Источник питания газоразрядного лазера на основе литий-полимерной аккумуляторной батареи. Приборы и Техника Эксперимента. 1, 81—87 (2021).  
<https://doi.org/10.31857/S003281622101016X>
5. Laptev, V.B., Pigulsky, S.V., Mezhevov, V.S.: Production of high-enriched carbon-13 by two-stage laser method. J. Phys. Conf. Ser. 1696, 012016 (2020).  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1696/1/012016>
6. Baranov, G.A., Gurashvili, V.A., Djigailo, I.D., Komarov, O.V., Kosogorov, S.L., Kuzmin, V.N., Nemchinov, V.S., Sen, V.I., Uspensky, N.A., Shvedyuk, V.Ya.: Comparison of Large-Area Low-Energy Electron Accelerators Based on a High-Voltage Glow Discharge with Accelerators Based on Longitudinal Filaments. Instrum. Exp. Tech. 63, 227-233 (2020).  
<https://doi.org/10.1134/S0020441220030021>