

## ОТЗЫВ

официального оппонента Потёмкина Фёдора Викторовича на диссертационную работу Сагитовой Адили 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.

Диссертационная работа Сагитовой Адили Маратовны посвящена формированию многочастотного лазерного излучения в широком диапазоне длин волн методами нелинейной оптики за счёт преобразования излучения многочастотных лазеров среднего инфракрасного диапазона в нелинейных кристаллах.

Поиск когерентных источников лазерного излучения в среднем инфракрасном диапазоне представляет значительный интерес по нескольким причинам. Во-первых, в этой области спектра находятся основные окна прозрачности атмосферы, что позволяет эффективно исследовать вещества, присутствующие в атмосфере, включая важные газовые компоненты, такие как водяной пар, углекислый газ и другие, а также наличие веществ на различных поверхностях. Эти молекулы обладают характерными линиями поглощения, что позволяет использовать средний ИК-диапазон для молекулярного зондирования. Во-вторых, средний инфракрасный диапазон идеально подходит для применения в различных технологиях, включая лазерную обработку неметаллов, таких как пластмассы, стекла и биологические ткани. Эффективность этих процессов обеспечивается селективным поглощением излучения в этих материалах, что приводит к улучшению контроля, точности и скорости операций, таких как резка и обработка поверхностей. Таким образом, несомненно актуальность выбранной темы диссертационной работы.

К наиболее важным и значимым результатам, определяющим научную новизну диссертационной работы, на мой взгляд, можно отнести обнаружение особых режимов в динамике лазерной генерации СО- лазера, что с применением разработанных методов диагностики позволило впервые исследовать тонкую структуру в спектре ИК излучения, генерируемого в процессе трёхволнового смещения в новых нелинейно-оптических кристаллах (PbIn<sub>6</sub>Te<sub>10</sub>, BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub>) и стало основой для создания широкодиапазонного ИК лазерного источника от 1,7 мкм до 19,3 мкм.

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

Первая глава содержит литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований, связанных с преобразованием частоты излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров в нелинейных кристаллах. В ней представлены научные результаты, достигнутые на момент начала выполнения диссертационной работы, которые в том числе ведут к задачам, решаемым в данной диссертации.

Во второй главе представлены описания используемых лазерных установок, даны их конструктивные характеристики и ключевые параметры.

В третьей главе проводится исследование временных характеристик генерации колебательно-вращательных линий многочастотного СО-лазера с модуляцией добротности резонатора (МДР). Численно демонстрируется, что при преобразовании излучения такого лазера в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub> основной вклад в мощность линий суммарных частот обеспечивают колебательно-вращательные линии СО-лазера с высокой мощностью.

Четвёртая глава посвящена исследованию спектра широкополосной генерации суммарных частот излучения многочастотного СО-лазера в нелинейном кристалле ZnGeP<sub>2</sub>. Впервые показано, что спектр генерации суммарных частот, включающий 587 линий в диапазоне длин волн 2.5–2.7 мкм, имеет сложную структуру, состоящую из групп, каждая из которых содержит около десятка линий. Расстояние между линиями спектра лежало в диапазоне от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>. На примере молекулы

CO<sub>2</sub> показано, что широкополосная генерация суммарной частоты многочастотного СО-лазера с МДР может быть применена для измерения профиля линии поглощения.

В пятой главе исследуется внутрирезонаторная генерация суммарных частот в новом нелинейном кристалле BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub>, а затем и внерезонаторная генерация полученного в первом кристалле излучения и излучения самого лазера. Для внутрирезонаторного преобразования удалось получить генерацию излучения в спектральном диапазоне 2,45–2,95 мкм, при этом средняя мощность излучения суммарных частот составила около 6,0 мВт, а эффективность – 1,7%. Для генерации суммарных частот во втором образце кристалла BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub>, размещённом вне резонатора, удалось получить излучение суммарных частот в диапазоне длин волн 1,7–1,9 мкм со средней мощностью 35 мкВт.

В шестой главе представлены результаты генерации разностных частот излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров. Для преобразования частоты использовались кристаллы AgGaSe<sub>2</sub>, а также более новые BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub> и PbIn<sub>6</sub>Te<sub>10</sub>, для которого были получены лучшие результаты. С помощью нелинейного кристалла PbIn<sub>6</sub>Te<sub>10</sub> удалось впервые генерацией разностных частот излучения СО- и СО<sub>2</sub>-лазеров получить излучение на длине волны 19,3 мкм.

В Заключение приведены выводы и основные результаты работы.

По тексту диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. На стр. 58 опечатка в формулах  $P_{Гсч} \sim \max(P_1) \cdot \max(P_2)$  (1) и  $P_{Гсч} \sim \max(P_1 \cdot P_2)$  (2). Должно быть  $P_{Гсч} \sim \max(P_1) \cdot \max(P_2)$  и  $P_{Гсч} \sim \max(P_1 \cdot P_2)$ . Был произведён расчёт коэффициентов  $K$  (рисунок 3.8), однако нет полного анализа того, какие  $K$  на рисунке соответствуют наиболее мощным линиям суммарных частот.

2. Во введении отсутствуют ссылки на работы российских учёных по разработке мощных импульсных наносекундных и фемтосекундных лазеров среднего ИК диапазона на основе халькогенидной группы активных кристаллов.

3. Главы выглядят несбалансированными по объёму излагаемого материала. Так, допустим, главе 2 отводится 8 страниц, что не позволяет её рассматривать, как отдельную полноценную главу диссертации.

4. Приведённая на Рис. 3.4 временная динамика спектра генерации не объяснена, хотя это принципиально для выбора наиболее эффективно перекрывающихся во времени линий и генерации спектра суммарных и разностных частот.

5. В главе 3 непонятен выбор частот вращения глухого зеркала резонатора СО-лазера. Динамика импульсной лазерной генерации может очень сильно зависеть от скорости переключения потерь в резонаторе, что требовало бы проведения исследований в этой области для оптимизации режима работы лазера и более тонкого подбора этой частоты вращения с анализом изменения динамики населенностей в этих переходных режимах с применением численных расчётов. В тексте диссертации присутствуют разные частоты вращения внутрирезонаторного зеркала, при этом автор недостаточно аккуратно описывает проводимые эксперименты, приводя результаты только для частоты вращения 70 Гц и не показывая результаты для 120 Гц (см. Рис 3.7).

6. Многие утверждения в диссертации делаются без доказательств. Так, допустим, на стр. 34 автор заявляет о том, что для получения наиболее эффективной генерации суммарных частот излучения СО-лазера необходимо выполнение условия некритичного фазового синхронизма. Откуда это следует, абсолютно непонятно.

7. Демонстрируя в главе 3 и 5 результаты по нелинейно-оптическому преобразованию излучения СО- и СО<sub>2</sub>- лазера в нелинейных полупроводниковых кристаллах, автор всё время пользуется известной аналитической формулой для генерации суммарной частоты (см. стр. 85). При этом эта формула получена в приближении плоских волн, тогда как в эксперименте идёт работа с

реальными пучками внутри и вне резонатора СО- и СО<sub>2</sub>-лазера. Никаких пояснений относительно возможности пользоваться таким приближением не даётся.

8. В диссертационной работе в главе 4 было получено 587 (!) линий в спектре генерации суммарных частот. Однако в дальнейших главах (например, в главе 5, посвященной преобразованию излучения в нелинейном кристалле ВаGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub>) спектры преобразованной частоты насчитывают куда меньше линий (~100 линий). Чем это вызвано?

9. В тексте работы встречаются опечатки, стилистические ошибки и неудачно сформулированные предложения. Некоторые рисунки на английском языке, особенно это часто наблюдается в главе 4. На некоторых рисунках с экспериментальными схемами подписи отдельных элементов схемы выглядят мелковато.

Приведённые замечания не снижают научную значимость результатов, представленных в диссертации, и общей положительной оценки работы.

Тема диссертации является актуальной. Научные положения и выводы диссертации научно обоснованы. Результаты диссертации обладают практической значимостью, научной новизной, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах, представлены в опубликованных трудах автора. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и согласованностью с результатами численного моделирования и результатами других авторов.

Диссертация 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» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Сагитова Адилы Маратовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, Потёмкин Фёдор Викторович,  
профессор физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», руководитель группы нелинейной оптики и сверхсильных световых полей  
Адрес: Российская федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 62  
Телефон: +7 (495) 939-53-18  
e-mail: [potemkin@physics.msu.ru](mailto:potemkin@physics.msu.ru)

/Потёмкин Фёдор Викторович/  
«14» сентября 2024 г.

Подпись Потёмкина Фёдора Викторовича заверяю:

Белокуров Владимир Викторович  
И.о. декана физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, д.ф.-м.н., профессор

Белокуров Владимир Викторович/

Список основных работ официального оппонента Потёмкина Фёдора Викторовича по тематике диссертации Сагитовой Адили 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. Migal E.A. Unlocking superior performance of broadband powerful mid-IR optical parametric amplifiers with a BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub> crystal pumped at 1.24 μm / Migal E.A., Suleimanova D. Z., Badikov D. V., Potemkin F. V. // Opt. Lett. – 2024 – V. 49 – P. 4537-4540.
2. Suleimanova D. Z. Advances in the development of few-cycle gigawatt-peak-power mid-IR optical parametric amplifiers pumped by Cr:Forsterite laser using non-oxide nonlinear crystals / Suleimanova D. Z., Migal E.A., Badikov D. V., Potemkin F. V. // Appl. Phys. Lett. – 2024. – V. 124 - P. 161103.
3. Pushkin A. Refining the Performance of mid-IR CPA Laser Systems Based on Fe-Doped Chalcogenides for Nonlinear Photonics / Pushkin A., Potemkin F. // Photonics - 2023.-V. 10 - P. 1375.
4. Suleimanova D.Z. Generation of Intense Near and Mid-Infrared Femtosecond Radiation (1.2-2.4 pm) with the Use of the Broadband Parametric Down-Conversion in a Type-II BBO Crystal Pumped by a Ti:Sapphire Laser and Its Application for the Generation of Terahertz Radiation in Organic Crystals / Suleimanova D.Z., Zhidovtsev N.A., Potemkin F.V. // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters - 2022. - V. 115 - P.63-70.
5. Pushkin A. High-gain broadband laser amplification of mid-IR pulses in Fe:CdSe crystal at 5 pm with millijoule output energy and multigigawatt peak power / Pushkin A., Potemkin F. // Optics Letters - 2022.-V. 47 - P.5762.
6. Migal E.A. Generation of few-cycle radiation pulses in the IR spectral range (1.3-2.2 pm) using wide- aperture BBO crystals pumped by a terawatt Ti: sapphire laser / Migal E.A., Suleimanova D.Z., Potemkin F.V. // Quantum Electronics - 2021. - V. 51 - P.601-608.
7. Pushkin A.V. Powerful 3-pm lasers acousto-optically Q-switched with KYW and KGW crystals / Pushkin A.V., Mazur M.M., Sirotkin A.A., Firsov V.V., Potemkin F.V. // Optics Letters - 2019. - V. 44 - P.4837.
8. Румянцев Б.В. Влияние длины и давления газовой струи на процесс генерации оптических гармоник фемтосекундным излучением лазерной системы на кристалле Fe:ZnSe с длиной волны 4,5 мкм / Румянцев Б.В., Михеев К.Е., Пушкин А.В., Потёмкин Ф.В. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики - 2022. - V. 116. - С. 659-666.
9. Пушкин А.В. Особенности получения мощных (до 1 МВт, 100 мДж) 3-мкм наносекундных лазерных импульсов в эрбиевых кристаллах в частотном режиме / Пушкин А.В., Потёмкин Ф.В. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики - 2022. - Т.116.-С. 508-516.