

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН,
д.ф.-м.н., академик РАН
Г.Г. Денисов
28» марта 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Корибута Андрея Валериевича «Фазовая самомодуляция и вынужденное комбинационное рассеяние в кристалле вольфрамата бария и плавном кварце», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физики.

Актуальность темы исследования

Применение методов нелинейной оптики для преобразования излучения хорошо отработанных лазерных систем нашло широкое применение для получения характеристик лазерного излучения недоступных напрямую из этих лазерных источников. Одним из очень важных и востребованных методов является преобразование за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Эффект вынужденного комбинационного рассеяния заключается в возбуждении посредством излучения накачки колебательных или вращательных движений молекул, или колебаний решетки (фононов) в твердотельных образцах, что приводит к неупругому рассеянию света, при котором изменяется энергия фотона, частотный сдвиг которого фиксированный и определяется частотой ВКР-активных колебаний среды. Условия синхронизма удовлетворяются автоматически, и коэффициент преобразования в смещенное излучение может достигать практически 100% квантовой эффективности. Однако для ультракоротких (субпикосекундные/фемтосекундные) импульсов в кристаллах с узкими рамановскими линиями наблюдается заметное уменьшение коэффициента усиления, по сравнению со стационарным режимом. Повысить ВКР усиление для ультракоротких импульсов за счет увеличения длины взаимодействия затруднительно из-за дисперсии среды, которая приводит к рассогласованию групповых скоростей накачки и стоксова импульса. Увеличение интенсивности приводит к активации других практически безынерционных нелинейных эффектов: самофокусировка, которая согласно многим работам позволяет снизить пороговую интенсивность ВКР, но так же может привести к заметному нелинейному поглощению; и фазовая самомодуляция, которая согласно многим работам по ВКР фемтосекундных импульсов в газах и кристаллах негативно влияет на ВКР. Поэтому разработка эффективных схем и подходов для ВКР ультракоротких импульсов представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Однако в кристалле вольфрамата бария в простой однопроходной схеме была продемонстрирована аномально высокая (~20%) эффективность ВКР субпикосекундных импульсов при фокусировке в толщину кристалла в режиме значительного уширения

спектра импульсов. Так как данный кристалл является единственным на данный момент, для которого реализован данный режим, то для разработки эффективных методов преобразования ультракоротких импульсов посредством ВКР необходимо исследовать и выделить физические процессы и факторы, вызывающий данный эффект, что и было сделано в диссертационной работе.

Целью работы являлось определение физических факторов, ответственных за высокую эффективность вынужденного комбинационного рассеяния сфокусированных субпикосекундных импульсов в кристалле вольфрамата бария.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 102 страницы, включая 43 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 99 наименований.

Во Введении дается актуальность темы исследования, приведен краткий обзор литературы по нестационарному вынужденному комбинационному рассеянию и анализу причин приводящих к малой эффективности преобразования по сравнению со стационарным случаем. Обоснована научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы цель и задачи исследования, и положения, выносимые на защиту. Представлен список публикаций по теме работы и описана апробация результатов.

Первая глава посвящена описанию распространения ультракоротких импульсов в среде. Рассмотрены такие эффекты: дисперсия среды, самофокусировка, нелинейное поглощение и плазмаобразование, фазовая самомодуляция и вынужденное комбинационное рассеяние. Приведен обзор работ по нестационарному вынужденному комбинационному рассеянию в газах и кристаллах, в которых упоминается негативное влияние фазовой самомодуляции на эффективность преобразования за счет вынужденного комбинационного рассеяния, и предложены различные методики по уменьшению влияния фазовой самомодуляции на данный процесс. Отдельно отмечена работа [Kinyaevskiy I. O. et al., Optics Letters, 2020, 45(8), 2160-2163] в которой в однопроходной схеме при фокусировке в толщину кристалла вольфрамата бария была продемонстрирована высокая эффективность (до 20%) вынужденного комбинационного рассеяния субпикосекундных импульсов, но не был исследован механизм ответственный за столь высокую эффективность.

Во второй главе приведено описание используемой лазерной системы (итербиевый волоконный субпикосекундный лазерный комплекс) с возможностью работы на фундаментальной длине волны и второй гармонике. Изложены характеристики регистрационного оборудования. Приведены характеристики кристалла вольфрамата бария, основанные на литературных данных. Отмечается, что данный кристалл имеет высокие значения пиковой и интегральной интенсивности линии комбинационного рассеяния, что позволяет его использовать как в стационарном, так и в нестационарном режиме. Для исследуемого образца были измерены пороги поверхностного разрушения и спектр спонтанного комбинационного рассеяния, который хорошо согласуется с литературой.

Третья глава посвящена описанию экспериментов по уширению спектра в плавленом кварце. Данный эксперимент был проведен с целью калибровки численной модели на хорошо изученном (эталонном) материале. На зависимости уширения спектра от энергии лазерных импульсов выделены три участка: линейное уширение с ростом энергии, режим нелинейной зависимости уширения от энергии и режим филаментации. Результаты эксперимента были сопоставлены с численной моделью распространения сфокусированного лазерного импульса на основе матричной оптики, учитывающей эффект самофокусировки. Для оценки уширения спектра в филаменте использовались известные из различных экспериментальных и теоретических работ данные о том, что средняя интенсивность в нем можно считать постоянной на уровне 10^{13} Вт/см² при филаментации в кварце. С помощью модели проведена оценка по уширению спектра лазерного импульса, которое согласуется с экспериментальными данными.

В четвертой главе представлены результаты исследования по уширению спектра лазерных импульсов в кристалле вольфрамата бария. Указывается на доминирование уширения спектра в стоксовую область по сравнению с антистоксовой, что не характерно для кристаллов, где основной вклад в кубичную нелинейную поляризацию среды обусловлен ангармонизмом электронов, приводящих к симметричному уширению, либо уширению в антистоксову область из-за эффекта самоукручения. Доминирование уширения в стоксовую область проявлялось как на второй, так и первой гармонике излучения лазерного комплекса, и связано с обнаруженной ориентационной природой нелинейности в кристалле вольфрамата бария с субпикосекундным временем отклика. Величина временного масштаба отклика нелинейности оказалась сопоставима с длительностью импульса, что приводит к различию в уширениях в стоксовую и антистоксовую области.

В пятой главе рассмотрено взаимное влияние эффектов фазовой самомодуляции и вынужденного комбинационного рассеяния, для чего результаты эксперимента были сопоставлены с расчетом, учитывающим только эффект фазовой самомодуляции. При малых энергиях (менее 0,1 мкДж) лазерного импульса наблюдалось хорошее согласие между спектрами, но когда край уширения спектра достигал моды $\nu_2=330$ см⁻¹ (энергия лазерного импульса 0,12 мкДж) в эксперименте наблюдалось формирование линии, положение которой практически не изменялось при увеличении энергии более чем в три раза. Рассчитанная эффективность по спектральной яркости показала, что наибольшая эффективность достигается, когда в расчете положение максимума в спектре совпадает с положением линии. Когда край уширенного спектра достигает моды $\nu_1=925$ см⁻¹, наблюдаются аналогичные эффекты. Показано, что немгновенность отклика приводит к смещению положения, при котором достигается максимальное смещение в стоксовую область в сторону центральной части импульса, что создает благоприятные условия для последующего усиления данного затравочного усиления за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния. Роль фазовой самомодуляции как затравки подтверждается очередностью формирования ВКР линий, которая определяется величиной частотного сдвига, а не их коэффициентом усиления.

Вторая часть главы посвящена результатам исследования факторов, позволяющих повысить эффективность преобразования. Было рассмотрено влияние фокусировки, а также самофокусировки. Для кристалла длиной 8 мм получено, что наибольшая эффективность преобразования по энергии (~10%) достигается при фокусировке линзой с фокусным расстоянием 40 мм и смещением линейного фокуса в сторону задней грани на 1,8 мм от центра кристалла. При таком смещении увеличивается длина между линейным и нелинейным фокусами, что определяет эффективную длину взаимодействия, однако при последующем смещении спад эффективности может быть связан с: 1) рассогласованием групповых скоростей импульса накачки и рассеянного импульса; 2) повреждением задней грани кристалла без появления яркого плазменного факела; 3) образованием постфиламентационного канала за геометрическим фокусом, который может давать вклад в усиление, но при смещении ограничивается геометрическими размерами кристалла.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. В конце дается список используемой литературы.

Научная новизна и практическая значимость

Показана важность наличия «медленной» кубической нелинейности с субпикосекундным временем отклика в неорганическом кристалле вольфрамата бария для процессов фазовой самомодуляции. Показано, что в кристалле вольфрамата бария при накачке субпикосекундными лазерными импульсами на длине волны 515 нм реализуется режим, при котором вынужденное комбинационное рассеяние может происходить особенно эффективно в результате совместного действия с эффектом фазовой самомодуляции, которая формирует затравочное излучение с частотным сдвигом 330 см^{-1} и 925 см^{-1} . Получено эффективное (~35%) ВКР субпикосекундных импульсов на вторичной моде 330 см^{-1} кристалла вольфрамата бария. Выявлено влияние параметров фокусировки и эффекта самофокусировки на эффективность ВКР преобразования в кристалле вольфрамата бария.

Полученная высокая эффективность ВКР субпикосекундных импульсов на колебательных модах кристалла вольфрамата бария 925 см^{-1} и 330 см^{-1} , указывает на возможное применение данного «двухцветного» излучения для решения различных задач, требующих излучения на двух различных частотах, таких как генерация разностной частоты и в схемах накачка-зондирование. Обнаруженные уникальные свойства кристалла вольфрамата бария, дают основания ожидать, что существуют и другие кристаллы с доминирующей «медленной» кубической нелинейностью, которые будут эффективными для ВКР в нестационарном режиме.

Таким образом, полученные в работе результаты могут быть использованы в организациях, работающих с фемтосекундными лазерными системами и использующих различные нелинейно-оптические методы для управления параметрами ультракоротких лазерных импульсов, таких как Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институт прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова РАН, Институт спектроскопии РАН, Институт лазерной физики СО РАН, и др.

Обоснование и достоверность результатов

Результаты, полученные в ходе исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, являются хорошо обоснованными. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием сертифицированного оборудования и согласием экспериментальных результатов с результатами теоретических расчетов и моделирования.

Замечания

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания:

1) Следует более подробно обсудить возможные причины достаточно сильного расхождения значений нелинейного коэффициента преломления в кристалле вольфрамата бария, известных из литературы ($n_2=1,7 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2}\text{Вт}$, приведено в Главе 5) и полученных в данной работе в Главе 4 ($n_2=6,4 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2}\text{Вт}$).

2) В главе 5 в исследовании эффективности преобразования при изменении положения фокуса приведены оценки длины филамента, полученные из теоретических соображений. При проведении эксперимента было бы полезно сделать оценки длины филамента с помощью наблюдения его свечения через боковую грань кристалла и сравнить их с теоретическими предположениями.

3) В качестве пожелания можно предложить расширить описание нестационарного кубичного отклика в кристалле вольфрамата бария с использованием теоретического аппарата на основе функции нестационарного нелинейного отклика. Функция нестационарного нелинейного отклика позволяет унифицированным образом описать и эффект фазовой самомодуляции и эффект ВКР.

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую оценку работы и несколько не снижают ценность полученных результатов.

Общая оценка работы

На основании рассмотрения материала диссертации, автореферата и представления работы на семинаре, ведущая организация считает, что диссертационная работа Корибута Андрея Валериевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19 – Лазерная физика. Автореферат полно и правильно отражает содержание работы, ее результаты и выводы. Тема диссертации является актуальной, а полученные в работе результаты являются новыми и оригинальными. Особо стоит отметить обнаруженный и исследованный режим совместного действия эффектов фазовой самомодуляции и вынужденного комбинационного рассеяния, проявляющийся как высокоэффективное ВКР для ультракоротких импульсов. Полученные результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах, и в полной мере изложены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Заключение

Диссертационная работа «Фазовая само модуляция и вынужденное комбинационное рассеяние в кристалле вольфрамата бария и плавном кварце» подтверждает научную квалификацию Корибута А.В. и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Корибут Андрей Валериевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Доклад Корибута А.В. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН 19 марта 2025 г.

Отзыв составил заведующий лабораторией квантовой и нелинейной оптики сильно локализованных полей (335) ИПФ РАН, д. ф.-м. н. Адрианов Алексей Вячеславович.

Отзыв на диссертацию А.В. Корибута обсужден и одобрен на семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН 19 марта 2025 г.

Заведующий лабораторией квантовой и нелинейной оптики сильно локализованных полей (335) Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
д.ф.-м.н. по специальности 1.3.19 – лазерная физика,
andrian@ipfran.ru,
8 (831) 418-90-46

Адрианов
Алексей Вячеславович

Руководитель Отделения нелинейной динамики и оптики, заместитель директора по научной работе Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы,
mstar@ipfran.ru,
8 (831) 436-57-36

Стародубцев
Михаил Викторович

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)
Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.
Тел.: 8 (831) 436-62-02
Интернет-сайт: <https://ipfran.ru>, e-mail: dir@ipfran.ru

Основные публикации сотрудников ведущей организации по тематике диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1) Anashkina E. A., Andrianov A. V. Switchable cascade Raman lasing in a tellurite glass microresonator //ACS Photonics. – 2023. – Т. 10. – №. 5. – С. 1485-1494. DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c00070
- 2) Anashkina E. A., Andrianov A. V. Numerical Analysis of Dual-Wavelength Tungsten-Tellurite Fiber Raman Lasers with Controllable Mode Switching //Fibers. – 2023. – Т. 11. – №. 10. – С. 84. DOI: 10.3390/fib11100084
- 3) Khazanov E. A. Compression of femtosecond laser pulses using self-phase modulation: from Kilowatts to petawatts over 40 Years //Optics, Photonics and Lasers. – 2023. – С. 130. DOI:
- 4) Martyanov M. et al. Suppressing small-scale self-focusing of high-power femtosecond pulses //High Power Laser Science and Engineering. – 2023. – Т. 11. – С. e28. DOI: 10.1017/hpl.2023.20
- 5) Anashkina E. A., Marisova M. P., Andrianov A. V. Theoretical Study of Multicascade Raman Microlasers Based on TeO₂–WO₃–Bi₂O₃ Glass //Photonics. – MDPI, 2023. – Т. 10. – №. 10. – С. 1137. DOI: 10.3390/photonics10101137
- 6) Andrianov A. V., Anashkina E. A. Tunable Raman lasing in an As₂S₃ chalcogenide glass microsphere //Optics Express. – 2021. – Т. 29. – №. 4. – С. 5580-5587. DOI: 10.1364/OE.415787
- 7) Shaykin A. et al. Use of KDP crystal as a Kerr nonlinear medium for compressing PW laser pulses down to 10 fs //High Power Laser Science and Engineering. – 2021. – Т. 9. – С. e54. DOI: 10.1017/hpl.2021.40
- 8) Andrianov A. Spectral-temporal patterned supercontinuum generation and pulse compression with tunable sub-terahertz repetition rate //Laser Physics Letters. – 2021. – Т. 18. – №. 12. – С. 125103. DOI: 10.1088/1612-202X/ac32db
- 9) Skobelev S. A. et al. Ultrawide shifting of the laser pulse wavelength in a multicore tellurite fiber with two zero-dispersion wavelengths //Physical Review A. – 2021. – Т. 104. – №. 3. – С. 033518. DOI: 10.1103/PhysRevA.104.033518
- 10) Andrianov A. V., Anashkina E. A. Asymmetric interferometric frequency resolved optical gating for complete unambiguous ultrashort pulse characterisation //Results in Physics. – 2021. – Т. 29. – С. 104740. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.104740