

На правах рукописи



Ерушин Евгений Юрьевич

**ЛУЧЕВАЯ СТОЙКОСТЬ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ БАРИЕВЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ**

Специальность 1.3.6 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН) и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ).

Научный руководитель: **Костюкова Надежда Юрьевна**, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Ватник Сергей Маркович**, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории метрологии оптических материалов ООО «ВППГ Лазеруан», г. Москва

Айрапетян Валерик Сергеевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт оптики и атмосфера им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

Защита диссертации состоится «26» ноября 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН и на сайте www.iae.nsk.su/ru/dissertation-council.

Автореферат разослан «12» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н.



Л. В. Ильичёв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы и состояние научной проблемы.

Разработка перестраиваемых когерентных источников среднего инфракрасного (ИК) диапазона имеет огромное значение для многочисленных приложений в промышленности, медицине, науке и технологиях. Их растущее значение получает все большее признание в связи с постоянным развитием современных технологий. Средний ИК-диапазон охватывает основные окна прозрачности атмосферы. В этих окнах наблюдаются характерные линии поглощения колебательно-вращательных переходов различных углеводородов (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 и пр.), азотсодержащих соединений (NO , N_2O , NH_3 и пр.), оксидов углерода (CO , CO_2) и других газов [1]. Кроме того, средний ИК-диапазон включает области прозрачности как оптических, так и полупроводниковых материалов, а также широко используется для воздействия на биологические объекты и соединения биологического происхождения. Таким образом, такие источники находят широкий спектр применений, в том числе в системах мониторинга атмосферы [2,3], неинвазивной медицинской диагностики [4,5], термографии (тепловидения) [6], лазерной хирургии [7,8] и многих других.

Параметрическое преобразование частоты лазерных источников является эффективным методом для генерации когерентного излучения в среднем ИК-диапазоне. Значительным преимуществом таких источников является возможность непрерывной перестройки длины волны в широком спектральном диапазоне. Ключевым требованием для данных источников является выбор источника накачки и нелинейного кристалла.

Выбор соответствующего нелинейного кристалла требует всестороннего рассмотрения физических свойств, которые соответствуют специфическим требованиям поставленной задачи. В приложениях, требующих генерацию непрерывного излучения или излучения высокой средней мощности, одной из основных характеристик кристаллов становится их высокая теплопроводность. Для задач, требующих высокую энергию импульсов, например, в лазерной хирургии, крайне важно, чтобы нелинейный кристалл демонстрировал высокий порог лучевой стойкости. А в приложениях, которые требуют возможность перестройки длины волны в широком спектральном диапазоне, превалирующим фактором становится диапазон прозрачности.

В последнее десятилетие внимание исследователей приковано к халькогенидным кристаллам, в том числе щелочных и щелочноземельных металлов, таких как Li и Ba [9]. Этот класс кристаллов является потенциальной заменой коммерчески доступных кристаллов AgGaS_2 (AGS), AgGaSe_2 (AGSe) и ZnGeP_2 (ZGP). В период с 2009 по 2012 г. был успешно осуществлен синтез двух перспективных широкозонных кристаллов тройных бариевых халькогенидов — BaGa_4S_7 (BGS) [10,11] и BaGa_4Se_7 (BGSe) [12,13]. Эти кристаллы демонстрируют широкий диапазон прозрачности в среднем ИК-диапазоне: от 0,35 мкм до 12 мкм для BGS и от 0,47 мкм до 18 мкм для BGSe. Один из способов улучшения свойств

нелинейных кристаллов заключается в изменении их химического состава путем перехода от тройных к четверным соединениям [9]. Поэтому вскоре после синтеза тройных соединений были получены четверные бариевые халькогениды $\text{BaGa}_2\text{GeS}_6$ (BGGS) и $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (BGGSe) [14,15]. В 2016 г. эти кристаллы были выращены достаточных размеров и высокого оптического качества методом Бриджмена–Стокбаргера [16]. Совсем недавно, в 2022 году, был также синтезирован новый кристалл $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$ (B2GGS) [17,18].

Порог оптического повреждения является важной характеристикой при эксплуатации любого оптического элемента, включая нелинейные кристаллы. Этот параметр определяет максимальный уровень энергии, который можно применить при создании параметрических преобразователей частоты, избегая при этом повреждения материала. При разработке оптических систем с высокой пиковой интенсивностью также крайне важным становится учет нелинейно-оптических свойств среды. Нелинейное поглощение и нелинейная рефракция, возникающие в кристаллах при воздействии интенсивного лазерного излучения, могут вызывать изменения поперечного профиля интенсивности лазерного луча внутри кристалла. Это, в свою очередь, может привести к эффектам самофокусировки, изменения параметров оптического резонатора и, в конечном итоге, к снижению эффективности преобразования.

Целью диссертационной работы является исследование свойств кристаллов бариевых халькогенидов, определение порогов пробоя и измерение нелинейно-оптических характеристик исследуемых кристаллов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Экспериментальное исследование порога лучевой стойкости пластинок кристаллов BGS, BGSe, BGGS, B2GGS и BGGSe к наносекундным импульсам с длиной волны 1 мкм и 2 мкм с различной частотой следования;
- Разработка экспериментальной установки для исследования нелинейно-оптических характеристик методом Z-сканирования. Апробация используемого метода при измерении коэффициента нелинейного показателя преломления для хорошо изученного материала ZnSe;
- Исследование коэффициента нелинейного поглощения и нелинейного преломления кристаллов бариевых халькогенидов и определение их зависимости от интенсивности и частоты повторения импульсов;
- Исследование параметров тепловой линзы и измерение теплового нелинейного показателя преломления кристалла BGGSe. Сравнение полученных результатов с расчетными значениями.

Научная новизна:

1. Впервые проведено систематическое исследование порогов лучевой стойкости кристаллов BGGSe, BGSe, BGS, BGGS, B2GGS к излучению с длиной волны 1 мкм и 2 мкм при наносекундной длительности импульсов.
2. Впервые обнаружено и проведено измерение коэффициента двухфотонного поглощения в кристалле BGGSe для обыкновенной и необыкновенной волны при воздействии наносекундным излучением с длиной волны 1,053 мкм.
3. Впервые были измерены и систематически сопоставлены коэффициенты нелинейного преломления для различных бариевых халькогенидов. Полученные значения сравнивались с расчетами, выполненными на основе теоретической модели Шейха-Бахе с использованием метода разложения Крамерса-Кронига.
4. На основе измеренного значения нелинейного показателя преломления впервые проведен расчет критической мощности излучения для возникновения эффекта самофокусировки в кристаллах бариевых халькогенидов и коэффициентов нелинейной восприимчивости 3-го порядка, что важно для понимания нелинейно-оптических свойств этих материалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При воздействии наносекундными импульсами (4–15 нс) лазерного излучения с длиной волны 1 мкм и 2 мкм при частотах следования импульсов 0,1–1 кГц порог оптического пробоя серосодержащих кристаллов бариевых халькогенидов (6,5–7,5 Дж/см²) вдвое превышает порог оптического пробоя селенсодержащих кристаллов (2,4–3,5 Дж/см²).
2. Коэффициенты нелинейного поглощения для обыкновенной и необыкновенной волны кристалла BGGSe составляют 0,03 см/ГВт и 0,85 см/ГВт, соответственно, и возрастает с увеличением частоты следования импульсов и/или импульсной мощности лазерного излучения наносекундной длительности, что свидетельствует о вкладе процессов, связанных с локальным нагревом кристалла.
3. При облучении кристаллов бариевых халькогенидов лазерными импульсами <10 нс с длиной волны 1 мкм, частотой <200 Гц и интенсивностью ниже порога пробоя, тепловой вклад в изменение показателя преломления пренебрежимо мал: межимпульсный интервал (>5 мс для пучка 210 мкм) превышает время температуропроводности, поэтому тепло уходит в объём без локального нагрева. При этом доминирует электронная составляющая, на порядок превосходящая электрострикционную.

Научная и практическая значимость

Научная значимость проведенного исследования заключается в получении новых знаний о физических характеристиках кристаллов BaGa₄S₇, BaGa₄Se₇, BaGa₂GeSe₆, BaGa₂GeS₆ и Ba₂Ga₈GeS₁₆ и в области физики нелинейных

оптических процессов. Исследование порога лучевой стойкости, нелинейного поглощения и нелинейного преломления позволяют уточнить модели взаимодействия интенсивного лазерного излучения с данными нелинейными кристаллами, а также прогнозировать их поведение под воздействием излучения с высокой пиковой интенсивностью. Полученные в диссертационной работе результаты могут служить базой для компьютерного моделирования при разработке параметрических преобразователей частоты.

Полученные в ходе исследования данные позволяют более точно учитывать нелинейно-оптические эффекты в бариевых халькогенидных кристаллах и определять оптимальные уровни энергии накачки, что способствует разработке высокоэффективных параметрических преобразователей частоты для среднего инфракрасного диапазона. Это открывает возможности для создания на основе исследованных кристаллов более надежных лазерных систем, востребованных в медицине, телекоммуникациях, метрологии и других областях, где требуются стабильные источники когерентного излучения.

Методы исследования

Для определения лучевой стойкости использовалась, широко применяемая при исследовании новых материалов, «R-on-1» методика. Для измерения двухфотонного поглощения и нелинейного преломления была выбрана методика однолучевого Z-сканирования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается использованием признанных научным сообществом экспериментальных методик, проверенных на эталонных образцах, и их согласованностью с теоретическими моделями и литературными данными. Методика Z-сканирования была апробирована на хорошо изученном материале, таком как ZnSe, и полученные значения нелинейного преломления согласуются с опубликованными результатами в пределах экспериментальной погрешности, что подтверждает корректность экспериментального подхода. Экспериментально измеренные нелинейно-оптические характеристики исследованных кристаллов также подтверждаются расчетами на основе теоретической модели Шейха-Бахе с расхождением не более 10 %. Исследования лучевой стойкости проведены в соответствии с международными стандартами ISO 21254 для лазерного повреждения, при этом для ранее изученных материалов наблюдается соответствие с литературными данными, что демонстрирует надежность методики при изучении новых материалов. Изложенный в рамках диссертации материал был представлен на международных научных конференциях, а также основные результаты исследования опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Апробации работы

Основные результаты, полученные в рамках диссертации, докладывались и обсуждались на ряде российских и международных научных симпозиумах и конференциях, таких как: XIV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, 2018); VIII международный симпозиум «Современные проблемы лазерной физики» MPLP-2018 (г. Новосибирск, 2018); 57-я международная научная студенческая конференция «МНСК-2019» (г. Новосибирск, 2019); всероссийская научно-практическая конференция студентов бакалавриата, магистрантов и аспирантов «Youth Contributions to the Breakthroughs into the Future» (г. Новосибирск, 2019); Международная Европейская конференция по лазерам, электрооптике и квантовой электронике «CLEO/Europe-EQEC» (г. Мюнхен, Германия, 2019), 19-я Международная конференция по лазерной оптике «ICLO 2020» (г. Санкт-Петербург, 2020); XVIII молодёжная конференция с международным участием по люминесценции и лазерной физике «LLPH 2021» (г. Иркутск, 2021); Международная конференция «ФИЗИКА.СПБ 2021» (г. Санкт-Петербург, 2021); IX международный симпозиум «Современные проблемы лазерной физики» MPLP-2021 (г. Новосибирск, 2021); 20-я Международная конференция по лазерной оптике «ICLO 2022» (г. Санкт-Петербург, 2022); XIX Международная молодёжная конференция по люминесценции и лазерной физике «LLPH 2023» (г. Иркутск, 2023); 30-я Международная конференция по передовым лазерным технологиям «ALT 2023» (г. Самара, 2023); VIII международная школа молодых учёных по нелинейной фотонике (г. Новосибирск, 2024); первая Всероссийская конференция с международным участием Материалы и технологии фотоники, электроники и нелинейной оптики «МТФ 2024» (Томск, 2024).

Публикации

По теме диссертационной работы было опубликовано 23 работы в печатных изданиях, включая 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 14 тезисов конференций. Список публикаций автора приведён в конце автореферата.

Личный вклад

Все результаты, представленные в данной диссертационной работе, были получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Автор принимал участие в постановке целей и задач, разработке методологии и планировании исследований. Кроме того, автор осуществлял подготовку и проведение экспериментов, анализ и обработку полученных данных, а также готовил материалы для публикаций и представления результатов на научных конференциях.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 118 страницах и содержит 42 рисунка и 11 таблиц. Работа состоит из перечня условных обозначений, введения, четырех глав основной части, заключения и списка литературы (168 наименований).

Автор выражает глубокую благодарность людям, способствующим проведению исследований и написанию данной диссертации, а именно: Костюковой Н.Ю., Бойко А.А., Бадикову В.В., Бадикову Д.В. Образцы кристаллов для исследования были предоставлены Лабораторией новейших технологий Кубанского государственного университета. Памяти доктора физико-математических наук Колкера Д.Б. посвящается особая благодарность за наставничество и неоценимый вклад в научное становление автора.

Содержание работы

Во введении кратко проанализировано состояние научной проблемы и сформулированы цели, задачи и методы диссертационной работы. Обоснованы актуальность, научная новизна и продемонстрирована практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны основные источники излучения и нелинейные кристаллы для генерации в области среднего инфракрасного диапазона. Основное внимание уделяется исследуемым бариевым халькогенидам (BGS, BGSe, BGGs, B2GGs, BGGSe). **В разделе 1.1** подробно описываются технологии роста тройных и четверных бариевых соединений. **Раздел 1.2 и 1.3** посвящен результатам исследования физических и оптических свойств данных материалов. **В разделе 1.4** представлен обзор параметрических преобразователей частоты на основе некоторых из исследуемых кристаллов.

Во второй главе описываются методы и материалы, используемые в диссертационной работе. **Раздел 2.1** посвящен описанию методики исследования лучевой стойкости. **В разделе 2.2** на основе литературных источников [19,20] приводится формула зависимости показателя преломления от длины волны и основные формулы для вычисления углов синхронизма в одноосных кристаллах. **Раздел 2.3** описывает методы определения нелинейного поглощения и нелинейного преломления. **В подразделе 2.3.1** на основе литературных источников [21,22] представлены основные формулы для расчета двух и трех фотонного поглощения, а также коэффициента нелинейного преломления в зависимости от ширины запрещенной зоны материала. **Подраздел 2.3.2** посвящен описанию методики Z-сканирования с открытой и закрытой диафрагмой. В ней описывается метод разложения Гаусса для электрического поля в дальней зоне, прошедшего через образец с $N+1$ фотонным поглощением или нелинейным показателем преломления $2N+1$ порядка. Представлены эффективные формулы для аппроксимации данных при малых

фазовых дисторсиях. На основе статьи [23] приводятся выражения для коэффициента пропускания, зависящего от времени и положения по оси в дальней зоне, в результате влияния на распространение гауссова луча локального нагрева за счет поглощения света. Описана модель параболической линзы для аппроксимации температурного поля и модель абберрационной линзы, в которой для распространения в дальней зоне используется теория дифракции Френеля.

Третья глава посвящена описанию исследования лучевой стойкости поверхностей бариевых халькогенидов к излучению наносекундной длительностью с длиной волны 1 мкм и 2 мкм. В **разделе 3.1** в качестве источника излучения использовался Nd: YLF лазер с длиной волны 1,053 мкм, частота следования импульсов которого может варьироваться от 20 Гц до 4 кГц. Длительность импульсов составила 5,1 нс и 5,3 нс на частоте следования импульсов 100 Гц и 1000 Гц, соответственно. Исследование лучевой стойкости было проведено для указанных частот, а среднее количество импульсов составило ~500. Было выявлено, что порог пробоя в терминах пиковой плотности энергии серосодержащих бариевых халькогенидов (BGS, BGGs, B2GGs) находится в диапазоне 6,1 – 7,4 Дж/см², а селенсодержащих (BGSe, BGGSe) в диапазоне от 2,2 Дж/см² до 3,9 Дж/см² на частоте повторения импульсов 100 Гц. В **разделе 3.2** в качестве источника излучения для исследования порога пробоя пластинок BGSe и BGGSe использовался Ho: YAG лазер с длиной волны 2,091 мкм. Частота следования импульсов данного лазера варьировалась от 2 кГц до 10 кГц. Длительность импульсов на частоте 2 кГц, 5 кГц и 10 кГц составляла 13 нс, 15 нс и 17 нс, соответственно. В результате были определены зависимости вероятности пробоя поверхности пластинок от пиковой плотности энергии. Порог пробоя кристалла BGSe на частоте 2 кГц составил 4,5 Дж/см² и с увеличением частоты повторения импульсов уменьшался более чем в 2 раза. Порог пробоя BGGSe на частоте 2 кГц составил 6,1 Дж/см², а при увеличении частоты до 10 кГц уменьшался почти в 2,5 раза. Для исследования порога пробоя серосодержащих кристаллов BGS и B2GGs использовался параметрический генератор света (ПГС) на основе ниобата лития с регулярной доменной структурой (PPLN) с длиной волны 2,128 мкм. Частота повторения импульсов ПГС составляла 1 кГц, а их длительность 4 нс. В результате порог пробоя пластинки BGS составил 5,8 Дж/см², а пластики B2GGs 6,4 Дж/см². Применяя закон масштабирования, полученные значения порогов пробоя для всех исследуемых пластинок были сопоставлены с данными, измеренными на длине волны 1,053 мкм. После масштабирования пороги пробоя кристаллов BGSe и BGGSe на частоте повторения 2 кГц составили 2,8 Дж/см² и 3,9 Дж/см², соответственно, тогда как для кристаллов BGS и B2GGs на частоте 1 кГц были получены значения 6,7 Дж/см² и 7,4 Дж/см². Сравнение измерений на длинах волн 1 мкм и 2 мкм показывает согласие в пределах погрешности экспериментальных данных для всех образцов, за исключением кристалла BGGSe, где наблюдается отклонение, обусловленное влиянием двухфотонного поглощения на длине волны 1 мкм, приводящего к снижению порога лучевой

стойкости. Проведенный анализ демонстрирует, что основные различия в порогах пробоя обусловлены не столько спектральными характеристиками излучения, сколько временными, а также наличием линий поглощения на определенных длинах волн. В **заключении данной главы** делается вывод о том, что порог пробоя нелинейных кристаллов сульфидов бария превышает порог пробоя их селеносодержащих аналогов более чем в 2 раза при схожих параметрах излучения, что делает эти кристаллы перспективными для систем с высокой пиковой энергией. В свою очередь, селеносодержащим кристаллам присущи более высокие коэффициенты эффективной нелинейности и расширенный диапазон прозрачности, что делает их привлекательными для решения спектроскопических задач. Значения порогов лучевой стойкости для излучения наносекундной длительностью с длиной волны 1 мкм и 2 мкм, полученные в данной работе, а также из литературных источников представлены в таблице 1.

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов методом Z-сканирования. В **разделе 4.1** исследуется нелинейное поглощение кристаллов бариевых халькогенидов. Нелинейное поглощение наблюдалось только в пластинке кристалла BGGSe. На рисунке 1 показана зависимость коэффициента фазового сдвига Q_{02} в кристалле BGGSe от пиковой освещенности при частоте следования импульсов 100 Гц и 1000 Гц для обыкновенной и необыкновенной волны.

Таблица 1. Порог пробоя бариевых халькогенидов.

λ		2 мкм	1 мкм
τ		нс	нс
Нелинейные кристаллы	BGS	14,2 Дж/см ² (2,1 мкм, 30 нс, 1 Гц) [24]	2,4 Дж/см ² (1,064 мкм, 15 нс, 1 Гц) [11]
			3,7/2,9 Дж/см ² (1,064 мкм, 14/1 нс, 0,1/0,5 кГц) [10]
		6,7 Дж/см ² (2,128 мкм, 4 нс, 1 кГц)	7,4/6,4 Дж/см ² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
	BGSe	4,8/3,3/2,1 Дж/см ² (2,091 мкм, 15 нс, 2/5/10 кГц)	2,5/2,3 Дж/см ² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
		3,3 Дж/см ² (2,091 мкм, 27 нс, 0,5 кГц) [25]	4,1/4/3,6 Дж/см ² (1,064 мкм, 16 нс, 0,1/0,15/0,2 кГц) [26]
		2,1 Дж/см ² (2,091 мкм, 35 нс, 1 кГц) [27]	1,4/1 Дж/см ² (1,064 мкм, 14/1 нс, 0,1/0,5 кГц) [28]
			5,6 Дж/см ² (1,064 мкм, 5 нс, 1 Гц) [24]
	BGGSe	6,5/4,3/2,7 Дж/см ² (2,091 мкм, 15 нс, 2/5/10 кГц)	3,7/2,7 Дж/см ² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
	BGGS		6,8/7 Дж/см ² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
	B2GGS	7,4 Дж/см ² (2,128 мкм, 4 нс, 1 кГц)	6,9/7 Дж/см ² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)

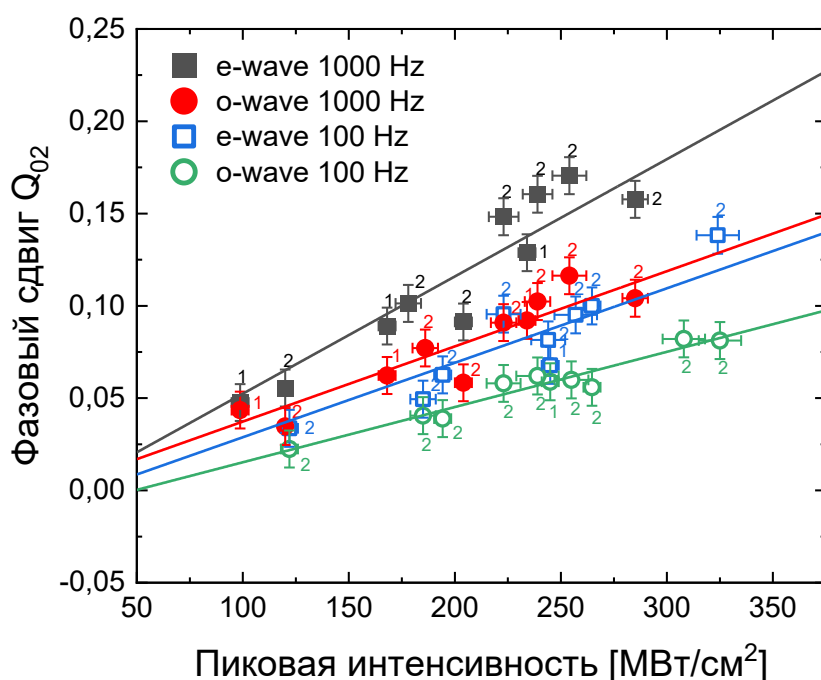


Рисунок 1. Зависимость фазового сдвига Q_{02} от пиковой интенсивности при частоте следования импульсов для двух пластин BGGSe. Пустые и закрашенные кружки соответствуют о-волне на частотах 100 Гц и 1000 Гц. Пустые и закрашенные квадраты соответствуют е-волне на частоте 100 Гц и 1000 Гц, соответственно. Числами 1 и 2 обозначены BGGSe пластинки разной длины и ориентации.

График демонстрирует, что фазовый сдвиг необыкновенной волны превосходит фазовый сдвиг обыкновенной волны, коррелируя с шириной запрещенной зоны исследуемого кристалла для различных поляризаций. Поскольку энергия фотона для о-волны лежит между $E_g/3 < \hbar\omega < E_g/2$, мы предположили, что фазовый сдвиг вызван трехфотонным поглощением (3ФП). Использование формул для 3ФП, а также 2ФП+3ФП [29] не дало удовлетворительного результата, близкого к теории. Согласно теории Веррета [21] трехфотонное поглощение для обыкновенной и необыкновенной волн должно составлять $\sim 0,0098 \text{ см}^3/\text{ГВт}^2$ и $\sim 0,0086 \text{ см}^3/\text{ГВт}^2$, соответственно. Таким образом, мы предполагаем, что фазовый сдвиг, измеренный методом Z-сканирования с открытой апертурой для обеих волн, в основном происходил за счет 2ФП. Различия, наблюдаемые между теоретическими расчетами и экспериментальными результатами, могут быть обусловлены расхождением между использованной в расчетах шириной запрещенной зоны и фактической шириной запрещенной зоны исследуемого кристалла. Используя линейное приближение, коэффициент двухфотонного поглощения на частоте повторения импульсов 100 Гц и пиковой интенсивности 50 МВт/см² для о-волны и е-волны составил 0,03 см/ГВт и 0,85 см/ГВт, соответственно. Было замечено, что коэффициент двухфотонного поглощения для частоты 1000 Гц выше, чем для частоты 100 Гц, и растет быстрее с увеличением пиковой интенсивности.

На рисунке 2 представлена зависимость фазового сдвига Q_{02} от частоты следования импульсов при пиковой интенсивности $\sim 235 \text{ МВт/см}^2$. Фазовый сдвиг линейно увеличивается с частотой следования импульсов; мы предполагаем, что этот эффект связан с локальным нагревом и, как следствие, уменьшением эффективной ширины запрещенной зоны [30].

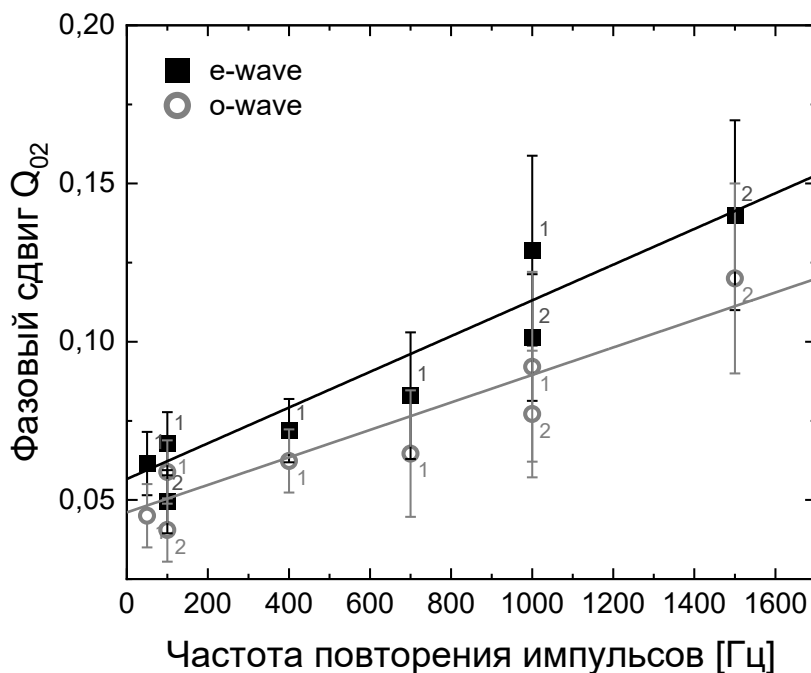


Рисунок 2. Зависимость фазового сдвига от частоты следования импульсов для обыкновенной (пустые круги) и необыкновенной (закрашенные квадраты) волн на пластинах BGGSe1 и BGGSe2.

Раздел 4.2 посвящен измерениям нелинейного преломления бариевых халькогенидов методом однолучевого Z-сканирования с закрытой диафрагмой. Вначале для верификации экспериментальной установки демонстрируется нормированное пропускание от положения в эталонном образце поликристаллического окна из ZnSe. По найденному аксиальному фазовому сдвигу вычисляется нелинейный коэффициент преломления. Значения соответствующих параметров аппроксимирующей функции, были полученные с помощью метода наименьших квадратов. Измеренный нелинейный показатель преломления при частоте следования импульсов 1000 Гц и пиковой интенсивностью 392 МВт/см^2 , определенный тремя способами, лежит в диапазоне от $3,3 \times 10^{-14} \text{ см}^2/\text{Вт}$ до $3,6 \times 10^{-14} \text{ см}^2/\text{Вт}$. Полученные значения согласуются с литературными данными [31,32] в пределах экспериментальной погрешности ($\pm 10\%$). Далее при аппроксимации использовался подход с оптимизацией всех параметров функции методом наименьших квадратов. Из каждой группы данных нормированного пропускания с закрытой диафрагмой было обнаружено, что за впадиной следует пик. Это указывает на положительный знак нелинейного показателя преломления, что может быть следствием самофокусировки. Также для всех кристаллов было замечено

увеличение нормированного пропускания при частоте следования импульсов 1000 Гц. Более подробно данная зависимость была изучена на кристалле BGGSe.

На рисунке 3 показана зависимость нелинейного показателя преломления от частоты повторения импульсов и средней мощности. Видно, что нелинейный показатель преломления линейно масштабируется в зависимости от частоты повторения лазерных импульсов и средней мощности. Эта зависимость позволяет предположить, что термоиндуцированные эффекты играют существенную роль в наших результатах экспериментов по Z-сканированию с закрытой апертурой при частоте 1000 Гц. На примере кристалла BGGSe показано, что для корректного определения электронной составляющей изменения показателя преломления необходимо, чтобы время между импульсами было больше, чем характерное время термодиффузии.

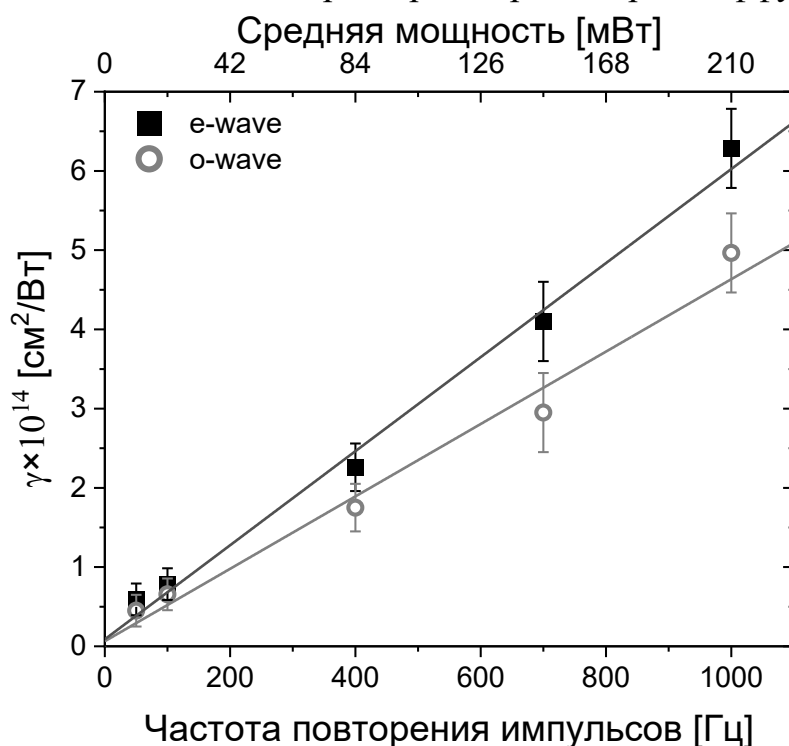


Рисунок 3. Нелинейный показатель преломления (γ) в зависимости от частоты и средней мощности лазерного луча для необыкновенной (закрашенные квадраты) и обыкновенной (пустые круги) волн, полученный при Z-сканировании пластинки BGGSe при пиковой интенсивности 240 МВт/см².

Поэтому нелинейный показатель преломления в таблице 2 указывается только для частоты следования импульсов 100 Гц.

В разделе 4.3 описываются измерения тепловой составляющей изменения показателя преломления в кристалле BGGSe методом Z-сканирования с закрытой диафрагмой. Для этого использовался непрерывный Nd: YAG лазер с длиной волны 1,064 мкм. Экспериментальные кривые были аппроксимированы по методу разложения Гаусса, с помощью модели параболической линзы и абберрационной линзы. Используя известные тепловые и термооптические

параметры кристалла BGGSe [33,34] был оценен коэффициент n_{2T} . Для обыкновенной и необыкновенной волн при радиусе пучка 53.5 мкм и коэффициенте линейного поглощения $a=0,03 \text{ см}^{-1}$ он составил $2,5 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$ и $2,16 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{Вт}$. Все модели дают близкие результаты n_{2T} к теоретически оцененным, однако метод разложения по Гауссу дает наиболее близкие значения z_R к экспериментальным, измеренным с помощью метода ножа Фуко.

Раздел 4.4 посвящен теоретическим расчетам нелинейного преломления и нелинейного поглощения в зависимости от отношения энергии фотона к ширине запрещенной зоны. Графическое сравнение дисперсионной функции $G_2(\hbar\omega/E_g)$ с измеренными значениями n_2 показано на рисунке 4. Звёздочками на графике показаны коэффициенты нелинейного показателя преломления, полученные в данной работе. Для сравнения на том же графике также приведены данные для полупроводников, полученные методом Z-сканирования с пикосекундными источниками при длинах волн 1,06 мкм и 0,53 мкм [22] (пустые квадраты), треугольники соответствуют данным из [35,36], а ромбы указывают на значения, полученные в работе [37].

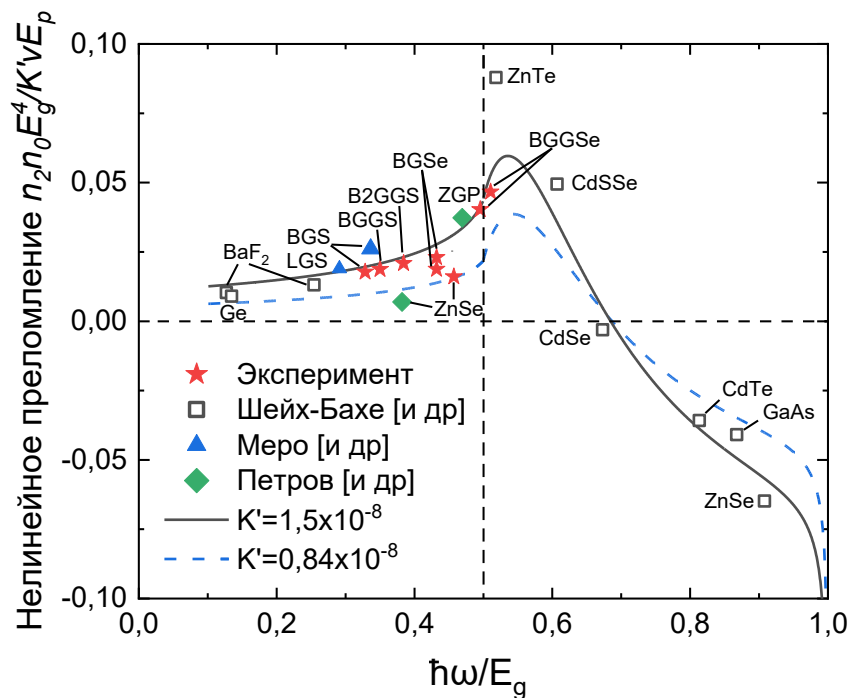


Рисунок 4. Дисперсия нелинейного показателя преломления n_2 . Данные для n_2 масштабируются как $n_2 n_0 E_g^4 / K' \sqrt{E_p}$. Сплошная линия — функция $G(\hbar\omega/E_g)$ двухзонной модели полупроводника с использованием данных 2ФП для подгонки к константе K' .

Из полученных графиков видно, что измеренные значения хорошо ложатся на дисперсионную функцию $G_2(\hbar\omega/E_g)$, что согласуется с теорией Шейх-Бахе и др. [38]. Среднее отклонение измеренных значений составило $\sim 10\%$ от теоретических. В таблице 2 показаны измеренные значения n_2 для бариевых халькогенидов и теоретические ожидаемые значения.

Таблица 2. Экспериментально измеренные и теоретически предсказанные нелинейные показатели преломления бариевых халькогенидов, а также параметры, использованные в расчетах.

Материал	Поляризация	E_g (эВ)	α_0 см^{-1}	$\gamma \times 10^{-14}$ $\text{см}^2/\text{Вт}$	$n_2(\text{эксперимент})$ $\times 10^{-11}$ (СГСЭ)	$n_2(\text{расчетное})$ $\times 10^{-11}$ (СГСЭ)	$P_{\text{кр}}$ кВт
BGGSe ($\theta=30^\circ$, $\phi=30^\circ$)	О	2,38	0,03	5,5	3,4	2,9	11,6
	Е	2,31		6,5	4,3	4,1	9,1
BGSe ($\theta=46.46^\circ$, $\phi=0^\circ$)	О	2,73	0,18	1,6	0,96	1,1	40,7
	Е	2,73		1,8	1,10	1,1	35,8
B2GGS	—	2,95	0,06	1,14	0,6	0,8	55,9
BGGS	—	3,37	0,01	0,78	0,43	0,4	89,7
BGS	—	3,59	0,01	0,58	0,32	0,29	122

В заключении представлены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы:

1. Порог лучевой стойкости кристаллов BGSe, BGS, BGGS, BGGSe и B2GGS для излучения с длиной волны 1 мкм и длительностью импульсов 5,1 нс при частоте повторения импульсов 100 Гц составил 2,34 Дж/см² (459 МВт/см²); 7,4 Дж/см² (1,45 ГВт/см²); 7 Дж/см² (1,4 ГВт/см²); 3,66 Дж/см² (717 МВт/см²); 7 Дж/см² (1,4 ГВт/см²) соответственно. Порог пробоя нелинейных кристаллов сульфидов бария превышает порог пробоя их селеносодержащих аналогов более чем в 2 раза при схожих параметрах излучения.

2. Порог пробоя для импульсов с длительностью 13 нс на длине волны 2,091 мкм при частоте повторения импульсов 2 кГц для кристаллов BGSe и BGGSe составил 4,5 Дж/см² (346 МВт/см²); 6,1 Дж/см² (470 МВт/см²). А при увеличении частоты до 10 кГц порог пробоя уменьшался почти в 2 и 2,5 раза соответственно. Порог пробоя серосодержащих кристаллов BGS и B2GGS для импульсов с длительностью 4 нс на длине волны 2,128 мкм и частоте повторения 1 кГц составил 5,8 Дж/см² (1,45 ГВт/см²) и 6,4 Дж/см² (1,6 ГВт/см²). Полученные данные демонстрируют существенное влияние частоты повторения импульсов на оптическую прочность материалов, что связано с эффектом накопления тепла. После нормировки на единую длительность импульсов установлено, что серосодержащие кристаллы обладают в 1,8 раз более высоким порогом пробоя по сравнению с кристаллом BGGSe и более чем в 2 раза по сравнению с кристаллом BGSe.

3. Двухфотонное поглощение наблюдалось только в кристалле BGGSe. Показано, что коэффициент двухфотонного поглощения для кристалла BGGSe линейно увеличивается с увеличением пиковой интенсивности. Используя линейную аппроксимацию, были определены коэффициенты двухфотонного поглощения для о-волны и е-волны при частоте повторения импульсов 0,1 кГц и

пиковой интенсивности 50 МВт/см^2 , они составили $0,03 \text{ см/ГВт}$ и $0,85 \text{ см/ГВт}$ соответственно.

4. С помощью непрерывного Nd:YAG лазера было проведено измерение теплового нелинейного показателя преломления BGGSe кристалла. На основе известных теплофизических и термооптических дисперсионных коэффициентов кристалла BGGSe был рассчитан теоретический коэффициент нелинейного термического преломления n_{2T} . Расхождение между экспериментально полученными значениями и расчетными составило не более 20%, что свидетельствует о достоверности экспериментальных результатов.

5. С помощью Z-сканирования с закрытой диафрагмой были измерены нелинейные показатели преломления кристаллов бариевых халькогенидов. Измеренные данные на частоте 0,1 кГц показали в среднем $\sim 10\%$ отклонения от теоретических значений, полученных с использованием модели Шейха-Бахе. Проведенные исследования нелинейно-оптических свойств показали, что использование наносекундного лазерного источника позволяет получать достоверные данные об электронной составляющей нелинейного отклика, однако необходимо учитывать вклад тепловых и электрострикционных эффектов.

6. На основе измеренного значения нелинейного показателя преломления была рассчитана критическая пиковая мощность и нелинейная восприимчивость 3-го порядка для бариевых халькогенидов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Kostyukova N. Y., Boyko A. A., **Erushin E. Y.**, Kostyukov A. I., Badikov V. V., Badikov D. V., and Kolker D. B. Laser-induced damage threshold of BaGa₄Se₇ and BaGa₂GeSe₆ nonlinear crystals at 1.053 μm // J. Opt. Soc. Am. B. – 2019. – Vol. 36. – PP. 2260-2265.
2. Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Eranov I.D., Antipov O.L., Kolker D.B., Kostyukov A.I., **Erushin E.Y.**, Miroshnichenko I.B., Badikov D.V., Badikov V.V. Laser-induced damage threshold of the nonlinear crystals BaGa₄Se₇ and BaGa₂GeSe₆ at 2091 nm in the nanosecond regime // J. Opt. Soc. Am. B. – 2020. – Vol. 37, Issue 9. – P. 2655-2659.
3. Бойко А.А., Костюкова Н.Ю., **Ерушин Е.Ю.**, Мирошниченко И.Б., Колкер Д.Б. Выбор оптимальных условий фазового синхронизма для полупроводниковых нелинейных кристаллов при каскадной накачке в области 2 мкм // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64. № 8 (765). – С. 126-130.
4. Kostyukova N., **Erushin E.**, Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. Barium Chalcogenide Crystals: A Review // Photonics. – 2024. – Vol. 11, Issue 3. – P. 281.
5. **Erushin E.**, Kostyukova N., Boyko A., Loginova A., Safaraliev G., Shevyrdyaeva G., Badikov D. Ba₂Ga₈GeS₁₆: New nonlinear optical crystals with high laser-induced damage threshold for parametric down-conversion in mid-IR // Appl. Phys. B. – 2024. – Vol. 130. – P. 10.
6. **Erushin E.Yu.**, Kostyukova N.Yu., Boyko A.A., Miroshnichenko I.B., Verbovaty D.M., Kiryakova A.Yu. Investigation of the nonlinear refractive index of polycrystalline zinc selenide by single-beam Z-Scan // Instruments and Experimental Techniques – 2024 – Vol. 67, Issue 2. – P. 298–302
7. **Erushin E.Y.**, Boyko A.A., Shevyrdyaeva G.S., Badikov D.V., Kostyukova N.Y. Measurement of nonlinear refraction and absorption coefficient in BaGa₂GeSe₆ crystal // Optical Materials. – 2024. – Vol. 154, Issue. – P. 115745.
8. **Erushin E.Y.**, Boyko A.A., Shevyrdyaeva G.S., Badikov D.V., Kostyukova N.Y. Nonlinear absorption and refraction study of barium chalcogenide crystals // Optical Materials. – 2024. – Vol. 157, part 2. – P. 116275.
9. **Erushin E.**, Badikov D., Kostyukov A., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Safaraliev G. and Kostyukova N. Laser-induced damage threshold of sulfur-containing crystals of barium chalcogenides // Appl. Phys. B. – 2025. – Vol. 131, Issue 1. – P. 11.

Публикации в сборниках международных и российских конференций:

1. **Ерушин Е. Ю.**, Малахов Д. А., Костюкова Н. Ю., Бойко А.А., Колкер Д.Б. Модельные исследования перестроечных характеристик параметрических генераторов света на основе нового нелинейного кристалла - четверного бариевого халькогенида // Сборник трудов XIV Международной научно-

- технической конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018 Новосибирск, 2018. – С. 30-35.
2. Kostyukova N., Boyko A., **Erushin E.**, Malakhov D., Kolker D. Frequency down-conversion of solid-state laser sources in barium chalcogenide nonlinear crystals // The VIII International Symposium Modern problems of laser physics. Novosibirsk, 2018. – P. 145-146.
 3. **Erushin E.** Study of a novel nonlinear crystal - quaternary barium chalcogenide // Youth Contributions to the Breakthroughs into the Future: Труды всероссийской научно-практической конференции студентов бакалавриата, магистрантов и аспирантов магистрантов, Новосибирск, 2019. – С. 87-90.
 4. **Ерушин Е. Ю.** Исследование лучевой стойкости кристалла BGGSe // Материалы 57-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2019. Фотоника и квантовые оптические технологии, Новосибирск, 2019. – С. 15.
 5. Kostyukova N. Yu., Boyko A. A., **Erushin E. Yu.**, Kolker Dmitry B., Antipov O. L., Eranov I. D., Isaenko L. I., Badikov D. V. and Badikov V. V. Comparative Analysis of Optical Damage in Advanced Barium Chalcogenides Nonlinear Crystals at 1- μ m and 2- μ m // CLEO/Europe-EQEC Conference, 23-27 June, Munich 2019.
 6. Kostyukova N. Y., Boyko A. A., Eranov I. D., Kolker D.B., Antipov O.L., **Erushin E.Y.**, Kostyukov A.I., Badikov D.V., Badikov V.V. Laser-Induced Damage Threshold of Barium Chalcogenides Crystals at 2091 nm // International Conference on Laser Optics, St. Petersburg, 2020. – P. 9285495.
 7. **Ерушин Е. Ю.**, Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Колкер Д.Б., Бадиков Д.В., Бадиков В.В. Измерение нелинейно-оптических свойств кристалла бариевого халькогенида // Материалы XVIII молодежной конференции с международным участием по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, 2021. – С. 57.
 8. **Ерушин Е. Ю.**, Костюкова Н. Ю., Грибачева Ю. С. [и др.] Исследование нелинейно-оптических характеристик кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ // Сборник тезисы докладов международной конференции Физика.СПб, Санкт-Петербург, 2021. – С. 239-241.
 9. Kostyukova N. Y., **Erushin E. Y.**, Boyko A. A., Kolker D.B., Badikov D.V., Badikov V.V. Investigation of the nonlinear refraction of a barium chalcogenide crystal // The IX International Symposium technical digest Modern problems of laser physics - MPLP-2021, Novosibirsk, 2021. – P. 106.
 10. **Ерушин Е. Ю.**, Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Баранова Е.В., Вербоватый Д.М., Бадиков Д.В. Исследование лучевой стойкости серосодержащих кристаллов бариевых халькогенидов // Материалы XIX Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, 2023. – С. 85.
 11. **Ерушин Е. Ю.**, Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Баранова Е.В., Вербоватый Д.М., Бадиков Д.В. Исследование порога лучевой стойкости нового кристалла $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$ // Материалы XIX Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, 2023. – С. 84.

12. Kostyukova N. Y., **Erushin E. Y.**, Boyko A. A., Kostyukov A.I., Kiryakova A., Badikov D.V. Nonlinear absorption and refraction study of quaternary barium chalcogenide $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ crystal at 1053 nm in nanosecond regime // The 30th International Conference on Advanced Laser Technologies – ALT 2023, Samara, 2023. – P. LS-O-9.
13. **Ерушин Е.Ю.**, Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Шевырдяева Г.С., Бадиков Д.В. Исследование нелинейного показателя преломления бариевых халькогенидов // Материалы и технологии фотоники, электроники и нелинейной оптики – МТФ 2024, Томск, 2024. – С. 8.
14. **Ерушин Е. Ю.**, Костюкова Н. Ю., Бойко А. А., Шевырдяева Г. С., Бадиков Д.В. Эффекты термолинзирования и нелинейный показатель преломления кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ // Нелинейная фотоника: материалы VIII Международной школы молодых ученых– Новосибирск, 2024. – С. 22-23.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2013. – Т. 130. – С. 4–50.
2. Harren F.J.M., Mandon J., Cristescu S.M. Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring // *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. — John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
3. Schilt S., Thevenaz L., Nikles M. et al. Ammonia monitoring at trace level using photoacoustic spectroscopy in industrial and environmental applications // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2004. – Т. 60. – № 14. – С. 3259–3268.
4. Kistenev Y.V., Borisov A.V., Kuzmin D.A. et al. Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic // *Journal of Biomedical Optics*. – 2017. – Т. 22 – № 1. – С. 017002.
5. Litvinova K.S., Rafailov I.E., Dunaev A.V. et al. Non-invasive biomedical research and diagnostics enabled by innovative compact lasers // *Progress in Quantum Electronics*. – 2017. – Т. 56. – С. 1–14.
6. Ventura A., Slimen F.B., Lousteau J. et al. Flexible Mid-IR fiber bundle for thermal imaging of inaccessible areas // *Optics Express*. – 2019. – Т. 27 – № 15. – С. 20259–20272.
7. Aleĭnikov V.S., Belyaev V.P., Devyatkov N.D. et al. Applications of a carbon monoxide laser in surgery // *Soviet Journal of Quantum Electronics*. – 1983. – Т. 13 – № 10. – С. 1304.
8. Edwards G.S., Pearlstein R.D., Copeland M.L. et al. 6450 nm wavelength tissue ablation using a nanosecond laser based on difference frequency mixing and stimulated Raman scattering // *Optics Letters*. – 2007. – Т. 32. – № 11. – С. 1426–1428.
9. Isaenko L.I., Yelisseyev A.P. Recent studies of nonlinear chalcogenide crystals for the mid-IR // *Semiconductor Science and Technology*. – 2016. – Т. 31. – № 12. – С. 1–24.
10. Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G. et al. BaGa₄S₇: wide-bandgap phase-matchable nonlinear crystal for the mid-infrared // *Optical Materials Express*. – 2011. – Т. 1. – № 3. – С. 316.
11. Lin X., Zhang G., Ye N. Growth and characterization of BaGa₄S₇: A new crystal for mid-IR nonlinear optics // *Crystal Growth and Design*. – 2009. – Т. 9. – № 2. – С. 1186–1189.
12. Badikov V., Badikov D., Shevyrdyaeva G. et al. Phase-matching properties of BaGa₄S₇ and BaGa₄Se₇: Wide-bandgap nonlinear crystals for the mid-infrared // *Physica Status Solidi*. – 2011. – Т. 5. – № 1. – С. 31–33.
13. Yao J., Mei D., Bai L. et al. BaGa₄Se₇: A new congruent-melting IR nonlinear optical material // *Inorganic Chemistry*. – 2010. – Т. 49. – № 20. – С. 9212–9216.

14. Yin W., Feng K., He R. et al. BaGa₂MQ₆ (M = Si, Ge; Q = S, Se): a new series of promising IR nonlinear optical materials // Dalton Transactions. – 2012. – Т. 41. – № 18. – С. 5653–5661.
15. Lin X., Guo Y., Ye N. BaGa₂GeX₆(X=S, Se): New mid-IR nonlinear optical crystals with large band gaps // Journal of Solid-State Chemistry. – 2012. Т. 195. – С. 172–177.
16. Badikov V.V., Badikov D.V., Laptev V.B. et al. Crystal growth and characterization of new quaternary chalcogenide nonlinear crystals for the mid-IR: BaGa₂GeS₆ and BaGa₂GeSe₆ // Optical Materials Express. – 2016. – Т. 6. – № 9. – С. 2933–2938.
17. Badikov V.V., Badikov D.V., Shevyrdyaeva G.S. et al. Optical and generation characteristics of new nonlinear Ba₂Ga₈GeS₁₆ and Ba₂Ga₈(GeSe₂)S₁₄ crystals for the mid-IR range // Quantum Electronics. – 2022. – Т. 52. – № 3. – С. 296.
18. Badikov V.V., Badikov D.V., Shevyrdyaeva G.S. et al. Crystal growth and characterization of a new quaternary hexagonal nonlinear crystal for the mid-IR: Ba₂Ga₈GeS₁₆ // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Т. 907. – С. 164378.
19. Гурзадян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. Нелинейно оптические кристаллы. Свойства и применение в квантовой электронике. – Москва: М. Радио и связь, 1991. – 160 с. – ISBN 5-256-00859-5.
20. Sellmeier W. Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen // Annalen der Physik. – 1871. – Т. 219. – № 6. – С. 272–282.
21. Wherrett B.S. Scaling rules for multiphoton interband absorption in semiconductors // Journal of the Optical Society of America B. – 1984. – Т. 1. – № 1. – С. 67.
22. Sheik-Bahae M., Hutchings D.C., Hagan D.J. et al. Dispersion of bound electron nonlinear refraction in solids // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1991. – Т. 27. – № 6. – С. 1296–1309.
23. Carter C.A., Harris J.M. Comparison of models describing the thermal lens effect // Applied Optics. – 1984. – Т. 23. – № 3. – С. 476.
24. Guo Y., Zhou Y., Lin X. et al. Growth and characterizations of BaGa₄S₇ crystal // Optical Materials. – 2014. – Т. 36. – № 12. – С. 2007–2011.
25. Yuan J.-H., Li C., Yao B.-Q. et al. High power, tunable mid-infrared BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped by a 2.1 μm Ho: YAG laser // Optics Express. – 2016. – Т. 24. – № 6. – С. 6083–6087.
26. Kolker D.B., Kostyukova N.Y., Boyko A.A. et al. Widely tunable (2.6-10.4 μm) BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Nd: YLiF₄ laser // Physics Communication. – 2018. – Т. 2. – С. 10–12.
27. Zhao B., Chen Y., Yao B. et al. High-efficiency, tunable 8-9 μm BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 2.1 μm // Optical Materials Express. – 2018. – Т. 8. – № 11. – С. 3332–3337.
28. Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Badikov V. et al. Widely tunable in the mid-IR BaGa₄Se₇ optical parametric oscillator pumped at 1064 nm // Optics Letters. – 2016. – Т. 41. – № 15. – С. 3667.

29. Gu B., Wang J., Chen J. et al. Z-scan theory for material with two- and three-photon absorption // *Optics Express*. – 2005. – T. 13. – № 23. – C. 9230.
30. Passler R. Basic Model Relations for Temperature Dependencies of Fundamental Energy Gaps in Semiconductors // *Physica Status Solidi (b)*. – 1997. – T. 200. – № 1. – C. 155–172.
31. Said A.A., Sheik-Bahae M., Hagan D.J. et al. Determination of bound-electronic and free-carrier nonlinearities in ZnSe, GaAs, CdTe, and ZnTe // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1992. – T. 9. – № 3. – C. 405.
32. Durand M., Houard A., Lim K. et al. Study of filamentation threshold in zinc selenide // *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*. – 2014. – T. 2014.
33. Exner G., Susner M.A., Murray J. et al. Thermo-mechanical properties of BaGa₂GeS(e)₆ nonlinear optical crystals // *Optical Materials Express*. 2023. – T. 13. – № 5. – C. 1335.
34. Kato K., Miyata K., Okamoto T. et al. Thermo-optic dispersion formula for BaGa₂GeSe₆ // *Applied Optics*. – 2019. – T. 58. – № 35. – C. 9709.
35. Mero M., Wang L., Chen W. et al. Laser-induced damage of nonlinear crystals in ultrafast, high-repetition-rate, mid-infrared optical parametric amplifiers pumped at 1 μm // *Optical Materials for High-Power Lasers*. – 2019. – T. 11063. – C. 1106307.
36. Mero M., Petrov V., Heiner Z. Progress in ultrafast, mid-infrared optical parametric chirped pulse amplifiers pumped at 1 μm // *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices SPIE*. – 2020. – T. 11264. – C. 112640F.
37. Rotermund F., Petrov V., Noack F., Schunemann P. Characterization of ZnGeP₂ for parametric generation with near-infrared femtosecond pumping // *Fiber and Integrated Optics*. – 2001. – T. 20. – № 2. – C. 139–150.
38. Sheik-Bahae M., Hagan D.J., Van Stryland E.W. Dispersion and band-gap scaling of the electronic Kerr effect in solids associated with two-photon // *Physical Review Letters*. – 1990. – T. 65. – C. 96.