УТВЕРЖДАЮ

Директор ИОА СО РАН
чл.-корр. РАН, д. ф.-м. н.



И.В. Пташник

16 октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ерушина Евгения Юрьевича «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

Диссертационная работа посвящена исследованию нелинейно-оптических свойств кристаллов бариевых халькогенидов, перспективных для параметрического преобразования частоты в среднем инфракрасном диапазоне. В работе определены пороги лазерного пробоя и исследованы нелинейное поглощение и нелинейное преломление ряда новых кристаллов. Полученные результаты имеют значение для разработки эффективных перестраиваемых источников среднего ИК-излучения.

Актуальность темы. Разработка перестраиваемых источников когерентного излучения среднего инфракрасного диапазона является одной из актуальных задач современной фотоники благодаря их широкому применению в газоанализе, экологическом мониторинге, медицине, дистанционном зондировании и лазерных технологиях. Одним из наиболее

эффективных способов генерации такого излучения является параметрическое преобразование частоты, возможности которого во многом определяются свойствами используемых нелинейных кристаллов. Перспективными материалами являются кристаллы бариевых халькогенидов, обладающие широким диапазоном прозрачности и высокой нелинейностью. Для их практического применения и определения безопасных режимов работы необходимы исследования порогов лазерного пробоя, нелинейного поглощения и нелинейного преломления, поскольку эти параметры определяют предельные режимы эксплуатации и эффективность параметрических преобразователей частоты. Получение соответствующих экспериментальных данных имеет важное значение для разработки надежных и эффективных источников среднего ИК-излучения.

Цель работы состояла в исследовании оптических свойств кристаллов бариевых халькогенидов, включающем определение порогов лазерного пробоя, измерение нелинейно-оптических характеристик и исследование тепловых эффектов, определяющих возможность их применения в параметрических преобразователях частоты среднего ИК-диапазона. Для достижения поставленной цели проведены экспериментальные исследования порогов лучевой стойкости кристаллов $BaGa_4S_7$ (BGS), $BaGa_4Se_7$ (BGSe), $BaGa_2GeS_6$ (BGGS), $Ba_2Ga_8GeS_{16}$ (B2GGS) и $BaGa_2GeSe_6$ (BGGSe) при воздействии наносекундных импульсов с длинами волн 1 и 2 мкм, разработана и апробирована экспериментальная установка для измерения нелинейно-оптических характеристик методом Z-сканирования, исследованы коэффициенты нелинейного поглощения и нелинейного преломления и их зависимости от интенсивности и частоты повторения импульсов, а также изучены параметры тепловой линзы и теплового нелинейного показателя преломления кристалла BGGSe с сопоставлением экспериментальных и расчетных результатов.

Структура и основные результаты работы. Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, четырех глав основной части, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 118 страниц; список используемых источников состоит из 168 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан обзор основных источников когерентного излучения среднего ИК-диапазона и нелинейных кристаллов, используемых для параметрических преобразователей частоты, с акцентом на кристаллы бариевых халькогенидов. Рассмотрены технологии выращивания тройных и четверных соединений данного класса, приведены сведения об их физических и оптических свойствах, а также обзор параметрических преобразователей частоты, реализованных на основе исследуемых кристаллов.

Во **второй главе** описаны использованные в работе методы и материалы. Приведена методика измерения лучевой стойкости, формулы для расчёта показателя преломления и углов синхронизма в одноосных кристаллах, а также теоретические основы методов определения нелинейного поглощения и нелинейного преломления, включая методику однолучевого Z-сканирования с открытой и закрытой диафрагмой и модели учёта термооптических эффектов (параболическая и аберрационная линзы, дифракция Френеля в дальней зоне).

В **третьей главе** представлены результаты исследования лучевой стойкости поверхностей кристаллов бариевых халькогенидов к наносекундному излучению с длиной волны 1 и 2 мкм при различных частотах следования импульсов (от единиц герц до 10 кГц). Показано, что порог пробоя серосодержащих кристаллов (BGS, BGGS, B2GGS) в 2 раза

превышает порог пробоя селенсодержащих аналогов (BGSe, BGGSe) при сопоставимых параметрах излучения, а увеличение частоты следования импульсов приводит к существенному (в 2–2,5 раза) снижению порога пробоя вследствие эффектов накопления тепла.

В **четвёртой главе** методом Z-сканирования исследованы нелинейное поглощение и нелинейное преломление кристаллов бариевых халькогенидов. Впервые обнаружено и измерено двухфотонное поглощение в кристалле BGGSe для обыкновенной и необыкновенной волн; получены и систематически сопоставлены с теоретической моделью Шейха-Бахе значения нелинейного показателя преломления для исследованных кристаллов; исследован тепловой вклад в изменение показателя преломления кристалла BGGSe; на основе измеренных значений нелинейного преломления рассчитаны критическая мощность самофокусировки и коэффициенты нелинейной восприимчивости третьего порядка.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

К **наиболее важным результатам работы** относятся следующие:

1. Установлено, что порог оптического пробоя серосодержащих кристаллов бариевых халькогенидов (BGS, BGGS, B2GGS) при воздействии наносекундных импульсов (4–15 нс) с длиной волны 1 и 2 мкм в диапазоне частот следования 0,1–1 кГц составляет 6,5–7,5 Дж/см^2, что вдвое превышает порог пробоя селенсодержащих кристаллов (BGSe, BGGSe), для которых он составляет 2,4–3,5 Дж/см^2.

2. Показано, что увеличение частоты следования импульсов приводит к существенному (в 2–2,5 раза) снижению порога пробоя кристаллов BGSe и BGGSe вследствие эффектов накопления тепла, что необходимо учитывать при проектировании источников с высокой частотой повторения импульсов.

3. Впервые обнаружено и измерено двухфотонное поглощение в кристалле BGGSe: коэффициенты нелинейного поглощения для

обыкновенной и необыкновенной волн составили 0,03 см/ГВт и 0,85 см/ГВт соответственно, причём их величина возрастает с увеличением частоты следования импульсов, что свидетельствует о вкладе локального нагрева кристалла.

4. Методом Z-сканирования измерены и систематически сопоставлены коэффициенты нелинейного преломления для пяти кристаллов бариевых халькогенидов; полученные значения согласуются с расчётами по теоретической модели Шейха-Бахе с расхождением не более 10%.

5. Показано, что при облучении кристаллов импульсами длительностью <10 нс, частотой <200 Гц и интенсивностью ниже порога пробоя тепловой вклад в изменение показателя преломления пренебрежимо мал, а в измеренном нелинейном отклике доминирует электронная составляющая, на порядок превосходящая электрострикционную.

6. На основе измеренных значений нелинейного показателя преломления впервые для данной группы кристаллов рассчитаны критическая мощность излучения, необходимая для возникновения эффекта самофокусировки, и коэффициенты нелинейной восприимчивости третьего порядка.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем: 1) впервые проведено систематическое сравнительное исследование порогов лучевой стойкости пяти кристаллов бариевых халькогенидов на длинах волн 1 и 2 мкм в наносекундном диапазоне длительностей импульсов; 2) впервые обнаружено и измерено двухфотонное поглощение в кристалле BGGSe; 3) впервые систематически измерены и сопоставлены с теоретической моделью коэффициенты нелинейного преломления для всей исследуемой группы кристаллов; 4) на основе измеренных значений нелинейного показателя преломления впервые рассчитаны критическая мощность самофокусировки и нелинейная восприимчивость третьего порядка для данных материалов.

Практическая значимость работы определяется тем, что полученные данные о порогах лучевой стойкости и нелинейно-оптических параметрах кристаллов бариевых халькогенидов могут быть непосредственно использованы при проектировании параметрических преобразователей частоты среднего ИК-диапазона, при выборе рабочих длин волн, энергетических режимов накачки и частот следования импульсов, обеспечивающих безопасную и эффективную работу нелинейных элементов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных экспериментальных результатов и их тестированием на хорошо изученных эталонных материалах, согласием полученных результатов с независимыми теоретическими расчётами в пределах экспериментальной погрешности, а также соответствием части измерений международному стандарту ISO 21254.

Положения, выносимые на защиту, находят развернутое и аргументированное подтверждение в тексте диссертационной работы, а также в 24 научных трудах: 9 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК, 15 тезисах российских и международных конференций. Результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных конференциях по профилю диссертации.

Личный вклад автора состоит в самостоятельной постановке и проведении экспериментов по определению лучевой стойкости и нелинейно-оптических характеристик исследуемых кристаллов, разработке и наладке экспериментальной установки для Z-сканирования, обработке и анализе полученных данных, а также в подготовке публикаций и представлении результатов на научных конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, её основные результаты и выводы.

Существенных недостатков, ставящих под сомнение обоснованность результатов работы, не выявлено, однако по диссертации имеется **ряд вопросов и замечаний**:

1. Во введении было бы целесообразно более чётко обозначить объект и предмет исследования диссертационной работы.

2. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки и грамматические неточности. Например, на с. 9 приведена формулировка «Для измерения … была выбрала».

3. При измерении порогов оптического пробоя на заднюю поверхность образцов наносилось однослойное просветляющее покрытие Al_2O_3 для минимизации интерференционных эффектов, обусловленных многократным отражением излучения. Вместе с тем в диссертации не уточняется, на какой поверхности образцов преимущественно инициировался пробой. Данная информация представляется существенной для оценки влияния покрытия на результаты измерений, поскольку пробой поверхности с нанесённым покрытием может определяться не только свойствами исследуемого кристалла, но и характеристиками самого покрытия.

4. При исследовании порогов оптического пробоя приводятся данные о каустике воздействующего излучения, однако положение образцов относительно неё не уточняется. Дополнительная информация об условиях размещения образцов и диаметре пучка в области воздействия могла бы сделать описание методики измерений более полным.

5. Измерения порога оптического пробоя селенсодержащих и серосодержащих кристаллов проводились при разных диаметрах пучка: более 200 мкм и около 100 мкм соответственно. Поскольку диаметр воздействующего излучения может влиять на измеряемые значения порога пробоя, проведение дополнительных измерений при сопоставимых диаметрах пучка позволило бы повысить достоверность прямого сравнения результатов для исследованных групп кристаллов.

Отмеченные замечания носят частный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. В целом работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, характеризуется системным подходом к решению поставленных задач и вносит существенный вклад в развитие представлений о нелинейно-оптических свойствах перспективного класса кристаллов бариевых халькогенидов.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней

Диссертация Е.Ю. Ерушина «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором лично и в соавторстве экспериментальных исследований получены новые данные о порогах лучевой стойкости и нелинейно-оптических характеристиках кристаллов бариевых халькогенидов, имеющие значение для развития физики нелинейных оптических материалов и параметрических преобразователей частоты среднего ИК-диапазона. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.6 – Оптика (пункт 13 – Развитие физических основ квантовой и нелинейной оптики и спектроскопии. Самовоздействие света в среде) и полностью соответствует требованиям, установленным в пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Ерушин Евгений Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Диссертационная работа и автореферат рассмотрены и обсуждены на заседании отделения спектроскопии атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института оптики

атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, протокол заседания № 6 от 7 октября 2026 г.

Отзыв на диссертацию Ерушина Е.Ю. подготовлен старшим научным сотрудником ИОА СО РАН, кандидатом физико-математических наук (специальность 1.3.19 – Лазерная физика) Юдиным Николаем Николаевичем.

Старший научный сотрудник
лаборатории квантовой электроники,
к.ф.-м.н. по специальности 1.3.19 –
Лазерная физика,
+7 (3822) 491-111 (доб. 12-73) Н.Н. Юдин

Руководитель отделения спектроскопии
атмосферы, главный научный сотрудник
лаборатории атмосферной
абсорбционной спектроскопии,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.05
(1.3.6) – Оптика,
+7 (3822) 491-111 (доб. 10-04) Ю.Н. Пономарев

Подписи Юдина Николая Николаевича и Пономарева Юрия Николаевича заверяю

Ученый секретарь ИОА СО РАН Т.Е. Кураева

16.10.2026г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1.
Тел. +7 (3822) 49-27-38. E-mail: director@iao.ru. Веб-сайт: https://www.iao.ru/