

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Ватника Сергея Марковича
на диссертационную работу Ерушина Евгения Юрьевича
«Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов
бариевых халькогенидов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.6 – оптика
(Диссертационный совет 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, проспект Академика Коптюга, 1)

Актуальность работы

В диссертационной работе Е. Ю. Ерушина представлены результаты исследования нелинейных кристаллов бариевых халькогенидов, в том числе определение порогов пробоя, измерение нелинейно-оптических и теплофизических характеристик. Этот класс кристаллов демонстрирует широкий диапазон прозрачности в среднем ИК-диапазоне, вплоть до 18 мкм, и является потенциальной заменой коммерчески доступных кристаллов AgGaS_2 (AGS), AgGaSe_2 (AGSe) и ZnGeP_2 (ZGP). Результаты диссертации могут быть использованы для разработки и оптимизации нелинейных сред параметрических преобразователей среднего ИК-диапазона с расширенным диапазоном перестройки, что обуславливает актуальность проведенных исследований в рамках многочисленных прикладных задач – газоанализ, мониторинг атмосферы, медико-биологические технологии и др. Фундаментальные аспекты работы также представляют значительный интерес, поскольку в ней представлены физические параметры нового класса нелинейных материалов и проведено их взаимное сопоставление.

Научная новизна результатов работы определяется тем, что в ней:

- Впервые проведено систематическое исследование порогов лучевой стойкости кристаллов BGGSe, BGSe, BGS, BGGS, B2GGS к излучению с длинами волн 1 мкм и 2 мкм при наносекундной длительности импульсов;
- Впервые обнаружено двухфотонное поглощение в кристалле BGGSe на длине волны 1,053 мкм и проведено измерение его коэффициентов для обыкновенной и необыкновенной волны;
- Впервые были измерены и систематически сопоставлены коэффициенты нелинейного преломления для различных бариевых халькогенидов;
- На основе измеренного значения нелинейного показателя преломления впервые проведен расчет критической мощности самофокусировки в кристаллах бариевых халькогенидов и коэффициентов нелинейной восприимчивости 3-го порядка. Показано, что в зависимости от типа кристалла, критическая мощность самофокусировки изменяется на порядок, от 9 до 122 кВт.

Теоретическая и практическая значимость диссертации определяется необходимостью создания эффективных параметрических преобразователей среднего ИК-диапазона с расширенным диапазоном спектральной перестройки. В частности, полученные в ходе исследования данные позволяют более точно учитывать нелинейно-оптические эффекты в бариевых халькогенидных кристаллах, а также оптимизировать энергию и мощность световых импульсов накачки. Исследование порога лучевой стойкости, нелинейного поглощения и нелинейного преломления позволяют уточнить модели взаимодействия интенсивного лазерного излучения с нелинейными кристаллами бариевых халькогенидов, а также прогнозировать их параметры при воздействии излучения с высокой пиковой мощностью. Полученные в диссертационной работе результаты могут служить основой для компьютерного моделирования при разработке и оптимизации высокоэффективных параметрических преобразователей частоты среднего ИК-диапазона.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из списка физических величин и сокращений, введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего работы автора. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, включая 42 рисунка и 11 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 168 источников.

Во введении приведен краткий обзор научных исследований по тематике диссертации, описаны полученные на настоящий момент результаты, обоснована актуальность темы диссертации. Автором сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также новизна, научная и практическая значимость проведенных исследований. Приведены сведения о структуре диссертации, о публикациях и апробации работы на семинарах и конференциях, о личном вкладе автора и достоверности полученных результатов.

В первой главе в рамках литературного обзора рассмотрен синтез кристаллов бариевых халькогенидов, их оптические и нелинейные характеристики, теплофизические параметры, а также приведены примеры реализации параметрических генераторов и усилителей на этом классе кристаллов при их накачке световыми импульсами нано-, пико- и фемтосекундной длительности. Сделан вывод о том, что бариевые халькогенидные кристаллы (BGS, BGSe, BGGS, B2GGS и BGGSe) являются перспективными материалами для генерации излучения в среднем ИК диапазоне вследствие ряда своих уникальных свойств, включая широкий диапазон прозрачности, сопоставимый с тиогаллатом и селеногаллатом серебра (AGS и AGSe), а также сравнительно высокую нелинейность.

Вторая глава посвящена описанию методов и материалов, используемых в диссертационной работе. В ней приведены методики исследования лучевой стойкости, методы определения нелинейного поглощения и нелинейного преломления, представлены основные формулы для расчета двух- и трехфотонного поглощения, а также коэффициента нелинейного преломления в зависимости от ширины запрещенной зоны. В этой же главе содержится описание методики Z-сканирования с открытой и закрытой диафрагмой, а также приведены расчетные зависимости для аппроксимации данных при малых фазовых дистрациях. Описана модель параболической линзы для аппроксимации температурного поля и модель абберационной линзы, в которой для распространения в дальней зоне используется теория дифракции Френеля. Для оценки лучевой стойкости был выбран метод «R-on-1», который позволяет определить порог лучевой стойкости материала с учетом эффектов накопления. Выбор метода однолучевого Z-сканирования для исследования нелинейно-оптических характеристик был обоснован вследствие простоты реализации, универсальности и высокой чувствительности.

В третьей главе приведены результаты исследования порога лазерного разрушения бариевых халькогенидов импульсным излучением наносекундной длительности с длиной волны 1 мкм и 2 мкм. В качестве источника излучения был использован Nd: YLF лазер с длиной волны 1,053 мкм, частотой следования импульсов от 20 Гц до 4 кГц и длительностью импульсов около 5 нс. 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 до 3,9 Дж/см² для частоты повторения импульсов 100 Гц. Для исследования порога пробоя пластинок BGSe и BGGSe использовался Ho: YAG лазер с длиной волны 2,091 мкм, частотой следования импульсов от 2 кГц до 10 кГц и длительностью импульсов около 15 нс. В результате, 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. 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. На основании результатов измерений сделан вывод о том, что порог пробоя нелинейных кристаллов сульфидов бария превышает порог пробоя их селеносодержащих аналогов более чем в 2 раза, что делает эти кристаллы перспективными для параметрических систем с высокой пиковой энергией. В свою очередь, селеносодержащие кристаллы обладают более высокими коэффициентами эффективной нелинейности и расширенным диапазоном прозрачности, что делает их привлекательными для решения спектроскопических задач.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментов с использованием методики Z-сканирования с открытой и закрытой апертурой. Нелинейное поглощение на длине волны 1,053 мкм было обнаружено только для кристалла BGGSe. Анализ показал, что наблюдаемый фазовый сдвиг для обеих поляризаций обусловлен двухфотонным поглощением. Из анализа

результатов сделан вывод, что коэффициент двухфотонного поглощения 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/см², которые составили 0,03 см/ГВт и 0,85 см/ГВт, соответственно. Было обнаружено, что коэффициент двухфотонного поглощения сильно зависит от частоты следования импульсов. Этот эффект связан с тепловым фазовым сдвигом, вызванным локальным нагревом. С помощью Z-сканирования с закрытой диафрагмой были измерены нелинейные показатели преломления кристаллов бариевых халькогенидов, при этом нелинейная рефракция в значительной степени зависит от частоты повторения импульсов. На примере кристалла BGGSe показано, что для корректного определения электронной составляющей изменения показателя преломления необходимо, чтобы время между импульсами превышало характерное время теплообмена. Проведенные исследования нелинейно-оптических свойств кристаллов BGS и ZnSe показали, что использование наносекундного лазерного источника позволяет получать достоверные данные об электронной составляющей нелинейного отклика при соответствующем учете тепловых и электрострикционных эффектов. На основе полученных нелинейных показателей преломления также были оценены критические мощности для возникновения самофокусировки, которые находятся в пределах от 9 до 122 кВт. Сделан вывод о перспективности применения наносекундных источников излучения для исследования нелинейных характеристик материалов при учете сопутствующих эффектов и проведения контрольных измерений с эталонными образцами.

В заключении представлены основные результаты работы.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов работы основана на анализе автором выполненных ранее научно-исследовательских работ по предмету исследования, воспроизводимостью получаемых экспериментальных данных и сравнением полученных результатов с расчетными соотношениями.

Таким образом, диссертационная работа Е. Ю. Ерушина представляет законченное исследование, посвященное измерениям и комплексному анализу физических параметров новых нелинейных материалов на основе бариевых халькогенидов. Данная проблема имеет важное значение для оптики и лазерной физики (специальность 1.3.6). Научные положения, выводы и

рекомендации, сформулированные в диссертации Е. Ю. Ерушина, являются обоснованными. Достоверность научных положений, выводов и практических результатов, полученных в диссертационной работе, основана на анализе выполненных ранее автором научно-исследовательских работ по предмету исследования и подтверждается сравнением полученных в ходе выполнения работы экспериментальных данных и результатов математического моделирования с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Основные результаты диссертации изложены в 9 статьях, опубликованных в периодических рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК либо приравненных к ним (базы данных РИНЦ, Scopus, Web of Science), а также в 14 тезисах докладов международных и российских конференций. В публикациях достаточно полно отражены главные результаты диссертации.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

В автореферате подробно обоснованы защищаемые положения, научная новизна и достоверность результатов диссертационной работы. Структура автореферата соответствует структуре диссертации и в тезисной форме излагает ее основное содержание. Оформление диссертации и автореферата проведено в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Замечания по работе

Высокий научный уровень представленной работы не вызывает сомнений. Вместе с тем, по тексту диссертации можно сделать следующие замечания.

1. Не представлены данные по величине оптической однородности кристаллов, наличию внутренних дефектов в образцах и состояния поверхности после полировки. В связи с этим сложно оценить, насколько технология подготовки образцов и возможное наличие мелкомасштабных ростовых дефектов влияет на величину порога оптического пробоя.
2. Измерения порогов пробоя проведены для однослойных просветляющих покрытий оксида алюминия. Для оценки влияния покрытия было бы корректно сравнить эти результаты с величиной пробоя поверхности сразу после полировки, однако в тексте диссертации такие данные не представлены.

Заключение.

Указанные замечания не имеют принципиального характера и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Ерушина Евгения Юрьевича «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» является завершённым исследованием, полностью соответствующим паспорту научной специальности 1.3.6 – Оптика.

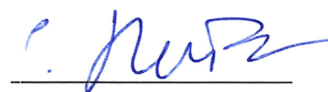
В целом, диссертационная работа Ерушина Евгения Юрьевича является законченной научно-квалификационной работой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и отвечает требованиям, установленным Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует всем критериям, установленным в разделе II Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01 октября 2018 г. № 1168), а ее автор Е.Ю. Ерушин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации Ерушина Евгения Юрьевича.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук,
Специальность 1.3.19 – Лазерная физика,
Начальник лаборатории метрологии
оптических материалов ООО «ВПГ Лазеруан»
141190, Московская обл., г. Фрязино,
пл. ак. Б.А.Введенского, д.3. стр. 5.
Телефон +7 (496) 255-74-46+3380
e-mail: sVatnik@vpglaserone.ru

Сергей
Маркович
Ватник



«14» октября 2026 г.

Подпись С.М.Ватника удостоверяю,
Начальник отдела кадров
ООО «ВПГ Лазеруан»

Виноградова Ю.В.



14.10.2026