

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук



д.ф.-м.н.

 Прудников О.Н.

 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной
физики Сибирского отделения Российской академии наук
по диссертации Ерушина Евгения Юрьевича
«Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых
халькогенидов»

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

Тайченачев А.В., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН - председатель семинара
Петров В.В., к.ф.-м.н. – секретарь семинара
Автаева С.В., д.ф.-м.н.
Березуцкий А.Г., к.ф.-м.н.
Бойко А.А., к.ф.-м.н.
Бражников Д.В., к.ф.-м.н.
Васильев В.А.
Внуков Д.В.
Гончаров А.Н., к.ф.-м.н.
Дресвянский В.П., д.ф.-м.н.
Ерушин Е.Ю.
Ильенков Р.Я., к.ф.-м.н.
Кирпичников А.В.
Костюкова Н.Ю., к.ф.-м.н.
Купцов Г.В.
Купцова А.О.
Майоров А.П.
Мартынович Е.Ф., д.ф.-м.н.
Пивцов В.С., к.ф.-м.н.
Покасов П.В., к.ф.-м.н.
Прудников О.Н., д.ф.-м.н.
Скворцов М.Н., д.ф.-м.н.
Ткаченко Р.А., к.ф.-м.н.
Трашкеев С.И., д.ф.-м.н.
Трунов В.И., к.ф.-м.н.
Тютрин А.А., к.ф.-м.н.

Шарипов С.С.
Шайхисламов И.Ф., д.ф.-м.н.
Чуркин Д.С., к.ф.-м.н.
Юдин В.И., д.ф.-м.н.
Всего 30 человек

СЛУШАЛИ: доклад Е.Ю. Ерушина о результатах диссертационной работы «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» (научный руководитель – к.ф.-м.н. Костюкова Н.Ю., ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск), представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Работа выполнена в Лаборатории квантовых оптических технологий, совместной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ, г. Новосибирск).

Представленная работа посвящена исследованию лучевой стойкости и нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов для создания параметрических преобразователей частоты в среднем ИК диапазоне.

Целью работы является исследование свойств кристаллов бариевых халькогенидов, определение порогов пробоя и измерение нелинейно-оптических характеристик исследуемых кристаллов. Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать порог лучевой стойкости пластинок кристаллов титогаллата бария $BaGa_4S_7$ (BGS), селеногаллата бария $BaGa_4Se_7$ (BGSe), $BaGa_2GeS_6$ (BGGs), $Ba_2Ga_8GeS_{16}$ (B2GGS) и $BaGa_2GeSe_6$ (BGGSe) к наносекундным импульсам с длиной волны 1 мкм и 2 мкм с различной частотой следования;

2. 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;

3. Исследование коэффициента нелинейного поглощения и нелинейного преломления кристаллов бариевых халькогенидов и определение их зависимости от интенсивности и частоты повторения импульсов;

4. Исследование параметров тепловой линзы и измерение теплового не-линейного показателя преломления кристалла BGGSe. Сравнение полученных результатов с расчетными значениями.

На представление были вынесены следующие ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

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.

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).

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. Разделы 1.2, 1.3 и 1.4 посвящены результатам исследования физических и оптических свойств данных материалов. В разделе 1.5 представлен обзор параметрических преобразователей частоты на основе некоторых из исследуемых кристаллов.

Вторая глава описывает экспериментальные методики и теоретические модели, использованные в работе. Для измерения лучевой стойкости был выбран метод «R-on-1», учитывающий эффекты накопления, а для исследования нелинейно-оптических характеристик использовалась методика однолучевого Z-сканирования.

Третья глава посвящена описанию исследования лучевой стойкости поверхностей бариевых халькогенидов к излучению наносекундной длительностью с длиной волны 1 мкм и 2 мкм. В результате 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.

Четвертая глава посвящена исследованию нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов методом Z-сканирования. Описываются экспериментальные измерения коэффициентов нелинейного поглощения и нелинейного преломления, их зависимость от частоты и мощности, влияние теплового вклада в измерения, а также сравнение с теоретическими моделями.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ диссертационной работы заключаются в следующем:

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 $2,34 \text{ Дж/см}^2$ (459 МВт/см^2); $7,4 \text{ Дж/см}^2$ ($1,45 \text{ ГВт/см}^2$); 7 Дж/см^2 ($1,4 \text{ ГВт/см}^2$); $3,66 \text{ Дж/см}^2$ (717 МВт/см^2); 7 Дж/см^2 ($1,4 \text{ ГВт/см}^2$), 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 $4,5 \text{ Дж/см}^2$ (346 МВт/см^2); $6,1 \text{ Дж/см}^2$ (470 МВт/см^2). 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 BGGSe.

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/см², они составили 0,03 см/ГВт и 0,85 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 ~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 самофокусировки и нелинейная восприимчивость 3-го порядка для бариевых халькогенидов.

Полученные в ходе исследования данные позволяют более точно учитывать нелинейно-оптические эффекты в бариевых халькогенидных кристаллах и определять оптимальные уровни энергии накачки. Результаты работы могут служить базой для компьютерного моделирования при разработке параметрических преобразователей частоты. Изложенные результаты строго аргументированы, являются новыми и получены автором самостоятельно.

Докладчику были заданы следующие вопросы:

1. Вопрос. Юдин В.И.: Как определяется, что наблюдается однофотонное, двухфотонное или многофотонное поглощение? Можно ли оценить, какой процесс происходит, глядя на полученные графики?

Ответ. Ерушин Е.Ю.: Если сумма энергий двух фотонов лежит в диапазоне между значением ширины запрещенной зоны и ширины запрещенной зоны, деленной пополам, то большая вероятность, что падение интенсивности на графике будет связано именно с двухфотонным поглощением. Глядя на полученные графики, можно оценить какой процесс происходит по падению пропускания от интенсивности. Для возбуждения процессов многофотонного поглощения требуется большая пиковая интенсивность, чем для двухфотонного.

2. Вопрос. Купцова А.О.: У меня вопрос относительно электронного вклада в изменение показателя преломления. В активных элементах он, как известно, связан с изменением населённости верхнего лазерного уровня. В рассматриваемом случае — в нелинейных кристаллах, где наблюдается поглощение — идёт ли речь о том же самом эффекте, или механизм принципиально иной?
- Ответ. Ерушин Е.Ю.: В данном случае электронный вклад возникает в результате деформации электронных орбит под действием сильного электромагнитного поля.
3. Вопрос. Автаева С.В.: В чем суть метода Z-сканирования и как по полученным графикам можно судить о характеристиках кристаллов?
- Ответ. Ерушин Е.Ю.: Методика основана на перемещении исследуемого образца вдоль сфокусированного луча, что приводит к изменению плотности падающей энергии. Это, в свою очередь, влияет на проявление нелинейных по полю эффектов. Далее, происходит измерение уровня энергии, прошедшего через исследуемый образец излучения и записывается зависимость пропускания образца от его положения.
4. Вопрос. Тайченачев А.В.: Почему на графиках зависимости лучевой стойкости от пиковой плотности энергии отсутствуют ошибки для вертикальной оси? Как определить действительную величину порога пробоя?
- Ответ. Ерушин Е.Ю.: Это связано с особенностями методики измерения: пластинка кристалла разделяется на определённое количество исследуемых областей, и впоследствии в таблицу заносятся значения энергии и количество точек, в которых возникло необратимое повреждение. Далее строится зависимость вероятности повреждения от приложенной пиковой плотности энергии. Действительная величина лучевой стойкости, согласно стандарту ISO, определяется как пиковая плотность энергии при нулевой вероятности пробоя. То есть по пересечению с осью абсцисс.
5. Вопрос. Тайченачев А.В.: Упоминается двухфотонное поглощение, при этом фигурируют фазовые соотношения — возникает вопрос, есть ли здесь какой-либо резонанс или требуется фазовое согласование?
- Ответ. Ерушин Е.Ю.: В данном случае говорится про фазовый сдвиг прошедшей через образец электромагнитной волны в результате нелинейного отклика.
6. Вопрос. Гончаров А.Н.: Почему лучевая стойкость показана в терминах плотности энергии, а не плотности мощности? Понятно, что и то и другое некорректно без указания длительности импульса. Почему у вас принято указывать $[Дж/см^2]$. Что более корректно?
- Ответ. Ерушин Е.Ю.: В публикациях указывают лучевую стойкость в разных единицах измерения, однако для импульсных источников при наносекундной длительности импульсов чаще можно встретить именно в терминах пиковой плотности энергии. Величина порога пробоя может быть пересчитана на другую длительность импульса при помощи закона масштабирования.
7. Вопрос. Мартынович Е.Ф.: Вы упоминаете, что двухфотонное поглощение зависит от типа волны — обыкновенной или необыкновенной, то есть от поляризации излучения в кристалле. Как вы это объясняете? Каков физический механизм того, что сечение двухфотонного поглощения зависит от поляризации?
- Ответ. Ерушин Е.Ю.: Зависимость двухфотонного поглощения от поляризации связана с кристаллооптической анизотропией и тензорной природой нелинейной восприимчивости.
8. Вопрос. Пивцов В.С.: Вы исследуете пороги разрушения и вероятность повреждения в зависимости от частоты повторения импульсов. Как вы подходите к этому: рассматриваете ли вы, например, фиксированное время облучения (скажем, одну секунду), или используете определённое число импульсов?

Ответ. Ерушин Е.Ю.: Для измерения лучевой стойкости использовался пакет в среднем из 500 импульсов и на разных частотах следования контролировалось время экспозиции.

Докладчику были высказаны следующие пожелания:

1. Исправить незначительные опечатки в количестве публикаций.
2. Добавить анализ связи эффективной нелинейности исследуемых кристаллов и порогов лучевой стойкости в доклад.
3. В докладе уделить больше внимания анализу физики исследуемых процессов.
4. В докладе следует обратить внимание на размеры и плотность рисунков на слайдах.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ диссертационной работы заключаются в следующем:

Научная значимость проведенного исследования заключается в получении новых знаний о физических характеристиках кристаллов $BaGa_4S_7$, $BaGa_4Se_7$, $BaGa_2GeSe_6$, $BaGa_2GeS_6$ и $Ba_2Ga_8GeS_{16}$ и в области физики нелинейных оптических процессов. Исследования 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.

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.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

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.

ОСНОВНЫМИ ПУБЛИКАЦИЯМИ по теме диссертации являются:

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 BaGa_4Se_7 and $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ nonlinear crystals at $1.053\ \mu\text{m}$ // 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 BaGa_4Se_7 and $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ 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. $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$: 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 $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ 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.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. Работа выполнена на высоком научном уровне и является законченным исследованием лучевой стойкости и нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов. Полученные данные позволят более точно учитывать нелинейно-оптические эффекты в этих кристаллах при создании параметрических преобразователей частоты.
2. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.
3. Рекомендовать диссертацию Ерушина Евгения Юрьевича «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» к

защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6– Оптика.

Диссертация Ерушина Е.Ю. и заключение по ней обсуждены и одобрены на заседании научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук от 29 мая 2026 г., протокол №1.

Председатель семинара,
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН



Тайченачев А.В.

Секретарь семинара,
к.ф.-м.н.



Петров В.В.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
Новосибирского национального исследовательского
университета (НГУ)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный
университет» (НГУ)

Диссертация «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» выполнена в лаборатории квантовых оптических технологий, совместной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск) и Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ, г. Новосибирск).

В период подготовки диссертации соискатель Ерушин Евгений Юрьевич работал в должности младшего научного сотрудника в совместной лаборатории квантовых оптических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук и Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

В 2018 г. окончил бакалавриат физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета по направлению подготовки 12.03.05 «Лазерная физика и лазерные технологии», в 2020 г. окончил магистратуру физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета по направлению подготовки 16.04.01 «Техническая физика». В 2024 г. окончил аспирантуру Новосибирского государственного технического университета по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», специальность 01.04.05 «Оптика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов №734 выдана 6 июля 2023 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель – Костюкова Надежда Юрьевна, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых оптических технологий (ЛКОТ) ИЛФ СО РАН, старший научный сотрудник ЛКОТ ФФ НГУ.

Диссертация «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» была рассмотрена на открытом семинаре кафедры квантовой электроники Физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» 5 сентября 2025 г.

На семинаре присутствовали:

Прудников О.Н., д.ф.-м.н., и.о. зав. кафедрой КвЭл – председатель комиссии

Бетеров И.И., к.ф.-м.н., зам. зав. кафедрой КвЭл – член комиссии

Петров В.В., к.ф.-м.н., в.н.с., доцент кафедры КвЭл – член комиссии

Гончаров А.Н., к.ф.-м.н., доцент кафедры КвЭл – член комиссии

Бойко А.А., к.ф.-м.н., зав. лаб. ЛКОТ НГУ

Костюкова Н.Ю., к.ф.-м.н., с.н.с. ЛКОТ НГУ

Костюков А.И., к.ф.-м.н., с.н.с. ЛКОТ НГУ

Березуцкий А.Г., к.ф.-м.н., с.н.с. ИЛФ СО РАН

Громыко В.В., аспирант ИЛФ СО РАН

Ильенков Р.Я., к.ф.-м.н., с.н.с. ИЛФ СО РАН

Кирпичников А.В., с.н.с. ИЛФ СО РАН

Купцова А.О., м.н.с., аспирант НГУ

Купцов Г.В., н.с. ИЛФ СО РАН

Мартынович Е.Ф., д.ф.-м.н., г.н.с. Иркутского филиала ИЛФ СО РАН

Пивцов В.С., к.ф.-м.н., в.н.с. ИЛФ СО РАН

Поллер Б.В., д.т.н., зав. лаб. 2.7 ИЛФ СО РАН

Савинов К.Н., к.ф.-м.н., м.н.с. НГТУ

Сере С.Э., м.н.с., аспирант ИЛФ СО РАН

Тайченачев А.В., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, г.н.с., зав. лаб. 1.5 ИЛФ СО РАН

Трунов И.А., инженер, аспирант ИЛФ СО РАН

Тютрин А.А., к.ф.-м.н., зав. лаб. ЛЛСиТ Иркутского филиала ИЛФ СО РАН

Чаповский П.Л., д.ф.-м.н., г.н.с. ИЛФ СО РАН

Юдин В.И., д.ф.-м.н., г.н.с. ИЛФ СО РАН

Шарипов С.С., м.н.с., аспирант ИЛФ СО РАН

Всего 24 человека, из них с правом голоса – 4 человека.

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

Диссертация соискателя посвящена исследованию свойств новых нелинейных материалов для создания параметрических преобразователей частоты в среднем ИК диапазоне. Как известно, средний ИК диапазон охватывает основные окна прозрачности атмосферы и находит применение в самых разных областях от медицины до систем обороны. Источники излучения в среднем ИК диапазоне, например, газовые, химические, твердотельные, диодные лазеры и лазеры на свободных электронах, имеют определённые ограничения. Параметрическое преобразование частоты предлагает альтернативный способ получения излучения в данном диапазоне, обладающий значительными преимуществами, включая возможность непрерывной перестройки длины волны в широком спектральном диапазоне. Новые нелинейные материалы могут значительно расширить перспективы использования параметрических преобразователей частоты, улучшить их характеристики и обеспечить эффективные решения для газоаналитических задач и других специализированных применений. Определение порогов пробоя и нелинейно-оптических характеристик этих кристаллов, включая нелинейное поглощение и нелинейное преломление, необходимо для разработки эффективных и надежных параметрических преобразователей, что имеет фундаментальное и прикладное значение для развития когерентных источников излучения.

Основной целью диссертационной работы Е.Ю. Ерушина, является исследование свойств кристаллов бариевых халькогенидов, определение порогов пробоя и измерение нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов BaGa_4S_7 (BGS), BaGa_4Se_7 (BGSe), $\text{BaGa}_2\text{GeS}_6$ (BGGs), $\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$ (B2GGs) и $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (BGGSe)

Личное участие соискателя

Все результаты, представленные в данной диссертационной работе, были получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Автор принимал участие в формулировке целей и постановке задач, проведении литературного обзора, разработке методологии и планировании исследований, а также проводил предварительные модельные расчеты. 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.

Научная новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

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.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов подтверждается применением признанных научных методов и экспериментальных методик в области оптики. Использовались сертифицированные и откалиброванные измерительные устройства, соответствующие отраслевым стандартам. Учтены возможные методические и экспериментальные ошибки, выполнен статистический анализ данных. Соответствие экспериментальных значений нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов теоретически ожидаемым подтверждает валидность результатов. Основные материалы работы представлены на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Практическая значимость

Научная значимость проведенного исследования заключается в получении новых знаний о физических характеристиках кристаллов BaGa_4S_7 , BaGa_4Se_7 , $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$, $\text{BaGa}_2\text{GeS}_6$ и $\text{Ba}_2\text{Ga}_3\text{GeS}_{16}$ и в области физики нелинейных оптических процессов. Исследования 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.

Научная специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Ерушина Евгения Юрьевича «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» соответствует паспорту научной специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», а именно направлению исследования паспорта научной специальности:

- 1) пункту 13 «Развитие физических основ квантовой и нелинейной оптики и спектроскопии. Самовоздействие света в среде»;

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы было опубликовано 21 работа в печатных изданиях, включая 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 14 тезисов конференций. 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-ая 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 молодежная 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 молодежная 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 ученых по нелинейной фотонике (г. Новосибирск, 2024); 1-я Всероссийская конференции с международным участием Материалы и технологии фотоники, электроники и нелинейной оптики “МТФ 2024” (Томск, 2024)

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в статьях, опубликованных в **рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК РФ)**:

1. А. А. Бойко, Н. Ю. Костюкова, **Е. Ю. Ерушин**, Мирошниченко И.Б., Колкер Д.Б. Выбор оптимальных условий фазового синхронизма для полупроводниковых нелинейных кристаллов при каскадной накачке в области 2 мкм // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 8(765). – С. 126-130.
- Научные результаты диссертации также отражены в работах индексируемые базами данных **Scopus и/или Web of Science и приравненные к публикациям из перечня ВАК**:
2. 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.
3. 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.
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.

Вывод:

Диссертация «Лучевая стойкость и нелинейно-оптические характеристики кристаллов бариевых халькогенидов» Ерушина Евгения Юрьевича соответствует требованиям, установленным в пп. 9 - 14 Положения «О присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Результаты голосования: «за» – 4 чел., «против» – 0, «воздержалось» – 0.

Председатель семинара:

д.ф.-м.н., и.о. зав. кафедрой КвЭл ФФ НГУ

 Прудников О.Н.

Секретарь семинара:

ст. преп. кафедры КвЭл ФФ НГУ

 Якшина Е.А.