

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**



На правах рукописи  
УДК 534.23:535.42

**ПОРОХОВНИЧЕНКО ДМИТРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

**Перспективные материалы для акустооптических устройств  
среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра**

Специальность:

01.04.03 — радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель:** **Балакший Владимир Иванович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры физики колебаний физического факультета  
Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова

**Официальные оппоненты:** **Котов Владимир Михайлович**  
доктор физико-математических наук,  
руководитель лаборатории быстропротекающих оптических  
явлений в твердотельных структурах Фрязинского филиала  
Института радиотехники и электроники имени  
В.А. Котельникова Российской академии наук (ФИРЭ РАН)

**Белотелов Владимир Игоревич**  
доктор физико-математических наук, профессор РАН,  
доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического  
факультета Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова

**Беляев Денис Анатольевич**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной  
спектроскопии отдела физики планет и малых тел Солнечной  
системы Института космических исследований Российской  
академии наук (ИКИ РАН)

Защита диссертации состоится «14» апреля 2022 года в 17:00 на заседании диссертационного совета МГУ.01.08 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (адрес: 119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27).

С диссертацией в электронном виде, а также со сведениями о регистрации участия в защите в удалённом интерактивном режиме можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/426051282/>

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2022 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета МГУ.01.08  
доктор физико-математических наук, доцент  
[kosareva@physics.msu.ru](mailto:kosareva@physics.msu.ru)



О.Г. Косарева

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

В настоящее время наиболее эффективными акустооптическими (АО) кристаллами для ультрафиолетового, видимого и ближнего ИК диапазонов являются парателлурит ( $\text{TeO}_2$ ), ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) и кристаллический кварц ( $\text{SiO}_2$ ), перекрывающие диапазон длин волн электромагнитного излучения от 0.25 до 5 мкм. Вплоть до 2000-х гг. длинноволновая часть спектра, представляющая несомненный интерес для науки и техники, ограничивалась длиной волны излучения  $\text{CO}_2$  лазера  $\lambda = 10.6$  мкм и в основном покрывалась кристаллом германия (Ge) и реже – кристаллами семейства KRS. В последние десятилетия существенно возрос интерес к ИК излучению с длинами волн, превосходящими  $\lambda = 10$  мкм. Связано это с появлением новых источников когерентного излучения, таких как квантово-каскадные лазеры, а также с проблемами экологического мониторинга загрязнений атмосферы, спектрального анализа изображений наземных и космических объектов, радиовидения и др. Таким образом, расширение диапазона работы АО устройств в длинноволновую область среднего и дальнего ИК диапазонов и сопутствующие этому поиск и исследование новых высокоэффективных АО материалов являются важными и актуальными задачами современной фундаментальной и прикладной акустооптики.

Еще одной из важных задач современной акустооптики дальнего ИК диапазона является создание устройств, в которых реализуются новые режимы АО взаимодействия, в частности, обратной коллинеарной дифракции. Такая геометрия обеспечивает максимальную длину АО взаимодействия и, как следствие, высокую селективность по длине волны электромагнитного излучения. В АО материалах видимого и ближнего ИК диапазонов спектра частота ультразвука при обратном коллинеарном взаимодействии достигает значений до 20 ГГц, в то время как для длин волн излучения, превышающих 10 мкм, – вполне приемлемых значений в несколько сотен мегагерц.

## **Цель и задачи диссертационной работы**

Наиболее общей целью работы являлось рассмотрение физических особенностей АО взаимодействия в среднем и дальнем ИК диапазоне электромагнитного спектра и расширение области применимости АО устройств в этот диапазон. Были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) Изучить особенности и описать теоретически АО взаимодействие в среднем и дальнем ИК диапазонах спектра электромагнитных волн.
- 2) Осуществить поиск и отбор новых эффективных материалов для создания АО устройств, работающих в среднем и дальнем ИК диапазонах.
- 3) Исследовать экспериментально и теоретически акустические, оптические и акустооптические свойства данных материалов.
- 4) Рассчитать оптимальную геометрию, параметры и разработать АО устройства на основе новых исследуемых материалов.
- 5) Рассмотреть свойства и возможности экспериментальной реализации в данных диапазонах полуколлинеарного и обратного коллинеарного режимов АО взаимодействия.

## **Объект и предмет исследования**

Предметом рассмотрения диссертационной работы является АО взаимодействие в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. Объектом исследования являются новые изотропные и анизотропные материалы с АО эффектом.

## **Методология исследования**

Теоретических расчеты характеристик АО взаимодействия проводились на основе известных справочных источников и теоретических выкладок из отечественных и иностранных фундаментальных работ по оптике, акустике и акустооптике. Вычисления и построения графиков производились в компьютерных программных средах, в том числе, с использованием самостоятельно реализованных численных методов. Экспериментальные

исследования проводились с использованием современного высокоточного лабораторного оборудования, а также специализированных частей экспериментальной установки, изготовленных механиком высокой квалификации. Для проводимых измерений и расчетов осуществлялась оценка погрешностей, для измерений также проводилось сопоставление результатов с теоретическими предсказаниями. С целью снижения статистической погрешности и подтверждения воспроизводимости получаемых результатов измерения проводились несколькими сериями.

### **Научная новизна полученных результатов**

1) Впервые проведены измерения показателей преломления, скоростей акустических волн, а также коэффициентов АО качества кристалла йодида индия (InI). Показана высокая эффективность и перспективность использования данного материала для создания АО устройств.

2) Впервые проведено измерение коэффициентов АО качества и фотоупругих констант кристалла бромида ртути ( $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ ). Рассчитаны угло-частотные характеристики и параметры широкоапертурной геометрии АО взаимодействия в данном кристалле. Предложена новая геометрия и проведен расчет характеристик поляризационной призмы, работающей в широком диапазоне длин волн дальнего ИК спектра.

3) Впервые проанализирована перспективность применения кристаллов галогенидов таллия KRS-5 ( $\text{TlBr} - \text{TlI}$ ) и KRS-6 ( $\text{TlBr} - \text{TlCl}$ ) в акустооптических устройствах среднего и дальнего ИК диапазонов. Детально рассмотрена возможность и разработан эксперимент по реализации обратного коллинеарного АО взаимодействия в кристалле KRS-5. Предложена высокоэффективная геометрия и параметры коллинеарного фильтра, работающего с трансформацией акустических мод и обладающего высокой разрешающей способностью.

4) Впервые проведено подробное рассмотрение различных невзаимных эффектов обратного коллинеарного АО взаимодействия в среднем и дальнем ИК

диапазонах. Проанализировано влияние этих эффектов на параметры АО устройств.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы состоит в возможности применения ее результатов для создания новых высокоэффективных АО устройств, работающих в среднем и дальнем ИК спектральных диапазонах, реализации новых режимов АО взаимодействия и расширения, таким образом, круга научных и технических задач, решаемых средствами акустооптики.

Кристаллы парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), йодноватой кислоты ( $\text{HIO}_3$ ) и йодата лития ( $\text{LiIO}_3$ ) могут быть использованы для создания эффективных АО устройств терагерцевого спектрального диапазона.

Благодаря экологичности, оптической анизотропии, широкому диапазону прозрачности, а также высоким значениям АО качества кристалл йодида индия ( $\text{InI}$ ) является чрезвычайно перспективным для создания таких АО устройств инфракрасного диапазона спектра, как фильтры, модуляторы и дефлекторы.

На основе кристалла  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  может быть создан широкоапертурный АО фильтр, позволяющий обрабатывать неколлимированные пучки и изображения в ИК области спектра. Также на основе данного кристалла может быть создана поляризационная призма, работающая во всем диапазоне прозрачности кристалла и обладающая симметричной угловой апертурой.

Кристалл KRS-5 может быть использован для реализации нового режима обратного коллинеарного АО взаимодействия в ИК диапазоне при помощи геометрии с трансформацией акустических мод. Использование невзаимного эффекта в кристалле KRS-5 позволяет существенно улучшить спектральные характеристики фильтра.

### **Положения, выносимые на защиту**

1) АО качество кристаллов парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), йодноватой кислоты ( $\text{HIO}_3$ ) и йодата лития ( $\text{LiIO}_3$ ) в терагерцевом спектральном диапазоне могут быть

на 1-2 порядка выше, чем в видимом диапазоне, за счет больших значений показателей преломления. В кристалле парателлурита значение АО качества может достигать  $M_2 = 100\,000 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ .

2) Кристалл йодида индия (InI) обладает высокими значениями коэффициентов АО качества, достигающих  $M_2 = 1100 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  на продольной акустической волне, и значительной оптической анизотропией  $\Delta n = n_y - n_x = 0.47$ .

3) В кристалле бромида ртути ( $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ ) возможна реализация широкоапертурного АО взаимодействия во всем диапазоне прозрачности кристалла от 0.42 мкм до 25 мкм. Эффективность дифракции в дальнем ИК диапазоне может превышать значение  $\zeta' = 1\%/1\text{Вт}$  акустической мощности, а спектральная разрешающая способность АО фильтра – превосходить  $R = 200$ . На основе кристалла возможно создание поляризационной призмы типа Глана, работающей во всем диапазоне прозрачности кристалла. Улучшенная геометрия призмы позволяет добиться симметричной угловой апертуры до  $\Delta\theta = \pm 10^\circ$ .

4) Разрешающая способность АО фильтра на кристалле KRS-5 при реализации обратной коллинеарной дифракции с трансформацией акустических мод может превышать значение  $R = 6000$ , а эффективность дифракции иметь порядок  $\zeta' = 1\%/1\text{Вт}$  на длине волны излучения  $\lambda = 20 \text{ мкм}$ .

5) При длинах АО взаимодействия порядка 20 см в кристалле KRS-5 невзаимный эффект, обусловленный поглощением акустической и электромагнитной волн, кратно повышает разрешающую способность в области длин волн  $\lambda > 20 \text{ мкм}$  до значений  $R > 20\,000$ .

### **Степень достоверности полученных результатов**

Достоверность результатов определяется применением классических подходов к постановке задач, планированию и проведению экспериментальных и теоретических исследований. Теоретический анализ акустических, оптических и акустооптических эффектов проводился при помощи методов волновой оптики, классической электродинамики, теории волн и механики сплошных сред,

описанных в фундаментальных работах. Экспериментальные исследования проводились с использованием современного лазерного, оптического и радиотехнического оборудования. Для верификации и воспроизводимости измерения проводились сериями, а полученные значения сопоставлялись с теоретическими ожиданиями. Полученные результаты неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, семинарах, а также опубликованы в отечественных и иностранных реферируемых журналах.

### **Апробация результатов**

Научные результаты диссертационной работы представлены в 19 докладах на 15 всероссийских и международных конференциях:

1. XV Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн" имени профессора А.П. Сухорукова, Можайск, Россия, 2015
2. 8-я Международная научно-практическая конференция "Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации", Суздаль, Россия, 2015
3. XV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016»), Можайск, Россия, 2016
4. XIX International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", Saint-Petersburg, Russia, 2016
5. VI Международная конференция "Фотоника и информационная оптика", Москва, Россия, 2017
6. XVI Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн" имени профессора А.П. Сухорукова, Можайск, Россия, 2017
7. 2-я Всероссийская акустическая конференция, Нижний Новгород, Россия, 2017
8. 13th School on Acousto-Optics and Applications, Moscow, Russia, 2017

9. 20-th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems”, Санкт-Петербург, Россия, 2017
10. XVI Всероссийская школа-семинар "Волновые явления в неоднородных средах" имени профессора А.П. Сухорукова, Можайск, Россия, 2018
11. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», Москва, Россия, 2019
12. XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова, Можайск, Россия, 2019
13. 14th School on Acousto-Optics and Applications, Torun, Poland, 2019
14. XXXII Сессия Российского акустического общества, Москва, Россия, 2019
15. XVII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова, Москва, Россия, 2020

Кроме того, результаты работы регулярно докладывались и обсуждались на семинарах кафедры физики колебаний физического факультета МГУ.

## **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы изложены в 29 печатных работах, в том числе в 10 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, и 19 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Список публикаций автора представлен в конце автореферата.

## **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично либо при его определяющем участии. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

## Структура и объем диссертационной работы

Работа состоит из введения, 5 глав основного текста, заключения и списка литературы. Работа содержит 150 страниц, включает 56 рисунков, 19 таблиц и 130 библиографических ссылок.

## Содержание диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во **введении** дана общая характеристика исследуемой темы акустооптического взаимодействия дальнего ИК диапазона. Обоснована актуальность тематики, перечислены цели исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения об апробации полученных результатов.

**Первая глава** работы является преимущественно обзорной. В первом разделе представлен обзор истории, перспектив и путей развития АО устройств для среднего и дальнего ИК спектральных диапазонов. Дано общее описание АО взаимодействия и сформулированы основные проблемы использования АО устройств в ИК области спектра. Отмечено, что, во-первых, эффективность АО взаимодействия в линейном приближении квадратично снижается с увеличением длины волны электромагнитного излучения:

$$\zeta = \frac{\pi^2 M_2 P_a l^2}{2\lambda^2 S}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – эффективность дифракции,  $\lambda$  – длина волны,  $M_2$  – коэффициент АО качества,  $P_a$  – мощность акустической волны,  $S$  – площадь поперечного сечения акустического пучка и  $l$  – длина взаимодействия. Таким образом, при прочих равных условиях, эффективность дифракции в среднем и дальнем ИК диапазоне на 3-4 порядка ниже, чем в видимом диапазоне. Во-вторых, большая часть известных АО материалов, использующихся в видимом и ближнем ИК диапазоне, являются непрозрачными в среднем и дальнем ИК. Кроме того, в рассматриваемых диапазонах как электромагнитные, так и акустические волны

обладают существенно более сильной расходимостью, что также снижает эффективность и затрудняет эксплуатацию АО устройств.

Во втором разделе первой главы предложены и обоснованы подходы решения описанных проблем. В первую очередь, необходимо осуществлять поиск и исследование новых сред, прозрачных в дальнем ИК диапазоне и в то же время обладающих большими значениями коэффициентов АО качества (порядка  $M_2 = 1000 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  и выше). Для компенсации влияния расходимости взаимодействующих волн необходимо увеличение геометрических размеров устройств, что также приведет к увеличению геометрической области АО взаимодействия и позволит повысить управляющую акустическую мощность на 1-2 порядка и обеспечить эффективное теплоотведение.

В третьем разделе главы рассмотрена возможность реализации режимов полуколлинеарного и обратного коллинеарного АО взаимодействия в ИК диапазоне. В видимом диапазоне использование данных режимов оказывается невозможным ввиду требующихся частот ультразвука порядка десятков ГГц:

$$f = \frac{2nV}{\lambda} \cos(\psi), \quad (2)$$

где  $f$  – частота АО синхронизма,  $n$  – показатель преломления среды,  $\psi$  – угол сноса акустической энергии (в случае обратного коллинеарного взаимодействия отсутствует). В то же время переход в дальний ИК диапазон позволяет снизить частоту синхронизма до значений нескольких сотен МГц.

В четвертом разделе приведены результаты исследования кристаллов парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), йодноватой кислоты ( $\text{HIO}_3$ ) и йодата лития ( $\text{LiIO}_3$ ) в терагерцевом диапазоне электромагнитного спектра. Для данных кристаллов было проведено экспериментальное исследование зависимостей коэффициентов поглощения, а также показателей преломления от длины волн в диапазоне  $\lambda = 10 \div 1000 \text{ мкм}$ . Показано, что за счет увеличения реальной части показателей преломления значения коэффициентов АО качества в данных кристаллах на несколько порядков могут превосходить аналогичные значения в видимом диапазоне. В частности, для кристалла парателлурита показатель

преломления в терагерцевом диапазоне возрастает в несколько раз, при этом максимальное значение АО качества может достигать значения  $M_2 = 100\,000 \times 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$  для поперечной волны вдоль направления [110]. На основе анализа АО взаимодействия с учетом поглощения электромагнитной волны показана перспективность применения кристаллов  $\text{TeO}_2$  для длин волн более  $\lambda = 800$  мкм, а для кристаллов  $\text{NiO}_3$  и  $\text{LiIO}_3$  – более  $\lambda = 550$  мкм и  $\lambda = 450$  мкм соответственно. Для случаев поперечной геометрии дифракции наилучшие значения эффективности дифракции с учетом потерь составили  $\zeta = 0.12\%$ ,  $\zeta = 0.77\%$  и  $\zeta = 20\%$  для кристаллов  $\text{LiIO}_3$ ,  $\text{NiO}_3$  и  $\text{TeO}_2$  соответственно. В расчетах использовалась длина взаимодействия  $l = 5$  мм, площадь сечения акустического пучка  $S = 25 \text{ мм}^2$  и мощность  $P = 25$  Вт и длины волн излучения  $\lambda = 450$  мкм,  $\lambda = 550$  мкм и  $\lambda = 800$  мкм.

В пятом разделе более подробно рассмотрен режим обратного коллинеарного взаимодействия. На примере кристалла германия (Ge) рассмотрен невязимный эффект, имеющий место при наличии поглощения как электромагнитной, так и акустической волн. При этом в приближении слабой АО связи записаны системы уравнений для амплитуд падающей  $C_0$  и дифрагированной  $C_1$  волн с безразмерными параметрами для случая встречного распространения электромагнитной и акустической волн:

$$\frac{dC_0}{d\xi} = -DC_0,$$

$$\frac{dC_1}{d\xi} = \frac{A}{2} \exp(-Z)\exp(Z\xi) \exp(-iR\xi) C_0 + DC_1,$$
(3)

и случая сонаправленного распространения волн:

$$\frac{dC_0}{d\xi} = -DC_0,$$

$$\frac{dC_1}{d\xi} = \frac{A}{2} \exp(-Z\xi) \exp(-iR\xi) C_0 + DC_1,$$
(4)

с граничными условиями  $C_0(0) = 1$ ,  $C_1(1) = 0$ .

Здесь  $\xi$  – безразмерная координата,  $A$  – безразмерный параметр АО связи,  $Z$  и  $D$  – безразмерные величины затухания ультразвука и ослабления

электромагнитной волны, а  $R$  – безразмерная расстройка. Точные решения уравнений (3) и (4) для эффективности дифракции  $\zeta = |C_1^2|$  в случаях сонаправленного (сплошные линии) и встречного (штриховые линии) распространения волн приведены на Рис. 1а. Для рассмотренного кристалла германия в соответствии со справочными данными и характерной для АО устройств длины взаимодействия  $l = 1$  см, значения безразмерных показателей затухания составили  $D = 0.65$  и  $Z = 0.33$ . При длине волны  $\lambda = 130$  мкм различие эффективности дифракции между случаями попутного и встречного распространения волн, т.е. величина невзаимного эффекта, составляет 13%.

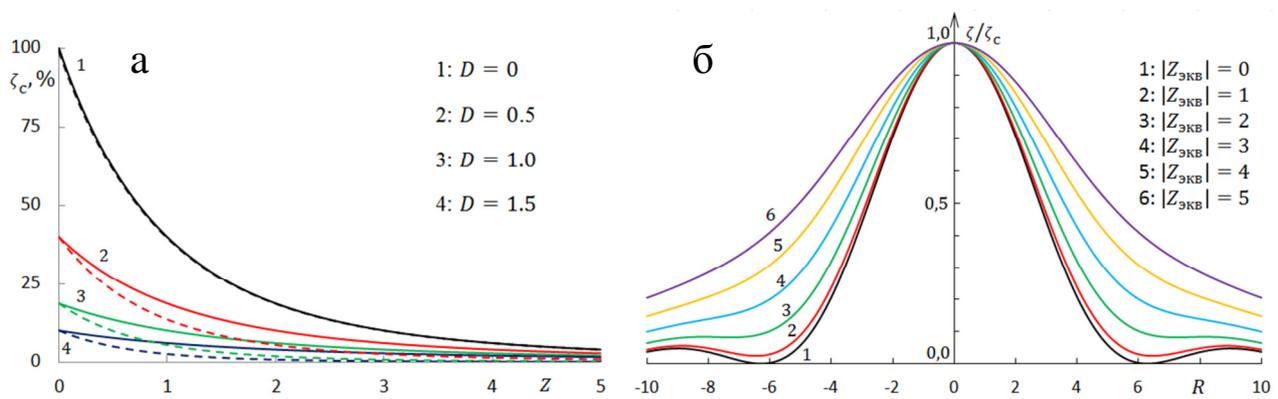


Рис 1. Зависимость нормированной эффективности взаимодействия (а) при синхронизме от параметра затухания ультразвука  $Z$  и аппаратная функция (б) при различных значениях параметра затухания  $Z_{\text{экв}}$ .

Кроме того, было проанализировано влияние невзаимности на спектральные характеристики устройства, а именно, аппаратную функцию. На Рис. 1б приведены зависимости нормированных аппаратных функций при различных значениях безразмерного параметра  $Z_{\text{экв}} = Z \pm 2D$ , учитывающего как затухание ультразвука, так и поглощение электромагнитной волны. Знак «+» соответствует при этом случаю сонаправленного распространения волн, а знак «-» – встречному. Видно, что в первом случае рост потерь обеих волн всегда приводит к расширению частотной полосы и снижению селективности устройства. В случае же встречного распространения волн ослабление электромагнитной и ультразвуковой волн влияет на частотную полосу взаимнообратным образом, полностью компенсируя друг друга при условии  $Z = 2D$ .

**Вторая глава** посвящена исследованию нового кристалла монойодида индия (InI). В первом разделе главы рассмотрены общие свойства и перспективы использования данного кристалла в акустооптике ИК диапазона. Технология выращивания монокристаллов InI необходимого для АО применений качества и размеров освоена лишь сравнительно недавно (в 2016 г.), и большая часть из его физических свойств до сих пор оставалась неизвестными. Монокристалл йодида индия обладает ромбической симметрией, следовательно, является оптически двуосным, что позволяет реализовать в нем разнообразные геометрии АО взаимодействия. Существенным преимуществом данного кристалла является также отсутствие в его составе токсичных компонентов. Кристалл прозрачен в широком диапазоне длин волн  $\lambda = 0.62 \div 50$  мкм, что превышает диапазоны прозрачности большинства известных АО материалов.

Во втором разделе главы приведено описание и результаты экспериментальных исследований акустических свойств кристалла. Исследования проводились с образцом кристалла, впервые выращенным лабораториями «Технологии наноматериалов для фотоники» ИОФ РАН и АО «Гиредмет». В ходе работы методом эхо-импульсов были проведены измерения скоростей продольных акустических волн  $V$  кристалла вдоль главных кристаллографических осей и рассчитаны соответствующие компоненты тензора жесткости  $\hat{c}$  (Табл. 1).

Параметры ультразвуковой волны			Компонента тензора жесткости
Направление	Поляризация	Скорость, м/с	
$x$	$x$	$(2.23 \pm 0.05) \times 10^3$	$c_{11} = (2.7 \pm 0.2) \times 10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>
$y$	$y$	$(1.96 \pm 0.06) \times 10^3$	$c_{22} = (2.1 \pm 0.2) \times 10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>
$z$	$z$	$(2.18 \pm 0.05) \times 10^3$	$c_{33} = (2.6 \pm 0.2) \times 10^{10}$ Н/м <sup>2</sup>

Табл. 1. Измеренные акустические свойства кристалла йодида индия.

Третий раздел главы посвящен исследованию оптических и АО свойств кристалла InI. Исследования были разделены на два этапа и проводились с двумя разными экспериментальными образцами. Измерения коэффициентов АО качества проводились методом Диксона. Результаты впервые проведенных

измерений коэффициентов АО качества приведены в Табл. 2. Наибольшее значение, соответствующее фотоупругой константе  $p_{11}$ , оказалось равным  $M_2 = 1100 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ , являясь одним из самых больших среди известных АО материалов. В Табл. 2 также приведены результаты измерений главных показателей преломления кристалла. Измерения проводились интерференционным методом на длине волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера  $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ , соответствующей области отсутствия дисперсии кристалла. Видно, что показатели преломления имеют достаточно высокие среди АО материалов значения, превосходящие 2.4. Совокупность широкого диапазона прозрачности, сильной оптической анизотропии и высоких значений коэффициентов АО качества указывают на то, что кристалл йодида индия является одним из самых перспективных кристаллов для акустооптики среднего и дальнего ИК диапазонов.

Ультразвуковая волна		Электромагнитное излучение		$M_2 \times 10^{15}, \text{ с}^3/\text{кг}$		$p_{\text{эфф}}$	$n$
Направл	Поляр	Направл	Поляр	1.15 мкм (2017)	0.65 мкм (2019)		10.6 мкм
$x$	$x$	$z$	$x$	$1100 \pm 200$		$p_{11}$	$2.42 \pm 0.13$
		$y$			$1100 \pm 100$		
$y$	$y$	$z$	$x$	$120 \pm 25$		$p_{12}$	
$z$	$z$	$y$	$x$		$300 \pm 50$	$p_{13}$	
$x$	$x$	$z$	$y$	$90 \pm 20$		$p_{21}$	
$y$	$y$	$z$	$y$	$260 \pm 50$		$p_{22}$	
		$x$			$230 \pm 20$		
$z$	$z$	$x$	$y$		$80 \pm 10$	$p_{23}$	
$x$	$x$	$y$	$z$		$110 \pm 25$	$p_{31}$	$2.55 \pm 0.08$
$y$	$y$	$x$	$z$		$110 \pm 10$	$p_{32}$	
$z$	$z$	$x$	$z$		$860 \pm 80$	$p_{33}$	

Табл. 2 Экспериментальные значения коэффициентов АО качества йодида индия.

**Третья глава** посвящена исследованию нового тетрагонального АО кристалла бромида ртути ( $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ ). Первый раздел посвящен обзору всего семейства кристаллов галогенидов ртути, включающий также применяемый в акустооптике кристалл каломели ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) и йодида ртути ( $\text{Hg}_2\text{I}_2$ ). Кристалл бромида ртути прозрачен в диапазоне  $\lambda = 0.42 \div 30$  мкм, а также обладает очень сильной оптической анизотропией ( $n_o = 2.03$ ,  $n_e = 2.70$ ) на длине волны  $\lambda = 10.6$  мкм. В то же время в немногочисленных более ранних работах приведены лишь оценки АО качества кристалла, из которых, однако, следует, что кристалл бромида ртути обладает большей АО эффективностью, чем кристалл каломели.

В ходе данной работы были проведены экспериментальные исследования АО свойств кристаллов  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ , произведенных компанией «Green Optics» (Южная Корея). В качестве экспериментального образца для измерений коэффициентов АО качества выступал кубик бромида ртути с ребром 10 мм, грани которого были ортогональны направлениям  $[110]$ ,  $[1\bar{1}0]$  и  $[001]$ . При этом по техническим причинам оптическую обработку удалось провести только для плоскостей  $(110)$ ,  $(1\bar{1}0)$ , что позволило измерить на длине волны  $\lambda = 633$  нм два коэффициента АО качества, соответствующих эффективным фотоупругим константам  $(p_{11} + p_{12} + 2p_{66})/2$  и  $p_{31}$  (Табл. 3).

Фотоупругая константа	$M_2$ , эксп $10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$	$p_{eff}$ , $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ , эксп	$p_{eff}$ , $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$
$(p_{11} + p_{12} + 2p_{66})/2$	$645 \pm 35$	$0.60 \pm 0.03$	0.543
$p_{31}$	$235 \pm 35$	$0.13 \pm 0.01$	0.137

Табл. 3. Результаты измерений коэффициентов АО качества кристалла бромида ртути.

Полученные значения фотоупругих констант кристалла  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  оказались близки (с отличием менее 10%) значениям соответствующих констант кристалла  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . На основании полученных значений, а также анализа справочных данных по другим семействам близких кристаллов, например, галогенидов калия и рубидия, сделан вывод о возможности использования для оценок коэффициентов АО качества кристалла  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  фотоупругих констант кристалла  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . Подобное допущение позволило с хорошей точностью оценить эффективность дифракции, а

также понять характер ее зависимости от различных параметров, результаты чего представлены во втором разделе главы. В нем рассмотрена возможность использования кристалла для создания широкоапертурного АО фильтра. Главной особенностью широкоапертурной геометрии является то, что в достаточно широкой окрестности (несколько градусов) угла Брэгга частота синхронизма остается практически неизменной. Фактически это означает малую величину вектора расстройки и сохранение высокой эффективности дифракции в определенном диапазоне углов падения электромагнитного излучения. Показано, что в тетрагональном кристалле  $\text{Hg}_2\text{Br}_2$  широкоапертурная геометрия реализуется в плоскости  $(1\bar{1}0)$ . Скорость сдвиговой ультразвуковой волны в данной плоскости изменяется в диапазоне  $V = 282 \div 1008$  м/с. Эффективная фотоупругая константа, необходимая для расчета АО качества и эффективности дифракции может быть вычислена при помощи следующего соотношения:

$$p_{eff}(\alpha) = 0.5(p_{11} - p_{12})\cos(\alpha)\cos(\theta_i + \alpha) + p_{44}\sin(\alpha)\sin(\theta_i + \alpha). \quad (5)$$

При оценках АО качества в работе неизвестная фотоупругая константа  $p_{44}$  полагалась равной нулю ввиду слабой зависимости эффективной фотоупругой константы (5) от компоненты  $p_{44}$  вблизи направления  $[001]$ . В работе впервые были проведены расчеты эффективности дифракции (Рис. 2а), кривых перестройки (Рис. 2б) а также других параметров широкоапертурного АО фильтра в зависимости от угла среза  $\alpha$ .

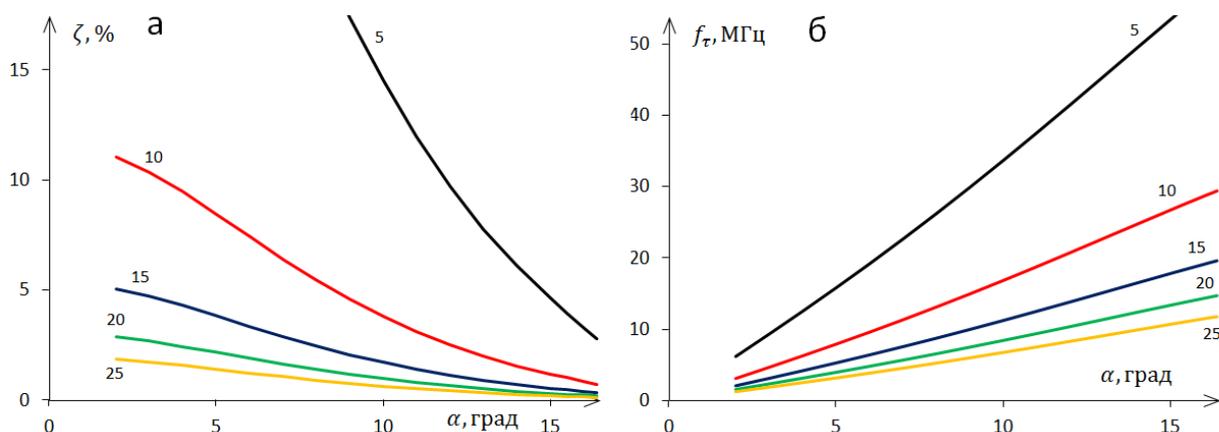


Рис. 2. Зависимость эффективности АО взаимодействия (а) и частоты синхронизма (б) от угла среза в плоскости  $(1\bar{1}0)$  кристалла бромида ртути для различных длин волн. Цифры около кривых соответствуют длине волн в микронах.

В третьем разделе главы в качестве оптимального выбран угол среза  $\alpha = 14^\circ$ . Выбор делался с целью получить разрешающую способность не менее  $R = 200$  в рабочем диапазоне длин волн  $\lambda = 8 \dots 12$  мкм. Показано, что предложенный вариант широкоапертурной геометрии с углом среза  $14^\circ$  в плоскости  $(1\bar{1}0)$  обеспечивает спектральное разрешение  $R$  более 200, а эффективность дифракции  $\zeta'$  – более 1.1%/1Вт акустической мощности в диапазоне длин волн  $\lambda = 8 \div 12$  мкм. Результаты расчетов эффективности дифракции, разрешающей способности, ширины спектральной линии  $\Delta\lambda$ , угловой апертуры внутри устройства  $\Delta\theta$  и частоты синхронизма  $f_t$  в центре и на краях рабочего диапазона приведены в Табл. 4.

Длина волны, мкм	$\zeta'$ , %/Вт	$R$	$\Delta\lambda$ , нм	$\Delta\theta$ , °	$f_t$ , МГц
8	2.4	305	25	3.7	31
10	1.5	245	40	4.1	25
12	1.1	205	60	4.5	21

Табл. 4. Ключевые параметры АО фильтра на кристалле бромида ртути.

В четвертом разделе главы предложена модернизация геометрии поляризационной призмы Глана на кристалле бромида ртути. Актуальность создания высокоэффективных кристаллических поляризаторов с коэффициентом экстинкции, способным достигать 100 000:1, обусловлена тем, что в настоящий момент их максимальная рабочая длина волны имеет значение  $\lambda = 6$  мкм (для фторида магния  $MgF_2$ ). Принцип действия кристаллических поляризаторов основан на явлении полного внутреннего отражения, препятствующего прямому выходу одной из оптических мод из устройства. Показано, что кристаллы галогенидов ртути и в частности кристалл  $Hg_2Br_2$  обладают необходимыми величинами оптической анизотропии и диапазоном прозрачности для создания на их основе новых поляризационных устройств. В качестве решения проблемы вывода паразитного отраженного луча из кристалла предложена модификация классической геометрии призмы, изображенная на Рис. 3. Идея состоит в том, чтобы выходящий (паразитный) луч сначала претерпевал еще одно отражение на входной грани (падая на нее под углом большим критического), а затем выходил

через нижнюю выходную грань, скошенную перпендикулярно направлению его распространения. Данное решение позволяет минимизировать дальнейшие переотражения луча внутри призмы и, кроме того, обеспечивает соотношение линейной апертуры к толщине устройства порядка 1:1.

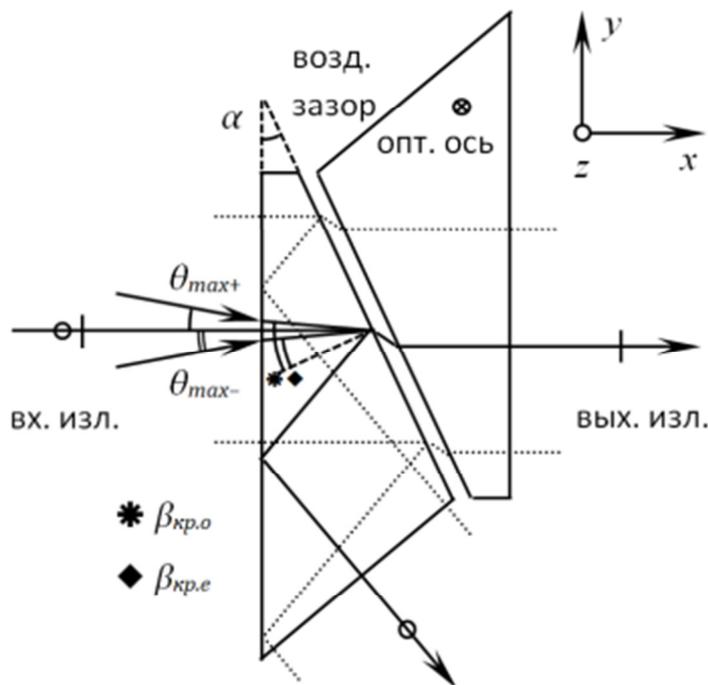


Рис. 3. Ход пучков излучения в модернизированной поляризационной призме Глана.

Также показано, что выбором угла наклона рабочей грани  $\alpha$  можно добиться симметричной угловой апертуры устройства. В соответствии с расчетами, во всем ИК и части видимого диапазона прозрачности вплоть до длины волны  $\lambda = 0.63$  мкм симметричная апертура лежит в пределах  $\pm 4.1^\circ \dots \pm 6.7^\circ$ , а асимметричный диапазон достигает максимального значения  $24.1^\circ$ . Во всем диапазоне слабой дисперсии  $\lambda = 3 \dots 30$  мкм апертура для симметричных пучков практически не изменяется и имеет значение  $\pm 6.7^\circ$ , а общий асимметричный диапазон –  $19^\circ$ . Кроме угловой апертуры оптимизация геометрии дает также существенный выигрыш в энергетической эффективности и позволяет использовать призму даже в коротковолновой области  $\lambda = 0.42 \dots 0.63$  мкм. Пропускание в области отсутствия дисперсии превышает значение  $T = 80\%$ , а в случае необходимости возможно использование просветляющих покрытий.

Рассчитанные параметры призм для всех трех кристаллов галогенидов ртути представлены в Табл. 5.

Материал	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	Hg <sub>2</sub> I <sub>2</sub>
$\alpha_{\text{опт}}$ , град	27.4	25.1	21.5
$\lambda_{\text{мин}}$ , мкм	0.38	0.46	0.6
$\lambda_{\text{макс}}$ , мкм	16	27	32
$\theta_{\text{макс}\pm}$ , град	$\pm 8.2$	$\pm 9.0$	$\pm 10.8$
$T$ , %	82	77	69

Табл. 5. Ключевые параметры оптимизированных поляризаторов на основе кристаллов галогенидов ртути.

Приведенные параметры поляризаторов с предложенной оптимизацией геометрии существенно превышают параметры существующих устройств даже в ближнем ИК диапазоне и при этом не имеют аналогов в дальнем ИК диапазоне.

В **четвертой главе** приводятся результаты обзора и теоретического исследования акустических и акустооптических свойств кристаллов семейства KRS. В первом разделе главы представлен общий обзор физических свойств данных кристаллов и работ, связанных с их исследованием. Кристаллы этого семейства представляют собой твердые растворы галогенидов таллия и серебра, обладают кубической кристаллической решеткой и включают более 10 разновидностей. Наиболее распространенными из них являются кристаллы KRS-5, KRS-6, KRS-13 и KRS-15. Кристаллы KRS имеют отличающиеся физические свойства и состав, однако общим для них является механическая и химическая стойкость, нерастворимость в воде, а также широкая полоса прозрачности от видимого до дальнего ИК ( $\lambda = 30 - 50$  мкм) диапазона.

Во втором разделе главы приводится сравнительный анализ двух наиболее подходящих для АО применений кристаллов семейства: KRS-5 и KRS-6. Показатели преломления кристаллов имеют соответственно значения  $n = 2.37$  для KRS-5 и  $n = 2.18$  для KRS-6 на длине волны  $\lambda = 10.6$  мкм. Отличие составляет порядка 10%, однако оказывает существенное влияние на АО качество, которое отличается практически вдвое в области сильной дисперсии. Достаточно сильно отличаются также и спектральные области пропускания кристаллов. Кристалл KRS-6 выигрывает у коротковолновой границы, где он

прозрачен до 400 нм против 500 нм для кристалла KRS-5, однако существенно уступает в длинноволновой области, где является прозрачным лишь до 30 мкм, в то время как кристалл KRS-5 – до 50 мкм. Диапазон прозрачности кристалла KRS-5, таким образом, превосходит аналогичные параметры как InI, так и всех кристаллов семейства галогенидов ртути, фактически являясь наилучшим по этой характеристике среди АО кристаллов в ИК области спектра.

Детальные расчеты акустических и акустооптических характеристик, представленные в третьем разделе показали, что качественно все полученные зависимости кристаллов KRS-5 и KRS-6 очень близки во всех режимах и геометриях взаимодействия, однако в количественных характеристиках во всех случаях выигрывает кристалл KRS-5. Расчеты проводились для поперечного, полуколлинеарного и обратного коллинеарного режимов взаимодействия в основных плоскостях кубических кристаллов (001) и (1 $\bar{1}$ 0). Для указанных плоскостей и трех режимов дифракции были рассчитаны акустические характеристики и зависимости коэффициентов АО качества для возможных поляризаций электромагнитной волны с длиной волны  $\lambda = 20$  мкм. На основе анализа полученных зависимостей были выделены наиболее значимые и перспективные конфигурации взаимодействия. В частности, для поперечной дифракции наибольшее значение коэффициента АО качества составило  $M_2 = 590 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  для сдвиговой волны в направлении [100]. Кроме того, показано, что в обеих плоскостях существует конфигурация, в которой дифракция на квазипродольной волне обладает важным для практических применений свойством сохранения поляризации исходного излучения. Коэффициент качества в данных конфигурациях достигает значения  $M_2 = 160 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ . Особого внимания требуют режимы полуколлинеарной и обратной коллинеарной дифракции (Табл. 6). Показана возможность реализации режима обратного коллинеарного взаимодействия с частотой ультразвука  $f = 240$  МГц и коэффициентом АО качества  $M_2 = 130 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ , а также полуколлинеарного режима с частотой  $f = 225$  МГц и коэффициентом АО качества  $M_2 = 210 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ .

Тип дифракции	Плоскость УЗ	Направление УЗ	Тип волны	Частота, МГц	$M_2, 10^{-15}$ $c^3/кг$
Полуколлинеарная	(001)	21° от оси X	QS	210	110 (изотропная)
	(1 $\bar{1}$ 0)	31° от оси Z	S	225	210 (анизотропная)
Коллинеарная	(001)	20° от оси X	QS	240	85 (изотропная)
	(1 $\bar{1}$ 0)	38° от оси Z	S	240	130 (анизотропная)

Табл. 6. Наилучшие конфигурации коллинеарного и полуколлинеарного АО взаимодействия в кристалле KRS-5.

В пятой главе работы рассматривается возможность создания АО фильтра на кристалле KRS-5, работающего в режиме обратного коллинеарного взаимодействия. Первый раздел главы посвящен теоретическому исследованию невязимных эффектов в коллинеарном режиме в кристалле KRS-5. В отличие от случая, рассмотренного в первой главе, приближение слабой связи здесь оказывается невозможным ввиду высоких значений эффективности дифракции.

Во втором разделе главы приводятся результаты численного решения полных уравнений связанных мод для случая коллинеарного АО взаимодействия на продольной ультразвуковой волне, распространяющейся вдоль оси [110]. На Рис. 4а показаны зависимости эффективности дифракции от длины волны электромагнитного излучения. Плотность потока энергии ультразвука для всех графиков одинакова и равна 1 Вт/мм<sup>2</sup>. Вид полученных кривых существенно отличается от наиболее часто встречающегося в других режимах взаимодействия монотонного снижения эффективности дифракции с ростом длины волны. В частности, максимальные эффективность дифракции, а также эффект невязимности достигаются в диапазоне длин волн 20...35 мкм. Кроме того показано, что эффективность дифракции возрастает с увеличением длины области взаимодействия до значений порядка  $l = 10$  см. Влияние невязимности на частотную полосу устройства показано на Рис. 4б. Видно, что при длинах волн 30 мкм и более встречное распространение волн обеспечивает заметно меньшую частотную полосу  $\delta f$ , чем попутное, что также согласуется с результатами,

полученными в первой главе для кристалла германия. При этом соответствующее значение разрешающей способности  $f/\delta f$  превышает значение  $R = 25\,000$  при длине взаимодействия 20 см, однако этому случаю соответствует весьма малая эффективность дифракции (порядка нескольких процентов), и поэтому практическое использование подобной конфигурации фильтра затруднено.

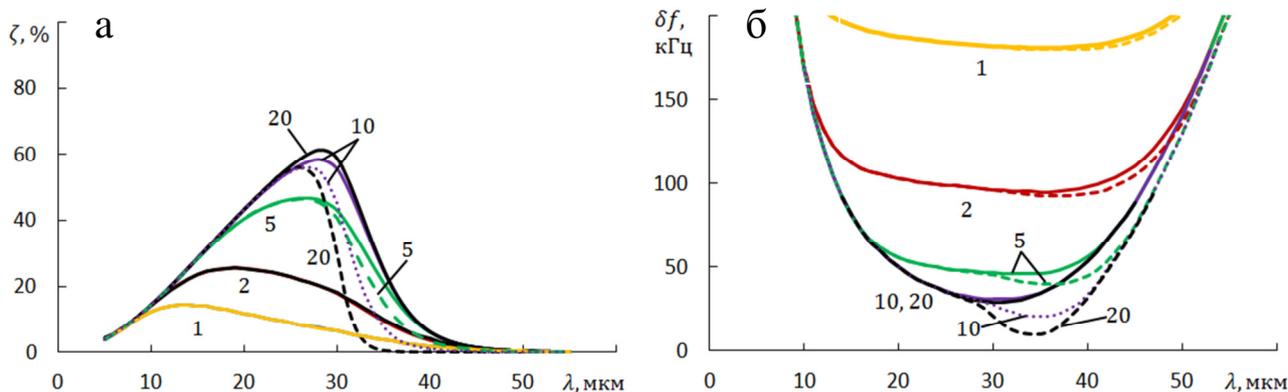


Рис. 4. Зависимость эффективности дифракции (а) и частотной полосы от длины волны излучения при различных размерах области взаимодействия. Сплошная линия – значение параметра при попутном направлении взаимодействия, пунктирная – при встречном направлении. Цифры около кривых соответствуют длине области взаимодействия в сантиметрах.

Был также исследован невзаимный эффект, связанный с доплеровским сдвигом частоты электромагнитной волны, который имеет место вне зависимости от поглощения взаимодействующих волн в среде и характеризуется следующей величиной:

$$F = \frac{2nV}{c} \left(1 - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}\right) f_{\text{синхр}}, \quad (6)$$

Результаты расчетов показали, что величина  $F$ , характеризующая невзаимный эффект, во всех случаях принимает значения меньше единицы, что означает незначительное проявление данного эффекта.

Третий раздел главы посвящен расчетам параметров и оптимальной геометрии коллинеарного АО фильтра на кристалле KRS-5. В случае обратного коллинеарного режима классическое прикрепление пьезопреобразователя к грани кристалла, противоположащей оптической, приведет к отражению электромагнитного излучения от его металлического электрода. В качестве

решения данной проблемы предложено возбуждение продольной акустической волны и дальнейшая трансформация ее в сдвиговую при отражении от соседней грани клиновидной ячейки. В соответствии с расчетами четвертой главы наиболее интересным является направление, лежащее в плоскости (110) под углом 37° градусов к оси [001]. Для определения геометрии ячейки была решена акустическая задача отражения акустической волны от свободной грани кристалла, при котором в общем случае возникает три отраженных волны с различными поляризациями. В соответствии с проведенными расчетами был определен угол наклона отражающей грани 63° (Рис. 5а) для получения необходимой сдвиговой волны.

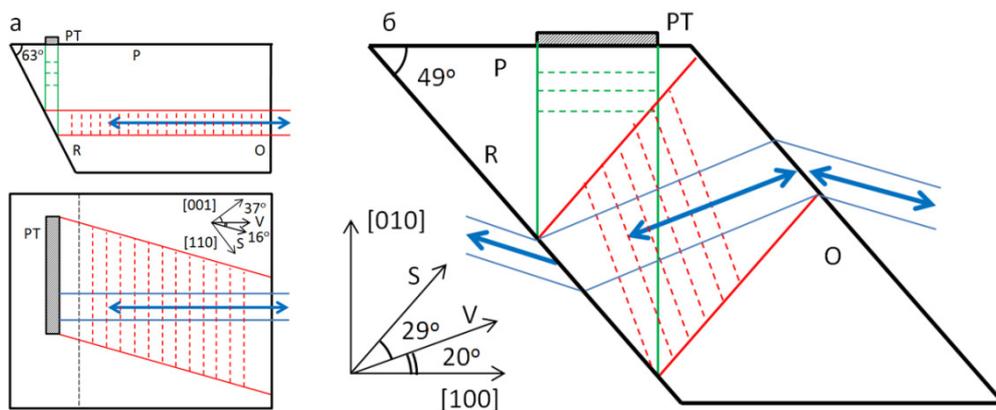


Рис. 5. Схема коллинеарной АО ячейки в плоскости (110) (а) и в плоскости (001) (б).

Коэффициент трансформации этой волны имеет высокое значение  $R^{ref1} = 0.868$ , в то время как для двух других отраженных волн условие брэгговского синхронизма не выполняется, поэтому они не влияют на дифракцию. Рассчитанное значение эффективности коллинеарной дифракции составило величину 1.4 % на 1 Вт мощности сдвиговой акустической волны. С учетом потерь энергии вследствие затухания и трансформации акустических волн реальная эффективность дифракции принимает значение порядка 1 % на 1 Вт. Для найденного оптимального размера преобразователя 1 мм × 9 мм, позволяющего безопасно подавать на устройство мощность до 10 Вт, и в непрерывном режиме устройство имеет 10 %-ную эффективность дифракции. Частотная полоса дифракции равна  $\delta f = 40$  кГц, а соответствующая спектральная полоса равна  $\Delta\lambda = 3.3$  нм на длине волны  $\lambda = 20$  мкм. Это

обеспечивает высокую разрешающую способность АО фильтра  $R = 5400$ . Угловая апертура устройства имеет значение  $\Delta\theta = 3.5^\circ \times 3.5^\circ$  вне кристалла.

Наилучшее направление обратной коллинеарной дифракции в плоскости (001) составляет угол  $20^\circ$  с осью [100]. Такой фильтр обладает меньшими возможностями, однако проще в изготовлении из-за больших допусков в ориентации среза кристалла. Аналогично описанному выше, схема АО ячейки основана на преобразовании продольной акустической моды в квазисдвиговую при отражении от грани кристалла (Рис. 5б). Угол наклона отражающей грани имеет величину  $49^\circ$ , а коэффициент трансформации – 86%. Важной особенностью дифракции в данной геометрии является то, что дифракция не сопровождается сменой поляризации излучения. Кроме того, излучение с поляризацией вдоль [001] заходит и покидает кристалл под углом Брюстера, что исключает потери при отражении от оптических граней, а излучение с другой поляризацией испытывает значительные френелевские потери. Значение эффективности дифракции достигает значения 0.15% на 1 Вт управляющей мощности. Частотная полоса и разрешающая способность равны  $\delta f = 38$  кГц и  $R = 6400$  соответственно. При этом относительная простота изготовления делает данную конфигурацию весьма перспективной. В соответствии с описанной геометрией в плоскости (001) был изготовлен экспериментальный прототип коллинеарной АО ячейки. Планирующийся эксперимент по наблюдению обратной коллинеарной дифракции должен проходить с длиной волны излучения  $\lambda = 10.6$  мкм и соответствующей частотой синхронизма ультразвука  $f = 450$  МГц. Ультразвуковая волна столь высокой частоты испытывает сильное затухание, что существенно снижает длину АО взаимодействия, а также его эффективность. Оценка эффективности дифракции с учетом затухания и прохождения склейки с буфером-возбудителем акустической волны, позволяет ожидать значение порядка  $\zeta = 10^{-5} = 0.001\%$  на 1 Вт подаваемой мощности, что существенно ниже, чем на вдвое большей длине волны  $\lambda = 20$  мкм. Тем не менее, подобные значения эффективности дифракции возможно зарегистрировать при помощи высокочувствительной схемы синхронного детектирования. На

данный момент в режиме поперечной дифракции проведены исследования распределения акустического поля в ячейке, а также экспериментально подтверждена генерация нужной акустической моды при отражении продольной волны от свободной грани кристалла.

В последнем разделе главы исследованы поляризационные свойства высокочастотного коллинеарного взаимодействия в оптически изотропном кристалле. Для определенности, рассмотрение проведено для плоскости (110). Показано, что в отличие от оптически анизотропных сред, в случае изотропных сред, к которым относится кристалл KRS-5, в качестве базисных векторов могут быть выбраны любые два взаимно перпендикулярных вектора  $\vec{d}^\perp$  и  $\vec{d}^\parallel$ , которые перпендикулярны также волновому вектору  $\vec{k}$ . В свою очередь, дифрагированное излучение будет представлять собой суперпозицию волн  $\vec{d}^\perp$  и  $\vec{d}^\parallel$ , являющихся результатами соответствующих дифракционных переходов. Точное рассмотрение позволяет сделать важный вывод, что поляризации падающего и дифрагированного излучений в общем случае симметричны относительно направления, лежащего под углом  $45^\circ$  относительно направления [110]. Вследствие этого эллиптичность излучения сохраняется в процессе дифракции, а направление вращения электромагнитного вектора изменяется. Еще одним важным выводом является то, что равенство нулю фотоупругой постоянной, соответствующей «анизотропной» или «изотропной» дифракции в каком-то конкретном базисе не означает невозможности изменения или сохранения поляризации падающего излучения. Данные выводы справедливы для всех типов дифракции на чисто сдвиговой акустической волне в оптически изотропной среде. Таким образом, обратная коллинеарная дифракция фактически является брэгговским отражением электромагнитного излучения от ультразвуковой волны, тогда как АО ячейка обладает свойствами сохраняющего поляризацию анизотропного зеркала. Поляризационные свойства описанной геометрии взаимодействия, в частности, позволяют легко отделить дифрагированное излучение от падающего при помощи поляризационной призмы.

## Основные результаты диссертационной работы

В диссертационной работе исследованы особенности АО взаимодействия в среднем, дальнем инфракрасном и терагерцевом диапазонах. Для данных диапазонов показана возможность реализации новых режимов АО взаимодействия и устройств, а также изучены оптические, акустические и АО характеристики ряда перспективных материалов: кристаллов семейств KRS, галогенидов ртути, йодида индия, германия, парателлурита, йодноватой кислоты и йодата лития. При выполнении работы были получены следующие основные результаты:

1) Показано, что расширение области применения АО устройств в дальний ИК диапазон возможно при использовании материалов, обладающих наибольшими значениями АО качества, существенном увеличении области АО взаимодействия, а также акустической мощности. Обоснована необходимость поиска новых высокоэффективных АО материалов, способных удовлетворить указанным требованиям.

2) Измерены спектры пропускания, показатели преломления и коэффициенты поглощения кристаллов парателлурита, йодноватой кислоты и йодата лития в терагерцевом диапазоне вплоть до длины волны  $\lambda = 2500$  мкм. С учетом измеренных значений коэффициентов поглощения электромагнитного излучения показано, что кристаллы парателлурита, йодноватой кислоты и йодата лития могут быть эффективно применены в АО устройствах терагерцевого диапазона на длинах волн  $\lambda > 800$  мкм,  $\lambda > 550$  мкм и  $\lambda > 450$  мкм соответственно.

3) Впервые проведены оценки коэффициентов АО качества и эффективности дифракции в терагерцевом диапазоне длин волн для кристаллов парателлурита, йодноватой кислоты и йодата лития. Показано, что вследствие существенного увеличения показателя преломления коэффициенты АО качества в данном диапазоне могут возрастать более чем на 2 порядка по сравнению с видимым диапазоном: до значения  $M_2 = 100\,000 \times 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$  для

сдвиговой волны в направлении  $[110]$  в кристалле парателлурита, и значений  $M_2 = 2500 \times 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$  и  $M_2 = 400 \times 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$  для продольных волн в направлении  $[001]$  в кристаллах йодноватой кислоты и йодата лития соответственно.

4) Впервые измерены значения всех коэффициентов АО качества на продольных акустических волнах, скоростей продольных волн, а также главных показателей преломления нового кристалла йодида индия, прозрачного в диапазоне длин волны  $\lambda = 0.63 - 50$  мкм. Значения скоростей продольных волн лежат в диапазоне  $V = 1.96 \div 2.23$  км/с. Наибольшее значение коэффициента АО качества на продольной волне в кристалле достигает значения  $M_2 = 1100 \times 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$  на длине волны  $\lambda = 1.15$  мкм. Показатели преломления кристалла в области отсутствия дисперсии ( $\lambda = 10.6$  мкм) лежат в диапазоне  $n = 2.42 \div 2.89$ . Показана высокая эффективность и перспективность применения данного кристалла в акустооптике среднего и дальнего ИК диапазонов.

5) Впервые проведены измерения коэффициентов АО качества и рассчитаны соответствующие эффективные фотоупругие константы кристалла бромида ртути, прозрачного в диапазоне длин волн  $\lambda = 0.42 - 30$  мкм. Обоснована возможность использовать фотоупругие константы кристалла каломели для оценки недостающих коэффициентов АО качества кристалла бромида ртути. Проведены расчеты коэффициентов АО качества бромида ртути на сдвиговой волне в плоскости  $(1\bar{1}0)$  и показано, что его максимальное значение достигает  $M_2 = 1300 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ .

6) Исследована возможность реализации широкоапертурного режима АО взаимодействия в кристалле бромида ртути во всем ИК диапазоне прозрачности кристалла. Показано, что наилучшие параметры данного взаимодействия достигаются в плоскости  $(1\bar{1}0)$ . Рассчитаны зависимости спектрального разрешения, угловой апертуры, частоты синхронизма устройства на кристалле бромида ртути от длины волны электромагнитного излучения. Предложена геометрия взаимодействия, позволяющая обеспечить разрешающую способность

$R > 200$ , угловую апертуру  $\Delta\theta > 3.7^\circ$  и эффективность дифракции  $\zeta > 1.1 \text{ \%}/\text{Вт}$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 8 - 12 \text{ мкм}$ .

7) Предложена новая улучшенная геометрия поляризационной призмы типа Глана на кристаллах хлорида, бромида и йодида ртути. Показано, что предложенная геометрия дает возможность существенно расширить диапазон работы кристаллических поляризаторов с максимального на данный момент значения длины волны  $\lambda = 6$  (для  $\text{MgF}_2$ ) до длины волны  $\lambda = 32$  для кристалла йодида ртути. Проведены расчеты, показывающие, что практически во всем диапазоне прозрачности устройство будет обладать симметричной угловой апертурой  $\Delta\theta = \pm 10.8^\circ$ , кратно превышающей существующие аналоги, и коэффициентом пропускания не менее 69 % с возможностью увеличения при использовании просветления кристалла.

8) Рассмотрены акустооптические свойства кристаллов галогенидов таллия KRS. Установлено, что наибольшей эффективностью в инфракрасном диапазоне среди них обладает кристалл KRS-5, прозрачный в диапазоне  $\lambda = 0.50 - 50 \text{ мкм}$ , чьи коэффициенты АО качества в 1.5-2 раза превышают аналогичные значения в кристалле KRS-6. Впервые проведены расчеты коэффициентов АО качества в основных плоскостях кристалла для полуколлинеарного и обратного коллинеарного режимов дифракции на длине волны  $\lambda = 20 \text{ мкм}$ . Установлено наибольшее значение АО качества  $M_2 = 590 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  для сдвиговой волны в направлении [100].

9) Показана возможность создания и рассчитана геометрия АО устройств, сохраняющих состояние поляризации дифрагирующего излучения в плоскостях  $(1\bar{1}0)$  и  $(001)$  кристалла KRS-5. Рассчитан коэффициент АО качества, достигающий в данных геометриях значения  $M_2 = 160 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  на длине волны  $\lambda = 20 \text{ мкм}$ .

10) Показана возможность реализации нового режима высокочастотного коллинеарного взаимодействия в кристалле KRS-5 в дальнем ИК диапазоне. Рассчитаны значения частоты синхронизма  $f = 240 \text{ МГц}$  и  $M_2 = 130 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$  для длины волны излучения  $\lambda = 20 \text{ мкм}$ . Установлено, что

использование полуколлинеарного режима в кристалле KRS-5 является нецелесообразным ввиду того, в режиме обратного коллинеарного взаимодействия коэффициент АО качества более чем в 1.5 раза превышает аналогичное значение в полуколлинеарном режиме, в то время как частота АО синхронизма имеет лишь на 10% большее значение.

11) Предложены два варианта и проведена оптимизация параметров геометрии новых коллинеарных АО фильтров кристалле KRS-5 в плоскостях  $(1\bar{1}0)$  и  $(001)$ , в основе работы которых лежит трансформация продольной акустической моды в сдвиговую. Рассчитаны эффективности дифракции, составившие  $\zeta' = 1\%/Вт$  и  $\zeta' = 0.15\%/Вт$  для плоскостей  $(1\bar{1}0)$  и  $(001)$ , а также разрешающие способности –  $R = 5400$  и  $R = 6400$  соответственно. Коэффициенты трансформации акустических волн составили соответственно значения 86% и 87%.

12) Разработана и изготовлена экспериментальная АО ячейка, позволяющая исследовать АО дифракцию в кристалле KRS-5 как в поперечном, так и в коллинеарном режимах. Ячейка позволила учесть потери акустической энергии при распространении и трансформации акустической моды и рассчитать ожидаемую эффективность дифракции в обратном коллинеарном режиме в плоскости  $(001)$  кристалла KRS-5 на длине волны  $\lambda = 10.6$  мкм. На основе полученных данных разработан план эксперимента по наблюдению обратной коллинеарной дифракции на длине волны  $CO_2$  лазера  $\lambda = 10.6$  мкм и частоте синхронизма  $f = 450$  МГц.

13) Впервые проведен точный учет влияния невзаимных эффектов двух типов на параметры обратного коллинеарного взаимодействия вдоль оси  $[110]$  во всей области прозрачности кристалла KRS-5. Установлено, что наибольший эффект вносится невзаимностью, связанной с затуханием волн, и достигается на длинах волн, превышающих значение  $\lambda = 20$  мкм. Показано, что в случае встречного распространения электромагнитной и акустической волн на длине волны  $\lambda = 30$  мкм наблюдается кратное увеличение разрешающей способности

фильтра по сравнению с попутным распространением волн вплоть до значения  $R = 25\ 000$  при достаточно большой длине взаимодействия.

14) Исследованы поляризационные свойства обратного коллинеарного взаимодействия. Показано, что в оптически изотропной среде возможен произвольный выбор базисных векторов для описания поляризации. При этом поляризация дифрагированного излучения может как совпадать, так и отличаться от поляризации падающего излучения. Установлено, что при дифракции на чистой сдвиговой акустической моде сохраняется эллиптичность дифрагирующего излучения, а направление вращения электромагнитного вектора изменяется.

### Публикации автора по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих*

*Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:*

- A1. **Пороховниченко Д.Л.,** Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б. *Условия реализации обратного изотропного коллинеарного режима акустооптического взаимодействия в кристаллах германия, йодноватой кислоты и германия // Известия РАН. Серия физическая, 2016, Т. 80, № 2, с. 224–228. IF = 0,476 (Scopus)*
- A2. **Пороховниченко Д.Л.,** Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Кузнецов С.В., Фёдоров П.П., Кузнецов М.С., Лисицкий И.С., Осико В.В. *Акустооптическое взаимодействие в кристалле моноиодида индия // Доклады Академии наук, 2017, Т. 476, № 3, с. 276–279. IF = 0,679 (Scopus)*
- A3. Voloshinov V.B., **Porokhovnichenko D.L.,** Dyakonov E.A. *Optimization of acousto-optic interaction geometry in KRS-5 crystal for far-infrared applications // Optical Engineering, 2017, Vol. 56, No. 8, P. 087102. IF = 1,084 (WoS)*
- A4. **Porokhovnichenko D.L.,** Voloshinov V.B., Dyakonov E.A., Komandin G.A., Spector I.E., Travkin V.D. *Application potential of paratellurite and iodic acid crystals for acousto-optics in the Terahertz range // Physics of Wave Phenomena, 2017, Vol. 25, No. 2, pp. 114–118. IF = 1,075 (Scopus)*

- A5. Дьяконов Е.А., Пороховниченко Д.Л. *Обратное коллинеарное акустооптическое взаимодействие в кристалле КРС-5 и невзаимные эффекты* // Известия РАН. Серия физическая, 2018, Т. 82, № 11, с. 1543–1547. **IF = 0,476 (Scopus)**
- A6. Voloshinov V.B., **Porokhovnichenko D.L.**, Dyakonov E.A. *Design of far-infrared acousto-optic tunable filter based on backward collinear interaction* // Ultrasonics, 2018, Vol. 88, pp. 207–212. **IF = 2,890 (WoS)**
- A7. **Porokhovnichenko D.L.**, Ryu J., Zinkin D.V., Voloshinov V.B. *Analysis of wide-angle acousto-optic interaction geometry in single crystal mercury bromide* // Proceedings of SPIE, 2019, Vol. 11210, P. 112100M. **IF = 0,453 (Scopus)**
- A8. **Porokhovnichenko D.L.**, Dyakonov E.A., Kuznetsov S.V., Voronov V.V., Fedorov P.P., Zaramenskikh K.S., Gasanov A.A., Zhukova L.V., Korsakov A.S., Salimgareev D.D. *Indium iodide single crystal: breakthrough material for infrared acousto-optics* // Optics Letters, 2020, Vol. 45, No. 13, pp. 3435–3438. **IF = 3,776 (WoS)**
- A9. Dyakonov E.A., **Porokhovnichenko D.L.**, Ryu J., Balakshy V.I. *Implementation of the wide-angle acousto-optical interaction geometry in a mercury bromide single crystal* // Applied Optics, 2021, Vol. 60, No. 8, pp. 2348–2353. **IF = 1,980 (WoS)**
- A10. **Porokhovnichenko D.L.**, Dyakonov E.A., Ryu J., Balakshy V.I. *Broadband Glan-type polarization scheme based on mercury halide crystal* // Optical Engineering, 2021, Vol. 60, No. 2, P. 020501. **IF = 1,084 (WoS)**

*Публикации в сборниках и тезисы докладов:*

- A11. Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б. Условия реализации обратного изотропного коллинеарного режима акустооптического взаимодействия в кристаллах йодноватой кислоты и германия. – В сб.: Сборник трудов 15-й Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн". Секция 7. Акустика и акустооптика, с. 37-39, 2015.
- A12. Волошинов В.Б., Дьяконов Е.А., Пороховниченко Д.Л. *Условия реализации высокочастотного коллинеарного режима акустооптического*

- взаимодействия в терагерцевом диапазоне электромагнитных волн.* – В сб.: Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Материалы 8-й Международной конференции, с. 104-107, 2015.
- A13. Пороховниченко Д.Л., Волошинов В.Б., Дьяконов Е.А., Командин Г.А., Спектор И.Е., Травкин В.Д. *Возможности применения кристаллов парателлурита и йодноватой кислоты в акустооптике терагерцевого излучения.* – В сб.: Сборник трудов 15-й Всероссийской школы-семинара "Волновые явления в неоднородных средах". Секция 7. Акустоэлектроника и акустооптика, с. 24-27, 2016.
- A14. Porokhovnichenko D.L., Djakonov E.A., Nikitin P.A., Voloshinov V.B. *Influence of Electromagnetic and Acoustic Absorption on Properties of Backward Collinear Acousto-Optic Interaction.* – В сб.: Preliminary Program and Abstracts of the 19-th International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", pp. 71-74, 2016.
- A15. Дьяконов Е.А., Пороховниченко Д.Л. *Полуколлинеарный режим взаимодействия терагерцевых электромагнитных волн с ультразвуком в кристалле парателлурита.* – В сб.: VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов, с. 344-345, 2017.
- A16. Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б. *Оптимальные параметры акустооптического взаимодействия в кристалле KRS-5.* – В сб.: VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов, с. 84-85, 2017.
- A17. Дьяконов Е.А., Пороховниченко Д.Л., Волошинов В.Б. *Оптимизация геометрии акустооптического взаимодействия в кристалле KRS-5.* – В сб.: Сборник трудов 16-й Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" им. проф. А.П. Сухорукова. Секция 10. Акустика и акустооптика, с. 14-17, 2017.

- A18. Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Кузнецов С.В., Федоров П.П., Кузнецов М.С., Лисицкий И.С. *Акустооптическое взаимодействие в кристалле йодида индия*. – В сб.: Сборник трудов 16-й Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" им. проф. А.П. Сухорукова. Секция 10. Акустика и акустооптика, с. 36-39, 2017.
- A19. Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A. *Transverse, Backward Collinear and Semi-Collinear Acousto-Optic Interaction in KRS-5 and KRS-6 Crystals*. – В сб.: XX International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", pp. 61-64, 2017.
- A20. Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Кузнецов С.В., Федоров П.П., Кузнецов М.С., Лисицкий И.С. *Измерение скоростей продольных ультразвуковых волн в монокристалле йодида индия для акустооптических применений*. – В сб.: Программа и аннотации докладов 2-й Всероссийской акустической конференции и 30-й сессии Российского акустического общества, с. 154-155, 2017.
- A21. Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A., Voloshinov V.B., Kuznetsov S.V., Fedorov P.P., Kuznetsov M.S., Lisitskiy I.S. *Acousto-optic Properties of Indium Iodide Single Crystal*. – В сб.: 13th School on Acousto-Optics and Applications, pp. 65-65, 2017.
- A22. Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б. *Разработка акустооптических фильтров на основе обратного коллинеарного взаимодействия в кристалле KRS-5*. – В сб.: Сборник трудов 16-й Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» им. проф. А.П. Сухорукова. Секция 7. Акустоэлектроника и акустооптика, с. 41-44, 2018.
- A23. Дьяконов Е.А., Пороховниченко Д.Л. *Обратное коллинеарное акустооптическое взаимодействие в кристалле KRS-5 и невзаимные эффекты*. – В сб.: Сборник трудов 16-й Всероссийской школы-семинара

«Волновые явления в неоднородных средах» им. проф. А.П. Сухорукова.  
Секция 7. Акустоэлектроника и акустооптика, с. 16-20, 2018.

- A24. Пороховниченко Д.Л., Рю Чж., Зинкин Д.В., Волошинов В.Б. *Анализ широкоапертурной геометрии взаимодействия в акустооптическом кристалле бромида ртути.* – В сб.: Сборник трудов 17-й Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» им. проф. А.П. Сухорукова. Секция 9. Акустика и акустооптика, с. 84-87, 2019.
- A25. Зинкин Д.В., Пороховниченко Д.Л. *Анализ широкоапертурной геометрии взаимодействия в акустооптическом кристалле бромида ртути.* – В сб.: Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019». Секция "Физика", с. 9-9, 2019.
- A26. Porokhovnichenko D.L., Ryu J., Zinkin D.V., Voloshinov V.B. *Analysis of wide-angle acousto-optic interaction geometry in single crystal mercury bromide.* – В сб.: Abstracts of 14th School on Acousto-Optics and Applications, pp. 60-60, 2019.
- A27. Пороховниченко Д.Л., Рю Чж., Зинкин Д.В., Волошинов В.Б. *Акустические, оптические и акустооптические свойства кристаллов бромида ртути.* – В сб.: Программа и аннотации докладов XXXII-ой сессии Российского акустического общества, с. 102-102, 2019.
- A28. Чиж И.К., Поликарпова Н.В., Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А. *Сравнительный анализ акустических и акустооптических характеристик инфракрасных акустооптических монокристаллов галогенидов ртути.* В сб.: Сборник трудов 17-й Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» им. проф. А.П. Сухорукова. Секция 7. Акустика и акустооптика, с. 20-23, 2020.
- A29. Пороховниченко Д.Л., Дьяконов Е.А., Кузнецов С.В., Воронов В.В., Федоров П.П., Кузнецов М.С., Зараменских К.С., Гасанов А.А., Жукова Л.В., Корсаков А.С., Салимгареев Д.Д. *Кристалл йодида индия как новый материал для акустооптики.* В сб.: Сборник трудов 17-й Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» им. проф. А.П. Сухорукова. Секция 7. Акустика и акустооптика, с. 24-27, 2020.