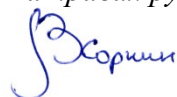


**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи



Хоркин Владимир Сергеевич

**Управление излучением среднего и дальнего
инфракрасного диапазона методами акустооптики**

Специальность:

01.04.03 — радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

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

Научный руководитель: **Наталья Вячеславовна Поликарпова**
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Егеров Сергей Викторович**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделением теоретической и прикладной акустики Акустического института имени академика Н.Н. Андреева

Мачихин Александр Сергеевич
доктор технических наук,
заведующий лабораторией акустооптической спектроскопии Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН)

Доброленский Юрий Сергеевич
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник отдела физики планет Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита состоится «29» октября 2020 года в 16 часов 00 минут 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.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27).

С диссертацией, а также с сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме можно ознакомиться на сайте ИАС «Истина»: <https://istina.msu.ru/dissertations/307651423/>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.01.08
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru

О.Г. Косарева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Акустооптика – раздел физики, изучающий взаимодействие электромагнитных волн с акустическими возмущениями, которые распространяются в упругой среде. В основе причины такого взаимодействия лежит явление фотоупругости, которое имеет место в любых средах. Акустооптический (АО) эффект был теоретически предсказан Бриллюэном в 1921 году, а также независимо Мандельштамом в 1922 году.

После открытия лазеров в 1960-х годах акустооптика стала активно использоваться для управления параметрами лазерного излучения. Существующие на сегодняшний день АО устройства позволяют эффективно управлять интенсивностью, поляризацией, частотой, фазой и направлением распространения оптического излучения. При этом АО устройства характеризуются малыми оптическими потерями, достаточно высоким быстродействием, а также небольшими габаритами и весом.

В настоящее время большинство созданных АО устройств работают в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне. Однако этого недостаточно для полноценного решения новых задач, которые возникают в настоящее время, в частности, задач контроля экологической обстановки. Спектры большинства парниковых газов, включая метан, оксиды азота, серу, соединения хлора, ароматические углеводороды и фенолы имеют достаточно сильные полосы поглощения в диапазоне от $\lambda = 5$ до $\lambda = 15$ мкм ИК спектра. На сегодняшний день применение АО устройств в инфракрасном диапазоне сильно ограничено. Данная ситуация обусловлена фундаментальным свойством АО взаимодействия, эффективность которого обратно пропорциональна квадрату длины волны оптического излучения λ . Это означает, что увеличение длины волны от $\lambda \approx 0.5$ мкм до $\lambda \approx 10$ мкм автоматически приводит к уменьшению эффективности дифракции приблизительно в 400 раз при прочих равных условиях. Поэтому задача исследования свойств материалов, в которых возможно эффективно реализовывать АО взаимодействие в среднем ($\lambda = 2.5 \div 7$ мкм) и дальнем ($\lambda = 7 \div 15$ мкм) ИК диапазоне является актуальной.

В качестве основы для АО взаимодействия в среднем и дальнем ИК диапазоне могут быть рассмотрены многие материалы. Среди них монокристаллы германия (Ge) и теллура (Te), соединения на основе ртути –

каломель (Hg_2Cl_2), йодид ртути (Hg_2I_2) и бромид ртути (Hg_2Br_2), соединения на основе таллия: кристаллы галогенидов таллия (KRS-5, KRS-6 и другие), а также соединения Tl_3AsSe_3 и Tl_3AsS_4 .

К достоинствам перечисленных соединений можно отнести достаточно большой диапазон прозрачности: для большинства материалов длинноволновая граница области прозрачности составляет $\lambda \approx 20$ мкм (теллур, германий, каломель), а для некоторых веществ достигает значения $\lambda \approx 30\text{--}40$ мкм (кристаллы семейства KRS, бромид и йодид ртути). Другой особенностью перечисленных соединений является токсичность. Кроме того, практически все перечисленные материалы не являются широко распространенными в акустооптике. Поэтому зачастую их фундаментальные свойства, такие как показатели преломления n с учетом дисперсии, коэффициенты упругих c_{ijkl} и фотоупругих p_{ijkl} тензоров остаются либо неизвестны, либо их численные значения, имеющиеся в литературе, различаются от источника к источнику.

Например, для монокристаллического германия по литературным данным величины АО качества $M_2 = p_{\text{эфф}}^2 n^6 / \rho v^3$ в случае квазиортогонального взаимодействия на продольной волне, распространяющейся вдоль направления $[111]$, в разных источниках отличаются более чем в 4 раза от $M_2 = 810 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 \text{ кг}^{-1}$ до $M_2 = 180 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 \text{ кг}^{-1}$. Это означает, что эффективные фотоупругие константы $p_{\text{эфф}}$ отличаются по величине примерно в 2 раза. Схожая ситуация наблюдается и для монокристаллического теллура – численное значение фотоупругой константы p_{41} по одним литературным данным составляет величину $p_{41} = 0.28$, а в других источниках приводится значение $p_{41} = 0.14$. Для соединений на основе ртути, например Hg_2Br_2 , в литературе нет точных данных о численном значении фотоупругих постоянных p_{ijkl} .

Кроме того, в кристалле теллура (Te), а также в соединениях на основе ртути (Hg_2Cl_2 , Hg_2Br_2 и Hg_2I_2) существует явление оптической активности. Указанное явление влияет не только на оптические параметры материала, в частности, на величину показателя преломления и поляризацию оптического излучения, но также и на АО характеристики, например, на кривые брэгговского синхронизма. В литературе существуют разные математические модели, описывающие данное явление, исходя из величины удельного вращения плоскости поляризации. При этом необходимо отметить, что для соединений на основе ртути величина удельного вращения плоскости поляризации неизвестна.

Таким образом, приведенный краткий анализ литературных данных показывает, что разработка АО устройств для среднего и дальнего ИК диапазона является важной и актуальной задачей для акустооптики. На данный момент нет единого материала, на основе которого было бы возможно построение АО устройств для рассматриваемого спектрального диапазона. Кроме того, как видно из краткого обзора литературы, не все материалы являются хорошо изученными – часть фундаментальных свойств рассмотренных соединений только предстоит измерить, либо уточнить уже имеющиеся в литературе данные. На основе полученных в диссертационной работе экспериментальных результатов в дальнейшем можно будет проводить расчеты АО устройств, пригодных для управления излучением среднего и дальнего ИК диапазона.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование акустооптического взаимодействия в материалах, прозрачных в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне. Для этого в ходе выполнения диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать акустические, оптические и акустооптические свойства аморфных соединений (стекол) на основе германия (Ge), селена (Se), кремния (Si) и теллура (Te). Разработать методы классификации физических свойств стекол в зависимости от их химического состава. Провести экспериментальное исследование АО ячейки на основе стекла $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ на длине волны $\lambda = 3.39$ мкм и оценить перспективность применения указанного материала в качестве основы для АО приборов среднего и дальнего ИК диапазонов.
2. Экспериментально исследовать АО свойства кристалла германия с целью уточнения величины АО качества при дифракции на продольных акустических волнах, распространяющихся вдоль направлений $[110]$ и $[111]$ в кристалле.
3. Провести теоретический анализ акустических, оптических и акустооптических свойств кубического кристалла KRS-5. Теоретически изучить известный из литературы метод создания наведенной оптической анизотропии путем приложения к образцу внешнего статического давления и применить его к кристаллу KRS-5. Рассчитать зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука для различных величин прило-

женного внешнего статического давления. Экспериментально исследовать акустические и АО свойства свободного кристалла KRS-5. Экспериментально изучить зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука при различных величинах приложенного внешнего статического давления к кристаллу KRS-5.

4. Теоретически проанализировать акустические и акустооптические свойства монокристалла теллура. Провести анализ различных математических моделей, учитывающих влияние явления оптической активности на кривые брэгговского синхронизма на примере кристаллов теллура и парателлурита. Теоретически рассчитать параметры анизотропной АО дифракции на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси X кристалла теллура. Создать АО ячейку на основе кристалла теллура и исследовать анизотропное взаимодействие на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм, измерить акустооптические характеристики созданной ячейки. Измерить эффективность анизотропной дифракции в АО ячейке с целью уточнения численного значения фотоупругой константы p_{41} .
5. Провести теоретический анализ акустических свойств двух модификаций монокристалла теллура, отличающихся друг от друга знаком упругой константы c_{14} . Рассмотреть влияние знака упругого модуля c_{14} на величину фазовой скорости и на направления векторов поляризации упругих волн. Выполнить теоретический расчет параметров АО взаимодействия в плоскости XZ на сдвиговых акустических волнах, распространяющихся вдоль оси X теллура. Провести оценки величины эффективных фотоупругих констант, а также соответствующих им величин АО качества для плоскости XZ кристалла теллура. Рассмотреть геометрии АО взаимодействия, перспективные для проведения эксперимента, позволяющего одновременно уточнить численные значения и знаки фотоупругих констант p_{44} , p_{14} , p_{41} и p_{66} кристалла теллура.

Объект и предмет исследования

Предметом рассмотрения диссертационной работы является АО взаимодействие в акустически и оптически анизотропных средах. В качестве объекта исследования выбраны материалы, прозрачные в среднем и дальнем ИК диапазоне и являющиеся перспективными для создания АО приборов.

Методология исследования

Исследования, проведенные в диссертационной работе, опираются на классические труды отечественных и зарубежных авторов, посвященные изучению АО взаимодействия. Они продолжают и дополняют их в случае, когда АО взаимодействие происходит в среднем и дальнем ИК диапазонах. Так, в ходе выполнения диссертационной работы разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать акустические, оптические и АО параметры различных материалов в произвольных плоскостях и направлениях. Указанная программа позволила выполнить теоретический анализ АО взаимодействия в материалах различных кристаллографических классов, которые исследовались экспериментально в диссертационной работе. Исходя из проведенных расчетов, были созданы АО ячейки из стекла $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, а также кристаллов KRS-5 и теллура. Выполнено сравнение результатов проведенных расчетов с экспериментально полученными данными для АО ячеек из перечисленных материалов.

Научная новизна диссертационной работы

1. Впервые исследованы акустические, оптические и АО свойства стекол с химическим составом $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов для указанных соединений с другими известными стеклами, обладающими близкими химическими составами. Измерены диапазон оптической прозрачности, скорости продольных акустических волн, а также величины АО качества. Предложены два варианта классификации стекол на основе германия, селена и теллура (GeSeTe) и кремния, селена и теллура (SiSeTe), а также их физических свойств в зависимости от химического состава.
2. Впервые для кубического кристалла KRS-5 теоретически проанализирована возможность создания наведенной оптической анизотропии. Впервые экспериментально наблюдалась наведенная оптическая анизотропия в кристалле KRS-5, а также исследовано влияние внешнего статического давления на кривые брэгговского синхронизма. Экспериментально показано, что использование внешнего статического давления позволяет улучшить параметры АО дефлектора на основе KRS-5.
3. Впервые проведен теоретический анализ и сравнение известных из литературы математических моделей, описывающих влияние явления

оптической активности на кривые брэгговского синхронизма на примере кристаллов теллура и парателлуриата.

4. Впервые проведен подробный теоретический расчет характеристик анизотропного АО взаимодействия на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси X кристалла теллура. На основе полученных результатов, создана АО ячейка, при помощи которой экспериментально исследованы параметры анизотропного АО взаимодействия в плоскости XZ теллура. Уточнено численное значение фотоупругой константы p_{41} теллура, которое оказалось равным $p_{41} = 0.16 \pm 0.03$.
5. Впервые теоретически показано, что знак упругого коэффициента c_{14} влияет не только на величины фазовых скоростей кристалла теллура, но и на направления векторов поляризаций акустических волн. Представлен теоретический расчет параметров АО взаимодействия на сдвиговых акустических волнах, распространяющихся вдоль оси X теллура. Предложена схема эксперимента для одновременного измерения численных значений фотоупругих констант p_{44} , p_{14} , p_{41} и p_{66} теллура с учетом их знаков.

Практическая значимость

1. Экспериментально исследованы свойства стекол с химическими составами $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$. Показано, что указанные соединения обладают достаточно широким диапазоном оптической прозрачности $\lambda = 1.5 - 18$ мкм. При этом коэффициент АО качества для образца $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ достигает значения $M_2 = (380 \pm 80) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, а для образца $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ – величины $M_2 = (1200 \pm 200) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$.
2. Для кристалла KRS-5 экспериментально продемонстрирована возможность использования внешнего статического давления для управления наведенной оптической анизотропией. Экспериментально показано влияние внешнего статического давления на АО характеристики KRS-5 на примере зависимостей угла Брэгга от частоты ультразвука.
3. Теоретически рассчитаны и экспериментально проанализированы параметры анизотропного АО взаимодействия на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси X кристалла теллура.
4. Представлено подробное описание влияния модификаций теллура (знака упругого модуля c_{14}) на акустические свойства кристалла. Тео-

ретически показана необходимость учета модификации имеющегося образца теллура при возбуждении в нем сдвиговых акустических волн.

Положения, выносимые на защиту

1. Коэффициенты АО качества стекол с химическим составом $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ достигают значений $M_2 = (380 \pm 80) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ и $M_2 = (1200 \pm 200) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, соответственно. Диапазоны прозрачности указанных стекол составляют $\lambda = 1.2\text{-}17 \text{ мкм}$ и $\lambda = 1.7\text{-}18 \text{ мкм}$, соответственно. Стекла $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ перспективны для применения в акустооптике среднего и дальнего инфракрасного диапазона.
2. В кристалле KRS-5 существует возможность управлять наведенной оптической анизотропией при помощи внешнего статического давления. Внешнее статическое давление величиной $p = 10\text{-}12 \text{ МПа}$ обеспечивает двукратное расширение полосы частот в режиме геометрии АО дефлектора на основе кристалла KRS-5.
3. Сравнение известных математических моделей, описывающих влияние явления оптической активности, показывает качественную зависимость результатов расчета оптических и АО свойств материала от выбранной модели расчета. В широкоапертурной геометрии с нулевым углом среза в кристалле парателлурита отличие частоты АО синхронизма от экспериментального значения $f^* = 9.8 \text{ МГц}$ для модели, основанной на строгом решении уравнения Френеля, составляет $\delta f = 0.5 \text{ МГц}$ или $\delta f/f^* = 5\%$, в то время как для модели видоизмененной поверхности волновых векторов – $\delta f = 4.6 \text{ МГц}$ или $\delta f/f^* = 50\%$.
4. Численное значение фотоупругой константы p_{41} кристалла теллура равно: $p_{41} = 0.16 \pm 0.03$.
5. Знак упругого модуля c_{14} кристалла теллура влияет на направления векторов поляризаций упругих волн, распространяющихся в главных кристаллографических плоскостях кристалла. Неверное определение знака упругого модуля c_{14} приводит к двукратным потерям акустической мощности при возбуждении ультразвуковых волн в кристалле теллура.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается соответствием полученных результатов теоретиче-

ского анализа и экспериментального исследования АО взаимодействия в различных материалах. Проверка созданного программного комплекса по расчету акустических, оптических и акустооптических свойств различных материалов проводилась путем сравнения результатов численного моделирования, аналитического расчета и экспериментального исследования. Кроме того, результаты диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, а также публиковались в рецензируемых журналах.

Апробация работы

По материалам диссертационной работы было сделано 14 докладов на следующих всероссийских и международных конференциях: XV всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах им. А.П. Сухорукова» (5-10 июня, 2016, Можайск, Россия), XIX International conference for young researchers «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems» (20-24 июня, 2016, Санкт-Петербург, Россия), II Всероссийская акустическая конференция (6-9 июня, 2017, Нижний Новгород, Россия), 13th school of acousto-optics and applications (19-23 июня, 2017, Москва, Россия), XX International conference for young researchers «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems» (26-30 июня, 2017, Санкт-Петербург, Россия), XVI всероссийская школа-семинар «Волны в неоднородных средах» им. А.П. Сухорукова (27 мая – 1 июня, 2018, Можайск, Россия), XXI международная молодежная конференция «Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах» (1-5 октября, 2018, Санкт Петербург, Россия), XVII всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» им. А.П. Сухорукова (26-31 мая, 2019, Можайск, Россия), XXII международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (3-7 июня, 2019, Санкт Петербург, Россия), 14th school of acousto-optics and applications (24-27 июня, 2019, Торунь, Польша), XV международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (24-28 июня, 2019, Москва, Россия), International Congress of Ultrasonics (3-6 сентября, 2019, Брюгге, Бельгия), XXXII сессия Российского акустического общества (14-18 октября, 2019, Москва, Россия), XXIII международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (1-5 июня, 2020, Санкт-Петербург, Россия).

Работа выполнена при поддержке грантов Российского научного фонда (РНФ) № 14-12-00380, №14-22-00042, №19-12-00072 и гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №17-07-00369. Работа автора была поддержана грантом для молодых ученых американского акустического общества (ASA).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 21 печатной работе, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 2 статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ и 12 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Список работ автора приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Изложенные в диссертационной работе результаты теоретического анализа и экспериментального исследования АО взаимодействия в различных материалах выполнены непосредственно автором. Все измерения проводились на установке лаборатории акустооптики кафедры физики колебаний физического факультета МГУ. Программный комплекс по численному расчету акустических, оптических и акустооптических свойств материалов создан автором лично за время его обучения в аспирантуре. Стекла на основе германия, селена, кремния и теллура, а также монокристалл теллура предоставлены Л.А. Кулаковой и выращены Физико-Техническим институтом им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург). Кубический кристалл KRS-5 синтезирован государственным научно-исследовательским проектным институтом редкометаллической промышленности “Гиредмет” (г. Москва) под руководством М.С. Кузнецова. Измерение спектров оптической прозрачности проводилось в Центре Коллективного Пользования МГУ под руководством А.И. Ефимовой.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав текста, результатов и выводов диссертационной работы, списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 157 страниц, 65 рисунков и 15 таблиц, список литературы включает в себя 122 работы.

Содержание диссертационной работы

Введение состоит из краткого литературно-исторического обзора, кроме того, в нем формулируется научная значимость и актуальность темы исследования, перечисляются цели и задачи диссертационной работы, приводится ее краткое содержание, формулируются положения, выносимые на защиту. Также во введении содержатся сведения об апробации диссертационной работы.

Первая глава диссертации является обзорной и посвящена теоретическому описанию АО взаимодействия в акустически и оптически анизотропных средах. В §1.1 представлен общий список материалов, на основе которых возможно построение АО приборов в среднем и дальнем ИК диапазоне. В §1.2 приведены основные уравнения, характеризующие АО взаимодействие, которые необходимы для правильного описания и интерпретации полученных в диссертационной работе результатов. Также, в указанном параграфе приводится описание созданного программного комплекса по расчету акустических, оптических и АО свойств материалов, которые принадлежат к различным кристаллографическим классам. Рассматриваются результаты калибровочных расчетов акустических и акустооптических свойств на примере хорошо известных в акустооптике материалов: парателлури-т (TeO_2) и ниобат лития (LiNbO_3). Результаты этих вычислений представлены в §1.3 для акустических свойств и в §1.4 – для акустооптических свойств.

В качестве примера, на рисунке 1 (а) представлены результаты расчета поверхности акустической медленности для кристалла парателлури-та в плоскости XY, а на рисунке 1 (б) – зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука в случае анизотропной дифракции в кристалле парателлури-та на сдвиговой акустической волне вблизи направления $[110]$ кристалла (угол среза $\alpha = 9^\circ$). На рисунках 1 (а)-(б) черным цветом изображены зависимости, рассчитанные исходя из известных аналитических формул, а красными цветом – зависимости, посчитанные численным методом при помощи созданной программы.

Аналогичные графики представлены в диссертационной работе (§1.3) для акустических свойств кристаллов различных классов: кремний (Si, кубическая симметрия, класс $m\bar{3}m$) и ниобат лития (LiNbO_3 , тригональная сингония, класс $3m$). Относительная точность расчетов для созданной программы при вычислении акустических свойств составила $\delta V/V = 5 \cdot 10^{-7}$, а для расчетов анизотропного АО взаимодействия относи-

тельная точность определения угла дифракции составила $\delta\theta_d/\theta = 1 \cdot 10^{-6}$, а относительная точность определения частоты синхронизма – $\delta f/f = 8 \cdot 10^{-7}$.

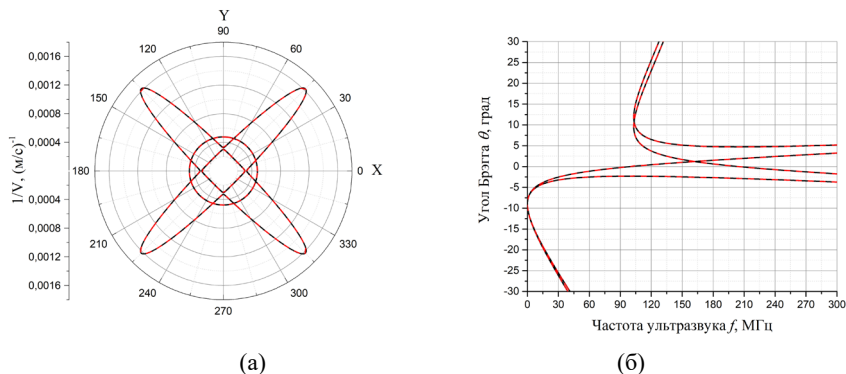


Рисунок 1. Результаты калибровочных расчетов для созданной программы:
(а) – поверхности акустической медленности в плоскости ХУ парателлуриита
(б) – зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука для кристалла парателлуриита

В §1.5 приводится общая постановка задачи отражения и преломления акустических волн на границе раздела двух сред на основе созданной программы. Представлены результаты калибровочных расчетов на примере границы раздела кремний-плавленый кварц как при помощи аналитических выражений, так и при помощи созданной программы. Получены оценки относительной точности расчета коэффициента отражения A_R сдвиговой акустической волны, падающей из кремния в плавленый кварц, которые оказались равными $\delta A_R/A_R = 6 \cdot 10^{-6}$. Результаты главы 1 представлены в §1.6.

Вторая глава посвящена исследованию свойств аморфных соединений (стекол) на основе германия (Ge), селена (Se), кремния (Si) и теллура (Te). В §2.1 описаны общие свойства исследованных стекол. Для удобства представления экспериментальных результатов, исследуемые в диссертационной работе стекла подразделялись на системы, в соответствии с их химическим составом. Кроме того, для описания рассматриваемых соединений каждому стеклу был присвоен собственный идентификационный номер в зависимости от химического состава стекла. Представлено описание проведенных измерений акустических, оптических и АО свойств стекол, принадлежащих к системам GeSeTe и SiSeTe.

В §2.2 описаны измерения оптической прозрачности для нескольких стекол системы GeSeTe и SiSeTe в области от ближнего до дальнего ИК

диапазона. Результаты измерений изображены на рисунке 2 (а) для системы GeSeTe и на рисунке 2 (б) для системы SiSeTe, соответственно. Важно отметить, что стекла с химическими составами $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ (№ 9) и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ (№ 6) были исследованы впервые. Из представленных зависимостей видно, что образцы из исследуемых систем обладают достаточно широким диапазоном прозрачности $\lambda = 1.5\text{--}18\text{ мкм}$, максимальная величина пропускания составила $T \approx 0.6$ для стекла $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $T \approx 0.2$ для стекла $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$. Кроме того, из результатов проведенных измерений следует, что оптические свойства стекла с химическим составом $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ (№ 7) не подвержены деградации с течением времени. На рисунке 2 (б) представлены графики оптической прозрачности для двух образцов: первый был выращен около 20-ти лет назад (черная кривая), а второй – около 40-ка лет назад (красная кривая).

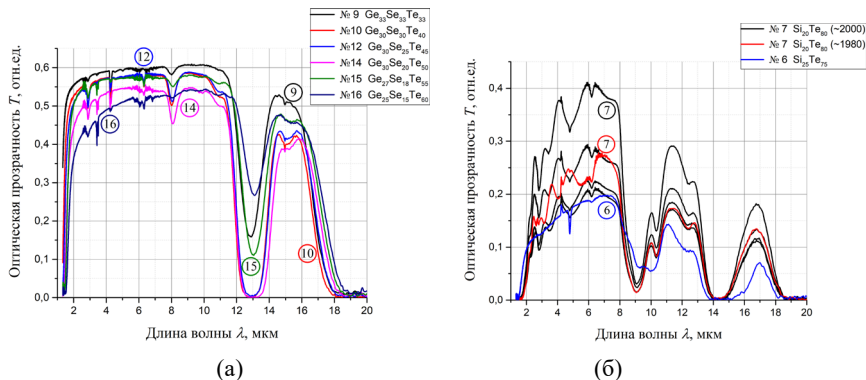


Рисунок 2. Оптическая прозрачность стекол системы GeSeTe (а) и SiSeTe (б) в инфракрасной области электромагнитного спектра

В §2.3 описана методика измерений акустических и АО свойств стекол систем GeSeTe и SiSeTe при помощи созданного буфера на основе стекла ТФ-7. Акустические свойства, а именно фазовые скорости продольных акустических волн измерялись методом эхо-импульсов и АО методом. Измерения АО свойств проводилось методом Диксона на длине волны оптического излучения $\lambda = 3.39\text{ мкм}$ для двух состояний поляризации оптического излучения – параллельного вектору ультразвука ($M_{2\parallel}$) и ортогонального вектору ультразвука ($M_{2\perp}$). Результаты измерений представлены в §2.4 для акустических свойств стекол и в §2.5 для АО свойств стекол, а также кратко приведены в таблице 1 для одного стекла системы SiSeTe и для четырех стекол системы GeSeTe.

Таблица 1. Акустические и АО свойства стекол систем SiSeTe и GeSeTe

№	Химический состав образцов	Акустическая скорость v , м/с	$M_{2 }, 10^{-15} \text{ с}^3 / \text{кг}$	$M_{2\perp}, 10^{-15} \text{ с}^3 / \text{кг}$
6	$\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$	1920 ± 50	1200 ± 200	800 ± 100
9	$\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$	2230 ± 20	380 ± 80	300 ± 40
10	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$	2200 ± 20	420 ± 80	240 ± 40
12	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{25}\text{Te}_{45}$	2200 ± 30	440 ± 80	240 ± 40
16	$\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$	2050 ± 10	1300 ± 250	700 ± 100

Из полученных экспериментальных данных следует, что исследованные стекла обладают достаточно большим коэффициентом АО качества, который достигает величины $M_{2||} = 1300 \pm 250 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 / \text{кг}$ для стекла с химическим составом $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$ (№ 16). Также из таблицы 1 видно, что полученные коэффициенты АО качества стекол сильно зависят от поляризации оптического излучения – например, для стекла $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$ (№ 10) разница составляет практически 2 раза. Это означает, что фотоупругие константы p_{11} и p_{12} имеют различное значение, что позволяет сделать предположение об отличной от нуля величине АО качества при дифракции на сдвиговых акустических волнах в указанном сплаве.

В §2.6 представлен теоретический расчет и экспериментальное измерение коэффициентов АО качества монокристалла германия при дифракции на продольных акустических волнах, распространяющихся вдоль направлений $[110]$ и $[111]$ в кристалле. Также проводится сравнение экспериментально полученных величин АО качества для стекол систем GeSeTe и SiSeTe с величиной АО качества в кристалле германия. В §2.7 представлены два способа классификации стекол и их физических свойств. Рассмотренные методы классификации позволяют более наглядно представлять различные свойства стекол, а также упрощают восприятие информации. В работе предложены два варианта систематизации стекол, которые представлены на рисунке 3 (а)-(б) на примере системы GeSeTe. На рисунке 3 (а) представлена в графическом виде методика классификации стекол при помощи трехмерной диаграммы. Данная классификация основана на том факте, что каждому стеклу GeSeTe ставится в соответствие точка в трехмерном пространстве. Другая методика классификации основана на двумерной диаграмме и изображена на рисунке 3 (б). В этом случае используется свойство записи химического состава стекол системы GeSeTe, в которой концентрация каждого из 3х химических элементов записывается в процентах. Поэтому любое химическое

соединение $\text{Ge}_a\text{Se}_b\text{Te}_c$ содержит только две независимые переменные и их можно представить в двумерном графическом виде.

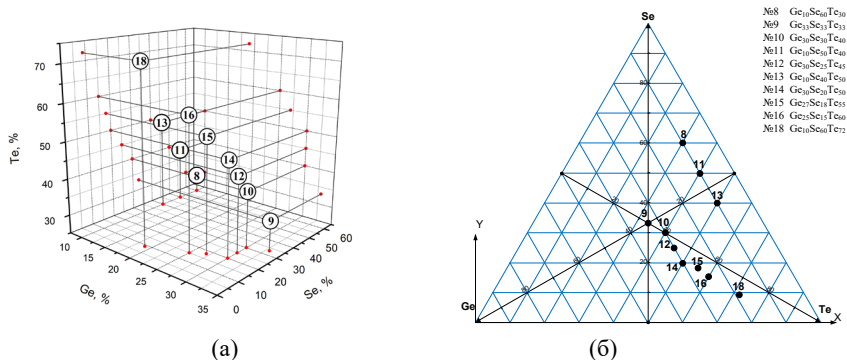


Рисунок 3. Классификация свойств стекол при помощи различных методов:
(а) – метод трехмерных диаграмм, (б) – метод двумерных диаграмм

В §2.8 представлены результаты измерений параметров АО ячейки на основе стекла $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$. В ходе экспериментального исследования для ячейки определены угловая и частотная полосы дифракции по уровню 50% от максимального значения интенсивности дифракции, которые оказались равны $\Delta\theta_d = 0.42^\circ$ и $\Delta f = 11$ МГц, соответственно. Кроме того, измерена максимальная эффективность дифракции, которая оказалась равной $I_d/I_0 = 55 \pm 5\%$ на длине волны оптического излучения $\lambda = 3.39$ мкм и при приложении 1 Вт электрической мощности к ячейке. В §2.9 представлены выводы для главы 2.

В **третьей главе** приведены результаты теоретического расчета акустических, оптических и акустооптических свойств кубического кристалла KRS-5. В §3.1 описана постановка задачи, в §3.2 приводятся общие свойства кубического кристалла KRS-5. В §3.3 представлены результаты проведенного расчета акустических свойств для плоскостей кристалла (001) и (1 $\bar{1}$ 0). В результате расчета определены фазовые скорости, направление векторов поляризации и величины угла акустического сноса ультразвуковых волн в рассматриваемых плоскостях. Для всех акустических волн, распространяющихся вдоль направлений [100], [110] и [111] в кристалле, произведен расчет эффективных фотоупругих констант и величин АО качества. Результаты расчетов приведены в §3.4. Для дальнейшего детального анализа АО свойств кристалла KRS-5 выбрана чистая сдвиговая волна, которая распространяется вдоль направления [100] со скоростью $V = 890$ м/с. Для квазиортогонального АО взаи-

модействия получен коэффициент АО качества равный $M_2 = 1200 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для указанной сдвиговой акустической волны.

В §3.5 подробно рассматривается вопрос создания наведенной оптической анизотропии при помощи внешнего статического давления в кристалле KRS-5. Проанализировано влияние внешнего статического давления на оптические и АО свойства материала. В качестве примера, на рисунке 4 представлено изменение поверхности волновых векторов в кристалле KRS-5 из-за приложения внешнего статического давления p величиной $p = 3 \text{ МПа}$.

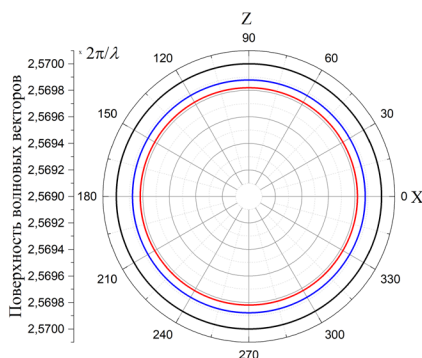


Рисунок 4.Изменение оптических свойств в плоскости XZ кристалла KRS-5 под действием внешнего статического давления $p = 3 \text{ МПа}$, приложенного вдоль оси Y.

Представленная на рисунке 4 зависимость рассчитана для плоскости XZ кристалла, при этом статическое давление приложено вдоль оси Y, то есть ортогонально плоскости рисунка. На рисунке 4 черным цветом изображена поверхность волновых векторов свободного кристалла KRS-5, а красным и синим цветом — поверхности волновых векторов для обыкновенно и необыкновенно поляризованных волн для кристалла с приложенным внешним статическим давлением, соответственно. Из рисунка 4 следует, что при приложении внешнего статического давления вдоль оси Y величиной $p = 3 \text{ МПа}$ кубический кристалл KRS-5 становится оптически анизотропной средой с оптической осью вдоль оси Y. Величина наведенного двулучепреломления оказывается крайне низкой и составляет $\Delta n = 6 \cdot 10^{-5}$, однако, она качественно изменяется характер зависимостей угла Брэгга от частоты ультразвука.

Данные зависимости исследовались экспериментально при помощи созданной АО ячейки на основе кристалла KRS-5, в котором звук рас-

пространялся вдоль оси X , свет – вблизи оси Z , а внешнее давление прикладывалось вдоль оси Y . Параметры указанной АО ячейки представлены в §3.6. При помощи созданной ячейки экспериментально наблюдалась картина Шефера-Бергмана для плоскости XY , что описано в §3.7. Также экспериментально измерялась эффективность АО взаимодействия при дифракции оптического излучения с различными длинами волн: от видимого ($\lambda = 0.63$ мкм) до среднего ИК ($\lambda = 3.39$ мкм) диапазона. Результаты измерений приведены в §3.8. В §3.9 обсуждаются экспериментально полученные зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука при различных величинах внешнего статического давления. На рисунках 5 (а)-(б) представлены измеренные углочастотные зависимости для длины волны света $\lambda = 0.632$ мкм и величины внешнего статического давления $p = 5$ -6 МПа (рисунок 5 (а)) и $p = 10$ -12 МПа (рисунок 5 (б)). Также на рисунках 5 (а)-(б) черным цветом изображены теоретические кривые, рассчитанные исходя из величины приложенного статического давления p .

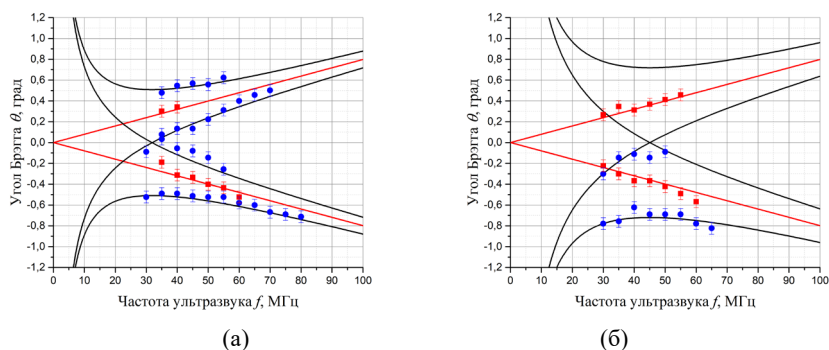


Рисунок 5. Зависимость угла Брэгга от частоты ультразвука для длины волны света $\lambda = 0.632$ мкм и величины внешнего статического давления (а) $p = 5$ -6 МПа и (б) $p = 10$ -12 МПа.

Из представленных зависимостей видно, что при приложении внешнего статического давления появляются анизотропные ветви АО взаимодействия (обозначены черным цветом). В эксперименте подробно исследовалась геометрия анизотропного АО дефлектора, которая соответствует горизонтальной касательной на представленных графиках: $d\theta/df = 0$. Прикладывая к образцу различное статическое давление можно управлять характерными частотами геометрии дефлектора в достаточно широких пределах: в эксперименте удалось поднять характерную частоту до величины $f = 60$ МГц при приложении к образцу давления величиной

$p = 15\text{--}18$ МПа. При этом число разрешимых элементов для анизотропного дефлектора составляет величину $N = 500$, что в два раза превышает аналогичное значение, полученное в случае свободного кристалла KRS-5 – $N = 250$. Выводы к главе 3 представлены в §3.10.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию анизотропного АО взаимодействия в плоскости XZ монокристалла теллура. В §4.1 описывается постановка задачи, а в §4.2 – общие свойства кристалла теллура. В §4.3 приведены результаты анализа акустических свойств в плоскости XY теллура. В §4.4 представлены результаты теоретического исследования влияния явления оптической активности на кривые брэгговского синхронизма для кристалла теллура. В работе рассмотрены две модели, известные из литературы, которые учитывают указанное явление. Сравнение моделей проводилось со случаем модели «чистого» кристалла теллура, в котором оптическая активность отсутствует. На рисунках 6 (а)-(б) представлены результаты расчета оптических и АО свойств для плоскости XZ кристалла теллура.

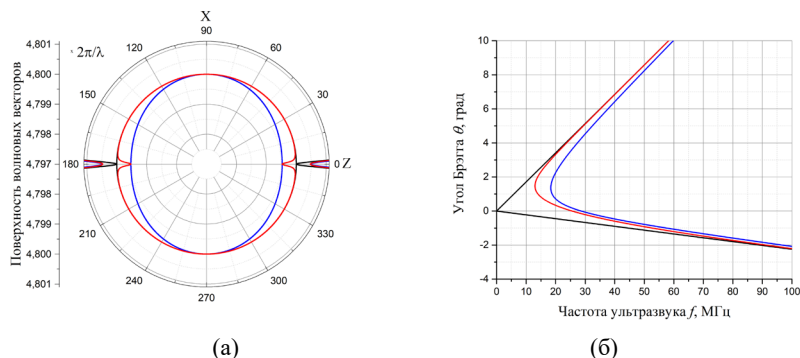
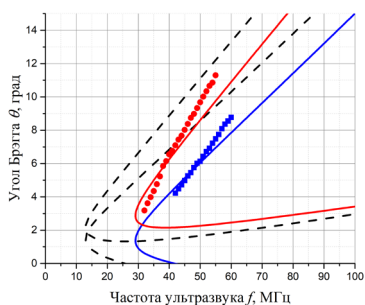


Рисунок 6. Различные модели, описывающие влияние оптической активности на показатели преломления (а) и на зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука (б) для плоскости XZ кристалла теллура

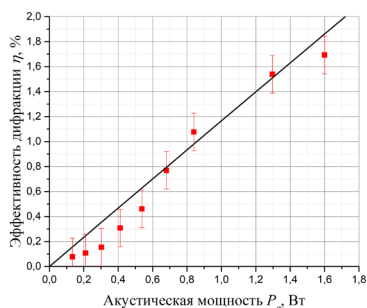
Из представленных на рисунках 6 (а)-(б) зависимостей следует, что модель, основанная на видоизмененных поверхностях волновых векторов (синие кривые) приводит к изменению оптических свойств для всех направлений распространения оптического излучения в плоскости XZ за исключением направления строго вдоль оси X. В случае модели, основанной на тензорном описании (красная кривая), влияние на поверхности волновых векторов оказывается локальным и сосредоточенным в малом угловом диапазоне вблизи оптической оси Z ($\theta < 5^\circ$). Аналогичные выво-

ды можно сделать исходя из зависимостей кривых брэгговского синхронизма с учетом эффекта оптической активности, представленных на рисунке 6 (б). Также в диссертационной работе в §4.4 представлены результаты аналогичных расчетов для различных углов среза в плоскости XZ теллура, а также для различных плоскостей АО взаимодействия. Кроме того, проведены расчеты кривых брэгговского синхронизма для кристалла парателлурита с учетом оптической активности, а также проведено сравнение с экспериментальными данными, представленными в литературе.

В §4.5 представлено теоретическое описание анизотропного АО взаимодействия в плоскости XZ монокристалла теллура на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм. В качестве основы для рассмотренного взаимодействия выбрана продольная акустическая мода, распространяющаяся вдоль оси X со скоростью $V = 2450$ м/с. Указанная акустическая волна является чистой и распространяется вдоль оси симметрии кристалла теллура без акустического сноса. На основе проведенного теоретического анализа создана АО ячейка, параметры которой описаны в §4.6. При помощи АО ячейки проведены измерения оптических свойств теллура, результаты которых представлены в §4.7.



(а)



(б)

Рисунок 7. (а) зависимость угла Брэгга от частоты ультразвука при анизотропной дифракции на продольной волне, распространяющейся вдоль оси X, (б) зависимость эффективности дифракции от приложенной акустической мощности

Экспериментальное исследование анизотропного АО взаимодействия в плоскости XZ кристалла теллура представлено в §4.8, §4.9 и §4.10. В ходе исследования были изучены такие параметры анизотропного АО взаимодействия, как зависимость угла Брэгга от частоты ультразвука, а также зависимость эффективности дифракции от приложенной акустиче-

ской мощности, которые изображены на рисунках 7 (а)-(б), соответственно.

Из полученной зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука (рисунок 7 (а)) установлено, что в имеющемся экспериментальном образце кристалла существует ошибка выведения оси X. На рисунке 7 (а) пунктирными кривыми представлена теоретическая зависимость для акустической волны с углом среза $\alpha = 0^\circ$, а сплошными кривыми – для угла среза $\alpha = 1^\circ$. Указанная ошибка выведения направления распространения ультразвука не превышала 1° и была учтена при анализе зависимости эффективности дифракции η от приложенной акустической мощности P_a , которая представлена на рисунке 7 (б). Исходя из полученных экспериментальных данных, уточнено численное значение фотоупругой константы $p_{41} = 0.16 \pm 0.03$. Выводы главы 4 приведены в §4.11.

В пятой главе рассмотрены акустические свойства двух модификаций теллура, которые известны в литературе и обозначаются как «левый» и «правый» теллур. Данные модификации имеют одинаковые численные значения упругих коэффициентов за исключением знака константы c_{14} : в случае «левой» модификации теллура $c_{14} > 0$, а в случае «правой» модификации – $c_{14} < 0$. В §5.1 представлена общая постановка задачи, а в §5.2 – подробное описание влияния знака упругого модуля c_{14} на различные акустические свойства теллура, такие как величины фазовых скоростей ультразвука и направления векторов поляризации собственных акустических мод. В качестве примера на рисунках 8 (а)-(б) приведены поверхности акустической медленности в плоскости YZ кристалла теллура: на рисунке 8 (а) – в случае «левой» модификации ($c_{14} > 0$), а на рисунке 8 (б) – для «правой» модификации кристалла теллура ($c_{14} < 0$).

В §5.3 представлены результаты теоретического анализа коэффициентов преломления и отражения сдвиговых акустических волн на границе раздела плавный кварц-теллур. Показана необходимость учета модификации теллура при возбуждении сдвиговых, распространяющихся волн вдоль оси X кристалла. В §5.4 приведены результаты теоретического рассмотрения АО эффекта в плоскости XZ на сдвиговых акустических волнах, распространяющихся вдоль оси X.

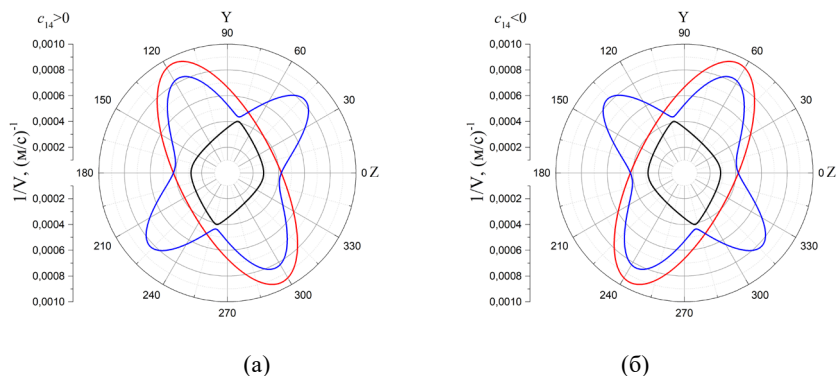


Рисунок 8. Поверхности акустической медленности в плоскости YZ:
(а) «левая» модификация теллура, (б) «правая» модификация теллура

На основе проведенного анализа предложена конфигурация АО ячейки, при помощи которой возможно произвести экспериментальное исследование для уточнения численного значения фотоупругих констант p_{44} , p_{14} , p_{41} и p_{66} кристалла теллура. Схема данного экспериментального исследования описана в §5.5. Результаты экспериментального исследования АО эффекта на сдвиговых волнах, распространяющихся вдоль оси X кристалла теллура, приведены в §5.6, а выводы к главе 5 – в §5.7.

Основные результаты диссертационной работы

В ходе выполнения диссертационной работы были исследованы материалы, прозрачные для оптического излучения среднего и дальнего ИК диапазона: аморфные соединения (стекла) на основе германия, селена, кремния и теллура, кубический кристалл KRS-5, монокристалл теллура. В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Измерено оптическое пропускание стекол систем GeSeTe и SiSeTe в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазоне, а также проведены измерения акустических и АО свойств стекол. В результате было установлено, что величина фазовой скорости продольных акустических волн в стеклах системы GeSeTe лежит в пределах $v = 2000 \div 2200$ м/с, а значение коэффициента АО качества варьируется в диапазоне от $M_2 = 400 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 \text{ кг}^{-1}$ до $M_2 = 1300 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 \text{ кг}^{-1}$. Впервые измерены свойства стекол с химическим составом $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$. Предложены два способа классификации свойств теллуrowых стекол в зависимости от их химического состава. Исходя из полученных экспериментальных данных, создана АО ячейка на основе стекла $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$. Проведено измерение ос-

новых параметров АО ячейки, в частности, получена эффективность дифракции $I_d/I_0 = 55 \pm 5\%$ на длине волны падающего оптического излучения $\lambda = 3.39$ мкм при управляющей акустической мощности $P_a = 1$ Вт. Проведенные измерения показывают перспективность использования данных материалов в качестве основы АО устройств среднего и дальнего ИК диапазона.

2. Проведено экспериментальное измерение величины АО качества, с целью уточнения имеющихся данных из литературы, для монокристалла германия при дифракции на продольных ультразвуковых волнах, распространяющихся вдоль направлений [110] и [111] в кристалле. Полученные величины АО качества составляют следующие значения: $M_{2\parallel} = (120 \pm 30) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ и $M_{2\perp} = (30 \pm 5) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для продольной волны, распространяющейся вдоль направления [110], и $M_{2\parallel} = (190 \pm 40) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ и $M_{2\perp} = (30 \pm 5) \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ для продольной акустической волны, распространяющейся вдоль направления [111].

3. Теоретически и экспериментально рассмотрены акустические, оптические и акустооптические свойства кубического кристалла KRS-5. Рассчитаны скорости продольных и сдвиговых акустических волн для плоскостей (001) и (110), а также величины АО качества при дифракции на акустических волнах, распространяющихся вдоль основных направлений кристалла – [100], [110] и [111]. Проанализированы известные из литературы способы создания наведенной оптической анизотропии. Рассчитаны зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука при дифракции в кристалле KRS-5 с приложенным к нему внешним статическим давлением. На основе проведенного теоретического анализа создана АО ячейка, при помощи которой экспериментально получена диаграмма Шефера-Бергмана в плоскости XY кристалла. Экспериментально исследовано АО взаимодействие на различных длинах волн – от видимого диапазона ($\lambda = 0.63$ мкм) до среднего инфракрасного диапазона ($\lambda = 3.39$ мкм). Экспериментально исследовано влияние внешнего статического давления на зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука при различных величинах внешнего статического давления (вплоть до величины $p = 18$ МПа).

4. Проведено теоретическое рассмотрение акустических и акустооптических свойств монокристалла теллура. Представлен подробный теоретический анализ влияния явления оптической активности на кривые брэгговского синхронизма вблизи оптической оси на примере кристаллов теллура и парателлурита. Рассчитаны акустооптические свойства кри-

сталла теллура при дифракции в плоскости XZ на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси X кристалла. На основе проведенного анализа создана АО ячейка, при помощи которой проведено экспериментальное исследование параметров анизотропного взаимодействия на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм. Уточнено численное значение фотоупругой константы p_{41} для кристалла теллура, измеренное значение составило $p_{41} = 0.16 \pm 0.03$.

5. Теоретически рассмотрены акустические свойства двух модификаций теллура, известных из литературы как «левый» и «правый» теллур и отличающиеся только знаком упругого модуля c_{14} . Представлены результаты расчета фазовых скоростей и направления векторов поляризации для акустических волн в плоскостях XY, XZ и YZ для двух модификаций теллура. Предложена геометрия АО взаимодействия, при помощи которой возможно одновременное уточнение имеющихся литературных данных о величинах фотоупругих констант p_{44} , p_{41} , p_{14} и p_{66} и их знаков.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

A1. V.B. Voloshinov, N. Gupta, L.A. Kulakova, **V.S. Khorkin**, B.T. Melekh, G.A. Knyazev. Investigation of acousto-optic properties of tellurium-based glasses for infrared applications // Journal of Optics: A Pure and Applied Optics, 2016, V. 18, No. 2, p. 025402. DOI: 10.1088/2040-8978/18/2/025402. **IF = 2.753**

A2. S.N. Mantsevich, V.Ya. Molchanov, K.B. Yushkov, **V.S. Khorkin**, M.I. Kupreychik. Acoustic field structure simulation in quasi-collinear acousto-optic cells with ultrasound beam reflection // Ultrasonics, 2017, V. 78, pp. 175-184. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.03.018. **IF = 2.598**

A3. V.B. Voloshinov, **V.S. Khorkin**, L.A. Kulakova, N. Gupta. Optic, acoustic and acousto-optic properties of tellurium in close-to axis regime of diffraction // Journal of Physics Communications, 2017, V. 1, No. 2, p. 025006. DOI: 10.1088/2399-6528/aa86ba. **IF = N/A**

A4. V. Voloshinov, N. Polikarpova, P. Ivanova, **V. Khorkin**. Acousto-optic control of internal acoustic reflection in tellurium dioxide crystal in case of strong elastic energy walkoff // Applied Optics, 2018, V. 57, № 10, pp. C19-C25. DOI: 10.1364/AO.57.000C19. **IF = 1.973**

A5. **V.S. Khorkin**, V.B. Voloshinov, Investigation of Acousto-optic Properties of Single Crystal Tellurium in Case of Anisotropic Bragg Diffraction // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2019. DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840138. **IF = N/A**

A6. V.B. Voloshinov, **V.S. Khorkin**, M.S. Kuznetsov, K.A. Subbotin. Anisotropic acousto-optic interaction in KRS-5 cubic crystal possessing induced optical anisotropy // Proceedings of SPIE, 2019, V. 11210, p. 112100E. DOI: 10.1117/12.2540343. **IF = 0.9**.

A7. **В.С. Хоркин**, В.Б. Волошинов, А.И. Ефимова, Л.А. Кулакова. Акустооптические свойства сплавов на основе германия, селена, кремния и теллура // Оптика и спектроскопия, 2020, Т. 128, № 2, с. 250-255. DOI: 10.21883/OS.2020.02.48970.151-19. **IF = 0.801**.

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

A8. В.Б. Волошинов, Л.А. Кулакова, Н. Гупта, **В.С. Хоркин**, Г.А. Князев. Акустооптическая ячейка на основе сплава теллура и кремния // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век, 2015, Т. 7, № 3, с. 42-48. **IF = 0.423**

A9. В.Б. Волошинов, Л.А. Кулакова, Н. Гупта, **В.С. Хоркин**, Г.А. Князев. Акустооптическая ячейка на основе сплава теллура и кремния// Радиотехника, 2015, № 8, с. 31-37. **IF = 0.585**

Статьи в сборниках и тезисы докладов:

A10. **В.С. Хоркин**, В.Б. Волошинов, Л.А. Кулакова. Теоретическое и экспериментальное исследование акустооптических свойств монокристалла теллура // Труды XV всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах им. А.П. Сухорукова», секция «Акустоэлектроника и акустооптика», стр. 50-52, 2016.

A11. **V.S. Khorkin**, V.B. Voloshinov, L.A. Kulakova. Acousto-optics properties of single crystal tellurium // Preliminary program and abstract of XIX International conference for young researchers «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems», Saint-Petersburg, pp. 115-117, 2016.

A12. В.Б. Волошинов, **В.С. Хоркин**, Л.А. Кулакова. Акустооптическая ячейка с использованием акустических волн в плоскости ХZ монокристалла теллура // Программа и аннотации докладов II Всероссийской акустической конференции, Нижний Новгород, стр. 157, 2017.

A13. **V.S. Khorkin**, L.A. Kulakova, V.B. Voloshinov. Wide-angle regimes of acousto-optic interaction in single crystal tellurium // Program and abstract book of 13th school of acousto-optics and applications, Moscow, pp. 66, 2017.

A14. **V.S. Khorkin**, V.B. Voloshinov, L.A. Kulakova. Acoustooptic parameters of infrared glasses based on germanium, selenium and tellurium // Scientific papers of XX International conference for young researchers «Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems», Saint-Petersburg, pp. 43-46, 2017.

A15. **В.С. Хоркин**, Л.А. Кулакова, А.И. Ефимова, В.Б. Волошинов. Акустооптические характеристики инфракрасных стекол и кристаллов // Труды XVI всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах им. А.П. Сухорукова», 2016, секция «Акустоэлектроника и акустооптика», стр. 53-55, 2018.

A16. **V.S. Khorkin**, V.B. Voloshinov, M.S. Kuznetsov, K.A. Subbotin. Anisotropic acousto-optic interaction in KRS-5 crystal // Сборник статей XXI международной молодежной конференции “Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах”, стр. 65-68, 2018.

A17. **В.С. Хоркин**, М.С. Кузнецов, К.А. Субботин, В.Б. Волошинов. Акустооптический эффект на сдвиговых акустических волнах в кристалле KRS-5 // Труды XVII всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах им. А.П. Сухорукова», секция «Акустика и акустооптика», стр. 111-113, 2019.

A18. **В.С. Хоркин**, В.Б. Волошинов. Исследование акустооптических свойств монокристалла теллура в режиме анизотропной брэгговской дифракции // Сборник статей XXII международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», часть 1, стр. 55-59, 2019.

A19. **V.S. Khorkin**, V.B. Voloshinov, M.S. Kuznetsov. Anisotropic Acousto-Optic Interaction in KRS-5 Cubic Crystal Possessing Induced Optical Anisotropy // Book of abstract & Conference guide 14th school of acousto-optics and applications, Poland, pp. 48, 2019.

A20. V. Voloshinov, **V. Khorkin**, M. Kuznetsov, K. Subbotin. Elastically induced birefringence in a cubic acousto-optic crystal KRS-5 // Abstract books «International congress of ultrasonics», Bruges, Belgium, pp. 285, 2019.

A21. **В.С. Хоркин**, Н.В. Поликарпова, В.Б. Волошинов. Акустические свойства монокристалла теллура // Сборник статей XXIII международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», часть 1, стр. 90-95, 2020.