

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Хоркина Владимира Сергеевича «Управление излучением среднего и дальнего инфракрасного диапазона методами акустооптики», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.03 –радиофизика

Диссертационная работа В.С. Хоркина посвящена экспериментальному исследованию акустических, оптических и акустооптических свойств стекол на основе германия, селена, кремния и теллура, а также кристаллов, как теллура, так и KRS-5. Полученные в диссертации результаты уточняют и дополняют имеющиеся данные о перечисленных материалах, что и составляет актуальность проведенного исследования.

Дело в том, что на сегодняшний день акустооптические методы широко используются для управления электромагнитным излучением видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Большинство акустооптических (АО) приборов видимого диапазона строится на основе парателлуриита (TeO_2). Однако, в среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне парателлуриит является непрозрачным, и в качестве основы для АО взаимодействия могут выступать такие кристаллы, как германий и теллур, материалы на основе мышьяка, таллия и ртути. Однако не все фундаментальные свойства перечисленных веществ являются хорошо изученными.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, результатов и выводов диссертационной работы. Работа завершается списком литературы, который включает в себя 122 работы. Объем диссертации составляет 157 страниц и включает в себя 65 рисунков и 15 таблиц.

Во **введении** логично обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту. Также во введении приведены сведения об апробации диссертационной работы.

В **первой главе** подробно описана методика расчета АО взаимодействия в акустически и оптически анизотропных средах. Для упрощения расчетов автором была создана программа, позволяющая рассчитывать акустические, оптические и

акустооптические свойства различных материалов. Также в первой главе представлена общая постановка задачи отражения и преломления упругих волн на границе раздела двух сред. Это – вполне фундаментальный подход соискателя к решению поставленных задач. Также в первой главе приведены калибровочные расчеты и показана точность созданной программы: для акустической задачи относительная точность расчета величины фазовой скорости не превышает $\delta V/V = 5 \cdot 10^{-7}$, для расчета зависимостей угла Брэгга от частоты ультразвука относительная точность определения частоты синхронизма $\Delta f/f = 8 \cdot 10^{-7}$, а угла дифракции $\delta \theta_d/\theta_d = 1 \cdot 10^{-6}$.

Во второй главе представлено экспериментальное исследование стекол на основе германия, селена, кремния и теллура. Для упрощения описания полученных результатов автором предложено разделение стекол по их химическому составу на системы «германий-селен-теллур» (GeSeTe) и «кремний-селен-теллур» (SiSeTe). Это позволило упростить представление полученных экспериментальных результатов об оптических, акустических и АО свойствах стекол, например, более наглядно представить величины АО качества M_2 в зависимости от химического состава образца. Более того, в работе предложены два варианта классификации как самих стекол, так и их физических свойств в зависимости от химического состава. Предложенные методы классификации заметно упрощают восприятие и позволяют наглядно представлять физические свойства стекол систем GeSeTe и SiSeTe. Также во второй главе представлены результаты измерения таких параметров АО ячейки на основе стекла $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, как зависимости интенсивности дифрагированного света от частоты ультразвука и от угла Брэгга. При помощи указанной ячейки была получена эффективность дифракции η более 50% при управляющей мощности 1 Вт на длине волны оптического излучения $\lambda = 3.39$ мкм.

В третьей главе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования кристалла KRS-5. Представлены результаты расчета акустических и акустооптических свойств кристалла KRS-5 в случае квазиортогонального АО взаимодействия на акустических волнах, распространяющихся вдоль направлений [100], [110] и [111] кристалла. Теоретически проанализирована возможность создания наведенной оптической анизотропии при помощи внешнего статического давления, приложенного к кристаллу KRS-5, а также влияние внешнего статического давления на зависимости угла Брэгга от частоты ультразвука. Данные зависимости в работе проверялись экспериментально, для чего была изготовлена ячейка на основе кристалла KRS-5. Кроме того, при помощи созданной ячейки была получена

диаграмма Шефера-Бергмана для кристаллографической плоскости ХУ, которая описывает поверхность акустической медленности в рассматриваемой плоскости кристалла KRS-5.

В четвертой главе представлены результаты теоретического и экспериментального анализа свойств монокристалла теллура. Представлено подробное описание явления оптической активности и его влияния на оптические и акустооптические свойства таких гиротропных материалов, как кристалл теллура и парателлурита. Рассмотрение указанного явления производится при помощи двух математических моделей, которые в работе условно называются модель видоизмененной поверхности волновых векторов и модель, учитывающая явление оптической активности при помощи тензора гирации. Также в четвертой главе представлен расчет акустических и акустооптических характеристик кристалла теллура для случая анизотропного взаимодействия на продольной волне, распространяющейся вдоль оси Х. На основании теоретического анализа была изготовлена ячейка, параметры которой экспериментально измерялись на длине волны оптического излучения $\lambda = 10.6$ мкм и обсуждаются в четвертой главе диссертации. При помощи данной ячейки проведено измерение эффективной фотоупругой константы АО взаимодействия и уточнено численное значение фотоупругой константы p_{41} теллура. Полученные экспериментальные результаты, безусловно, являются важным этапом для дальнейших расчетов параметров АО взаимодействия в кристалле теллура.

В пятой главе представлены результаты теоретического анализа акустических свойств двух модификаций теллура, которые в литературе условно называются «правый» и «левый» теллур. Указанные модификации отличаются друг относительно друга только знаком упругого модуля c_{14} . Автором приведен подробный анализ влияния знака упругого модуля c_{14} не только на величины фазовых скоростей ультразвуковых волн, но и на направление их вектора поляризации. Показано, что необходимо учитывать разные акустические свойства двух модификаций теллура и при возбуждении в кристалле акустических волн, что может сказаться не только на эффективности возбуждения самих волн, но и на эффективности АО взаимодействия. В качестве примера в пятой главе представлен расчет прохождения сдвиговых акустических волн из плавленого кварца в кристалл теллура. В конце главы представлена схема эксперимента, при помощи которого возможно уточнить численные значения фотоупругих констант p_{41} , p_{44} , p_{14} и p_{66} , а также их знаков. Также представлены результаты тестовых измерений по возбуждению сдвиговых ультразвуковых волн в кристалле теллура.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, хорошо апробирована публикациями в авторитетных журналах и докладами на известных международных конференциях. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Предложенные в работе способы классификации стекол являются наглядными методами представления полученных экспериментальных и имеющихся в литературе данных. Кроме того, предложенные способы классификации позволяют разделять стекла с общей химической формулой GeSeTe (или SiSeTe) на более мелкие подгруппы, которые обладают близкими физическими свойствами, что в дальнейшем может оказаться полезным при прогнозировании свойств новых соединений основе германия, селена, кремния и теллура.

- Также следует отметить, что в ходе экспериментального исследования соискателем получена диаграмма Шефера-Бергмана для кристалла KRS-5. При помощи этой диаграммы подтверждаются полученные при помощи теоретического анализа величины фазовых скоростей ультразвуковых волн для большинства направлений распространения в плоскости XY кристалла.

- Результаты приведенных расчетов акустических свойств двух модификаций монокристалла теллура являются очень интересными: на простых примерах теоретически показаны возможные ошибки, которые могут возникнуть из-за неверного определения модификации теллура при экспериментальном исследовании.

Результаты диссертации обладают **новизной**. Так, впервые проведены сравнительные исследования акустических, оптических и АО свойств стекол с химическим составом $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ по отношению к другим родственным соединениям, используемым в акустооптике. 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 парателлурита. Это лишь некоторые из значимых оригинальных результатов.

Достоверность результатов диссертации связана с использованием апробированных современных методов математического моделирования и экспериментальных методов исследования. Приведенные в работе результаты и выводы не противоречат современным концепциям, установившимся в

акустооптике и оптической обработке информации, имеющих прямое отношение к теме диссертации.

При всей высокой оценке диссертации необходимо отметить, что она не лишена недостатков.

1. В диссертации отсутствуют выводы о возможном применении рассмотренных материалов в качестве основы АО приборов среднего и дальнего инфракрасного диапазона. А именно, на основе каких материалов, из представленных в диссертации, возможно построение акустооптических модуляторов, фильтров и дефлекторов, на каких длинах волн могут работать указанные АО приборы.

2. В тексте диссертации имеются ряд неточностей при введении обозначений физических величин. Так, вводится обозначение для величины АО качества M_2 , однако не объясняется, что означает индекс «2» и есть ли коэффициенты M_1 и M_3 , как часто они используются. Аналогично, для описания режимов АО дифракции используется параметр $Q = \lambda f^2 / nv^2$, называемый в тексте параметром Рытова, хотя в литературе для подобного описания используется волновой параметр или параметр Кляйна-Кука, который равен $Q = 2\pi\lambda f^2 / nv^2$. Кроме того, в тексте встречаются одинаковые обозначения для различных с физической точки зрения параметров: например, показатель преломления и направление распространения оптического излучения обозначены символом n . Это осложняет восприятие и понимание текста.

3. В параграфе 5.6 описан эксперимент по возбуждению сдвиговых акустических волн, распространяющихся вдоль оси X кристалла теллура, но в ходе проведения эксперимента возбудить указанные волны не удалось. При этом из текста не до конца понятны причины, которые привели к такому результату, и каковы главные факторы, повлиявшие на успешность этого исследования. Кроме того, из текста неясно, учитывались ли в описанном случае отражения со сменой акустических мод при использовании метода эхо-импульсов для кристалла теллура.

Указанные замечания не отражаются на общем восприятии диссертации и не снижают заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и их высокой оценки. В диссертационной работе экспериментально исследованы фундаментальные свойства материалов, которые могут применяться для построения АО приборов для области дальнего инфракрасного диапазона.

На основании вышеизложенного можно заключить, что научные результаты, представленные в диссертации, вносят достойный вклад в развитие АО взаимодействия в материалах, пригодных для использования в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Общее впечатление о диссертационной работе В.С. Хоркина положительное. Автор работы продемонстрировал глубокое понимание изучаемых явлений и изрядное экспериментальное мастерство. Диссертация «Управление излучением среднего и дальнего инфракрасного диапазона методами акустооптики» соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09. 2013 г., редакция от 29.05.2017 № 650, а ее автор - Хоркин Владимир Сергеевич - заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиоп физика.

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий Отделением теоретической и прикладной акустики АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»

Егеров Сергей Викторович

117292, г. Москва, ул. Шверника, д.4.

9.10.2020

Телефон: +7(499)126-49-11

Подпись профессора С.В. Егерова заверяю:

Заместитель генерального директора-научного руководителя
АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»



А.Г.Нопин