

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

---

Физический факультет

На правах рукописи  
УДК 535.241.13:534

Князев Григорий Алексеевич

**АНИЗОТРОПНОЕ АКУСТООПТИЧЕКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
В КРИСТАЛЛАХ ТЕЛЛУРА**

Специальность: 01.04.03 – радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент В.Б.Волошинов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ РАН В.М.Котов

кандидат физико-математических наук, заместитель директора НТЦ АКУСТООПТИКИ МИСиС В.Я.Молчанов

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие НИИ «Полус»

Защита состоится 18 сентября 2008 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.67 в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, аудитория им. Р.В.Хохлова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 года

Учёный секретарь диссертационного совета Д 501.001.67

А.Ф.Королёв

### Актуальность темы исследования

Одной из проблем современной радиофизики является задача управления характеристиками электромагнитной волны. К этим характеристикам относятся: интенсивность волны, её частота, поляризация, а также направление распространения. Данная проблема связана с необходимостью передачи и обработки информации с использованием оптического излучения инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов длин волн. На сегодняшний день существуют и успешно применяются различные способы управления светом. Одним из них является использование акустооптического эффекта.

Акустооптика исследует явление взаимодействия световых лучей с ультразвуковыми волнами, распространяющимися в среде, например, кристалле. Вследствие фотоупругого эффекта под действием акустической волны в кристалле формируется периодическая фазовая структура, на которой происходит дифракция света. Ультразвуковые волны в материале обычно возбуждаются с помощью обратного пьезоэлектрического эффекта.

На сегодняшний день достаточно широко применяются оптоэлектронные устройства, использующие эффект дифракции света на ультразвуке, которые позволяют управлять всеми параметрами светового луча, а также обрабатывать информацию, носителем которой являются как световые, так и звуковые волны. Основу таких устройств составляет акустооптическая ячейка, в которой происходит взаимодействие света с ультразвуковой волной. К достоинствам акустооптических устройств управления характеристиками света относятся относительно высокое быстродействие, достаточно низкое энергопотребление, простота управления, надежность, компактность и т.д.

Одной из наиболее важных особенностей акустооптического взаимодействия является то, что каждой длине волны оптического излучения  $\lambda$  соответствует определенная частота ультразвука. Благодаря этому становится возможным практически независимо управлять одновременно несколькими лучами света с разной длиной волны, а также создавать акустооптические фильтры, в том числе и фильтры изображений. Хотя акустооптические устройства уступают в быстродействии оптоэлектронным устройствам, использующим иные эффекты для управления светом, фильтрация оптического излучения по длинам волн сегодня зачастую осуществляется акустооптическими методами. Это связано с тем, что акустооптические фильтры по своим характеристикам уступают многим классам приборов, например эшелле-спектрометрам, однако последние существенно проигрывают оптоэлектронным приборам, т.к. не допускают перестройки. Более того, благодаря применению анизотропных материалов в акустооптике удается

осуществить спектральную фильтрацию изображений. Для этого применяется широкоапертурная геометрия взаимодействия света и звука. Также с помощью акустооптических фильтров можно производить фильтрацию пространственных частот световых полей.

Среди основных характеристик акустооптической ячейки можно выделить несколько наиболее важных: эффективность дифракции, спектральное разрешение, пространственное разрешение, а также рабочий диапазон длин волн. Максимальная эффективность акустооптического взаимодействия реализуется при выполнении условия фазового синхронизма. Эффективность определяется отношением интенсивности продифрагировавшего света к интенсивности падающего на ячейку монохроматического излучения длины волны  $\lambda$ , соответствующей условию Брэгга. Эффективность зависит от мощности акустической волны, размеров области, где происходит акустооптическое взаимодействие, а также от коэффициента акустооптического качества  $M_2$  среды, в которой это взаимодействие происходит. Следует отметить, что кроме перечисленных факторов на эффективность дифракции также влияет длина волны света. Как и для всех спектральных приборов, для акустооптических устройств наблюдается обратно пропорциональная зависимость эффективности взаимодействия от квадрата длины волны света  $\lambda$ .

Пространственное и спектральное разрешение акустооптического фильтра зависят от скорости звука в материале ячейки, частоты ультразвука, а также от размеров области акустооптического взаимодействия. Длина волны света тоже влияет на разрешение фильтра. Очевидно, что диапазон волн, в котором может работать акустооптический фильтр, ограничен областью прозрачности материала.

Таким образом, все характеристики акустооптической ячейки определяются свойствами среды, в которой происходит взаимодействие света и звука, а также размером области взаимодействия. Размеры последней ограничены из-за затухания ультразвука и сложностей возбуждения протяженных пьезоэлектрических преобразователей. Следует подчеркнуть, что современные акустооптические фильтры, а также дефлекторы и модуляторы обладают весьма хорошими характеристиками в основном за счет использования анизотропного акустооптического взаимодействия, которое наблюдается только в кристаллических материалах. Более того, для акустооптики интересны кристаллы с большой анизотропией как оптических, так и акустических свойств.

Для улучшения характеристик акустооптической ячейки необходимо увеличивать длину взаимодействия оптического излучения с ультразвуком, а также подбирать материалы с низкими значениями скоростей распространения света и звука. Увеличение

длины акустооптического взаимодействия обычно осуществляется за счет повышения размера пьезопреобразователя, возбуждающего ультразвук в кристалле. Также для улучшения спектрального разрешения и эффективности дифракции применяют коллинеарную и близкую к коллинеарной геометрию акустооптического взаимодействия. В данной диссертации рассмотрены некоторые альтернативные методы повышения характеристик акустооптических ячеек. Например, улучшение может быть получено за счет многократного прохождения света через звуковой пучок.

Следует отметить, что аппаратная функция акустооптической ячейки, определяющая спектральную полосу пропускания фильтра, не является равномерной, а кроме основного максимума обладает также и боковыми максимумами. Величина этих максимумов может достигать величины 11% по сравнению с основным. Очевидно, наличие побочных максимумов аппаратной функции акустооптического фильтра может привести к ограничениям в работе прибора или к ограничению спектральных характеристик системы фильтрации. Поэтому, кроме уменьшения ширины полосы пропускания акустооптической ячейки, необходимо подавление боковых максимумов аппаратной функции фильтра.

Акустооптические приборы обеспечивают работу в ультрафиолетовом, видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах оптического спектра. В большинстве приборов, предназначенных для видимого и ближнего инфракрасного света, применяются монокристаллы парателлуриата ( $\text{TeO}_2$ ). Этот материал характеризуется высокой величиной коэффициента акустооптического качества  $M_2 = 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ , что объясняет весьма малые величины мощности управляющего электрического сигнала, требуемые для работы приборов на основе кристалла парателлуриата. К сожалению, кристаллы диоксида теллура прозрачны в диапазоне длин волн  $0.35 \text{ мкм} < \lambda < 5 \text{ мкм}$ , поэтому материал не пригоден для использования в ультрафиолетовом, а также в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне длин волн света.

Для фильтрации ультрафиолетового излучения достаточно успешно применяются акустооптические ячейки на основе кристаллов дигидрофосфата калия KDP и кварца  $\text{SiO}_2$ . Несмотря на то, что подобные материалы обладают относительно малым коэффициентом акустооптического качества, для KDP  $M_2 = 4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$ , а для кварца  $M_2 = 1,5 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$ , акустооптические фильтры, предназначенные для работы с ультрафиолетовым излучением, обладают достаточно хорошими характеристиками. Это связано с тем, что и разрешение, и эффективность дифракции повышаются с уменьшением длины волны.

К сожалению, по аналогичной же причине разработка эффективных акустооптических устройств, предназначенных для применений в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах, остается нерешенной задачей акустооптики. Основные

трудности связаны именно с обратно пропорциональной зависимостью эффективности дифракции от квадрата длины волны света  $\lambda$ . Расчет показывает, что для работы в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне с такой же высокой эффективностью, какую кристалл парателлуриата обеспечивает в видимом свете, необходимо использование материалов с коэффициентом акустооптического качества не менее  $M_2 = 100 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Однако даже в 100 раз меньшее значение акустооптического качества парателлуриата  $M_2 = 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$  считается чрезвычайно большим. К сожалению, в акустооптике известно мало материалов, акустооптическое качество которых достигает данной величины, а тем более превосходит ее на два порядка. Более того, для создания фильтра, работающего в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне, необходим оптически анизотропный материал, прозрачный на этих длинах волн.

На сегодняшний день список акустооптических кристаллов, пригодных для создания акустооптических устройств, работающих в дальнем инфракрасном диапазоне, ограничен кристаллами ТАС ( $\text{Tl}_3\text{AsSe}_3$ ), каломели ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), бромида ртути ( $\text{Hg}_2\text{Br}_2$ ) и теллура (Te). Все эти материалы, кроме теллура, характеризуются относительно низким акустооптическим качеством  $M_2 \leq 4.5 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Более того, только монокристаллы ТАС и каломели были использованы в акустооптических приборах, обеспечивавших спектральную фильтрацию излучения и обработку изображений в дальней инфракрасной области спектра. Однако применение этих кристаллов в дальнем инфракрасном диапазоне оказалось менее успешным, чем использование парателлуриата в видимом и ближнем инфракрасном свете. Главная причина недостатка - это малая величина коэффициента акустооптического качества инфракрасных кристаллов.

Анализ литературных данных показывает, что в качестве среды акустооптического взаимодействия в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах перспективно использование монокристаллического теллура. Интерес к теллуру объясняется чрезвычайно большой величиной коэффициента акустооптического качества материала  $M_2 > 500 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Однако, несмотря на то, что теллур известен в акустооптике достаточно давно, возможность его широкого применения в акустооптических устройствах, например, в дефлекторах и фильтрах, остается не доказанной. Поэтому целью настоящей работы является изучение оптических, акустических и акустооптических свойств монокристаллов теллура в режиме анизотропной дифракции для применения в дефлекторах, а также и в широкоапертурных фильтрах.

### Цели диссертационной работы:

Цели диссертационной работы состояли в исследовании однократных и многократных режимов анизотропного акустооптического взаимодействия в кристаллах теллура и парателлуриата для использования в приборах управления световыми потоками видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитного спектра. В диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследование закономерностей дифракции света на ультразвуке в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне оптического излучения. Расчет акустических и акустооптических характеристик монокристаллов теллура в режиме дифракции инфракрасного излучения со сменой оптической моды.
2. Экспериментальное исследование оптических, акустических и акустооптических свойств монокристаллов теллура. Выбор и реализация в эксперименте на длине волны 10,6 мкм широкоапертурной геометрии взаимодействия оптических пучков с ультразвуком в теллуре.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование дифракции оптического излучения в режиме поперечной, а также квазиколлинеарной дифракции в кристаллах парателлуриата и теллура при многократном прохождении света через акустический столб. Выбор режимов многократной дифракции света, обеспечивающих повышение эффективности акустооптического взаимодействия или улучшение спектрального разрешения устройств управления световыми потоками.

### Научная новизна диссертационной работы:

1. Исследованы оптические, акустические, а также акустооптические характеристики теллура с целью использования данного материала в модуляторах, дефлекторах и фильтрах оптического излучения инфракрасного диапазона. Выбраны геометрии акустооптического взаимодействия, характеризующиеся высоким коэффициентом акустооптического качества.
2. В эксперименте на длине волны света 10,6 мкм исследован режим анизотропного акустооптического взаимодействия в кристалле теллура с высокой эффективностью дифракции, спектральной селективностью и широкими угловыми апертурами световых пучков. Измерена эффективность и полоса частот дифракции, а также

допустимая угловая апертура широкоугольного акустооптического фильтра на теллуре.

3. В кристаллах  $\text{TeO}_2$  теоретически и экспериментально изучены особенности дифракции при многократном прохождении света через область акустооптического взаимодействия. Доказано, что применение многопроходной схемы фильтрации оптического излучения позволяет повысить спектральное разрешение или энергетические характеристики приборов.

#### Практическая значимость диссертационной работы:

На сегодняшний день не существует акустооптических устройств, эффективно работающих с электромагнитным излучением на длинах волн 5 – 20 мкм. Проведенные исследования доказывают, что такие устройства могут быть созданы на основе монокристалла теллура. Благодаря рекордному значению коэффициента акустооптического качества кристалла величина мощности управляющего сигнала может быть снижена в десятки раз по сравнению с существующими устройствами на основе других материалов. В связи с тем, что кристаллический теллур обладает ярко выраженной анизотропией оптических свойств, доказана возможность создания на основе этого материала не только модуляторов, но также дефлекторов и фильтров.

Предложенные в работе методы улучшения характеристик акустооптических устройств являются весьма простыми и в значительной степени эффективными. Более того, они могут быть применены в комбинации с другими известными способами повышения характеристик акустооптических устройств.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. В плоскостях XZ и YZ монокристалла теллура существуют геометрии анизотропного акустооптического взаимодействия, перспективные для применений в модуляторах, дефлекторах и фильтрах, работающих с излучением среднего и дальнего инфракрасного диапазона электромагнитного спектра. При этом коэффициент акустооптического качества в теллуре достигает рекордной величины  $M_2 = 160 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{Г}$ , что на порядок превосходит акустооптическое качество всех известных акустооптических материалов.



2. Геометрия широкоапертурного акустооптического взаимодействия в теллуре, перспективная для применений в фильтрах для анализа изображений на длинах волн 8 – 12 мкм характеризуется спектральной полосой пропускания 1200 Å и допустимой угловой апертурой 24°. Коэффициент акустооптического качества кристалла для данной геометрии взаимодействия равен  $M_2 = 10 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ .
3. Многократное прохождение света через акустический столб акустооптического фильтра обеспечивает улучшение спектрального разрешения или эффективности дифракции. Применение двукратного взаимодействия приводит к увеличению коэффициента подавления сигнала в заграждающем фильтре в 2 раза или к повышению разрешения полосового фильтра в 1,4 раза. В режиме трехкратного взаимодействия достижимо сужение полосы пропускания устройства фильтрации в 2 раза.

#### Апробация диссертационной работы:

Результаты научной работы представлены на научных конференциях в России и за рубежом: 9-я Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2002» (Россия, Москва, 2002 г); 16-th International Symposium on Nonlinear Acoustics (Россия, Москва 2002 г); 6<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 8<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup> International Conferences for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems” (Россия, Санкт-Петербург, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 гг.); 35<sup>th</sup> Winter School on Wave and Quantum Acoustics (Польша, Устронь, 2006); “10-th School on Acousto-optics and Applications” (Польша, Сопоть, 2008) XI-Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», часть 4, «Когерентная и нелинейная оптика. Фотоника» (Россия, Звенигород, 2008 г) По материалам диссертации опубликованы работы, приведённые ниже.

#### Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав текста, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 140 страниц. Диссертация включает 55 рисунков и 5 таблиц. Библиография содержит 128 наименований, в том числе 22 авторских публикации.

## *Содержание работы*

Во введении содержится обоснование актуальности проведенных исследований, излагаются цели диссертационной работы и ее наиболее важные результаты. Здесь также кратко изложено содержание диссертации, отмечается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы.

В первой главе содержатся необходимые для последующего изложения сведения из теории акустооптического взаимодействия в изотропных и анизотропных средах. Обсуждаются основные особенности акустооптических приборов, предназначенных для работы с инфракрасным излучением. Проводится сравнение параметров акустооптических приборов, использующих изотропную и анизотропную геометрию акустооптического взаимодействия. Доказывается необходимость использования анизотропных материалов для создания приборов, работающих со средним и дальним инфракрасным излучением.

Также в первой главе представлен обзор существующих на сегодняшний день акустооптических устройств инфракрасного диапазона. Подробно рассматриваются публикации, посвященные разработке акустооптических устройств на основе кристаллов каломели и ТАС. Утверждается, что на сегодняшний день список акустооптических кристаллов, пригодных для использования в дальнем инфракрасном диапазоне, ограничен кристаллами германия, ортоселеноарсенита таллия ТАС ( $Tl_3AsSe_3$ ), каломели ( $Hg_2Cl_2$ ), бромида ртути ( $Hg_2Br_2$ ) и теллура (Te) Обосновывается необходимость исследования акустооптических свойств монокристаллов теллура.

Вторая глава посвящена изучению физических свойств кристаллического теллура. Приводятся данные о структуре кристалла и его физических свойствах. Кристаллический теллур является полупроводником. Он обладает необычайно высокой оптической анизотропией и заметным пьезоэлектрическим эффектом. Показатели преломления света достигают весьма высоких значений:  $n_o = 4,8$  для обыкновенной волны и  $n_e = 6,2$  для необыкновенной волны. Данные значения показателей преломления не значительно изменяются в диапазоне прозрачности материала за счет дисперсии. Однако большинство характеристик данного материала, таких как скорость ультразвука, коэффициенты затухания акустической волны, коэффициенты поглощения и отражения света, существенно меняется в зависимости от концентрации неосновных носителей зарядов,

дефектов кристаллической решетки, метода обработки кристаллов, температуры и других факторов.

В главе приведены результаты расчетов зависимостей фазовых скоростей ультразвука от направления волнового вектора ультразвука относительно осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  кристалла. Представлены сечения поверхностей акустических медленностей плоскостями  $XY$ ,  $XZ$ , а также  $YZ$ . Наибольшим значением скорости  $v = 3,87$  км/с обладает квазипродольная акустическая волна, распространяющаяся в плоскости  $YZ$  под углом  $\theta_a = 138^\circ$  к оси  $Z$ . Наименьшее значение скорости  $v = 1,05$  км/с достигается при использовании чистой сдвиговой волны, распространяющейся также в плоскости  $YZ$  кристалла под углом  $\theta_a = 117^\circ$  к оси  $Z$ . Так как данная волна является чистой сдвиговой модой для любого угла распространения в плоскости  $YZ$ , при создании акустооптических приборов она представляет наибольший интерес.

Во второй главе представлены результаты расчётов углов сноса акустической энергии и определены векторы смещения частиц среды в акустической волне для каждого направления волнового вектора. Приведены данные экспериментов по измерению скоростей ультразвука в кристалле теллура, причем измеренные величины скоростей весьма хорошо совпадают с рассчитанными значениями.

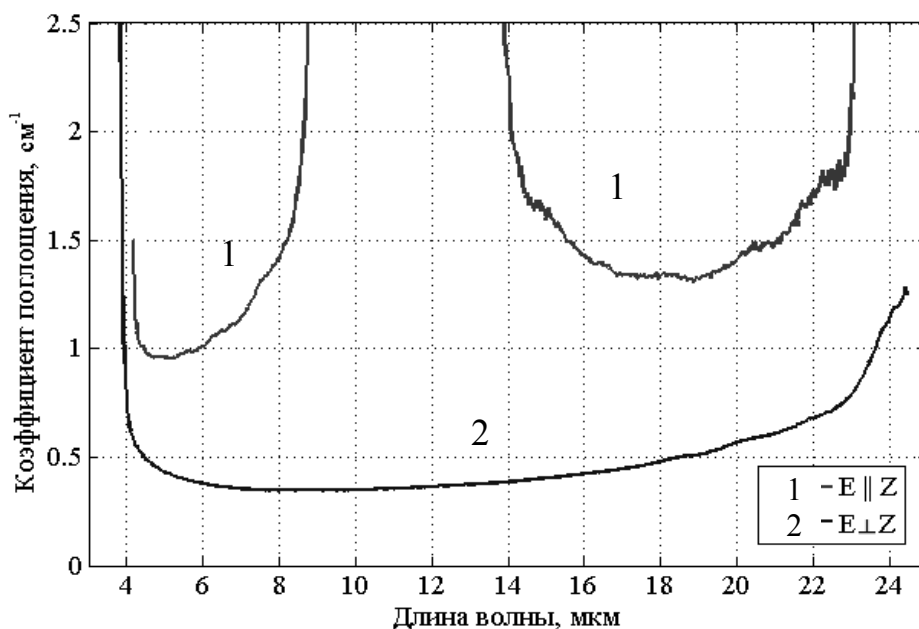


Рис. 1. Измеренная зависимость коэффициента поглощения энергии оптического излучения в кристалле теллура от длины волны (1 - необыкновенная волна 2 - обыкновенная)

Также во второй главе представлен обзор работ, посвященных исследованию оптических характеристик кристаллического теллура. Отмечается, что благодаря сильно

выраженному двулучепреломлению данного кристалла, угол сноса энергии оптической волны достигает значения  $\psi_0 = 15^\circ$ . Собраны результаты измерения коэффициента поглощения в нескольких образцах теллура. Диапазон прозрачности теллура оказывается относительно узким  $\lambda = 3,5 - 24$  мкм. Установлено, что в спектре поглощения необыкновенно поляризованного излучения наблюдается полоса, соответствующая длинам волн 8 - 14 мкм, которая отсутствует для обыкновенной волны (рис. 1). Данная закономерность объясняется полупроводниковой природой теллура, а также особенностью строения кристаллической решётки материала.

Помимо этого в главе представлены результаты измерений поглощения оптического излучения от температуры кристалла, а также от направления распространения оптического луча в теллуре. Проводится сравнение полученных результатов с данными, известными из литературы. Установлено, что нанесение просветляющих покрытий приводит к существенному улучшению пропускания кристаллов теллура.

Третья глава диссертации посвящена исследованию широкоугольного акустооптического взаимодействия в монокристалле теллура. В первом параграфе даны результаты расчетов коэффициента акустооптического качества материала для различных геометрий акустооптического взаимодействия. Установлено, что плоскость  $YZ$  теллура наиболее удобна для создания приборов не только из-за акустических особенностей кристалла, но и благодаря тому, что в данной плоскости достигается наибольшее значение коэффициента акустооптического качества  $M_2 = 160 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Максимальное значение коэффициента  $M_2$ , достижимое при широкоугольной дифракции, оказывается несколько меньше:  $120 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Обнаружено, что коэффициент акустооптического качества возрастает при удалении волнового вектора света от оптической оси. В связи с тем, что коэффициент поглощения необыкновенной волны также возрастает при удалении волнового вектора от оси  $Z$  кристалла, необходимо найти геометрию акустооптического взаимодействия, оптимальную не только с точки зрения эффективности дифракции, но и обеспечивающую достаточно низкие потери энергии оптического излучения. В таблице 1 приведены рассчитанные параметры широкоугольной геометрии в теллуре для различных направлений распространения ультразвука в плоскости  $YZ$  кристалла для длины волны света  $\lambda = 10,6$  мкм.

В данной главе обсуждается вопрос о выборе оптимальной геометрии широкоапертурного фильтра на основе кристалла теллура. Описывается методика измерения коэффициента акустооптического качества и коэффициентов фотоупругости.

Представлены результаты измерений этих коэффициентов для случая изотропной геометрии акустооптического взаимодействия.

Полярный угол звука $\theta_a$	Акустический угол сноса $\psi$	Фазовая скорость звука $V$ , км/с	Полярный угол света $\theta_o$	Угол Брэгга $\theta_B$	Угол дифракции $\theta_d$	Коэффициент АО качества $M_2 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{Г}$	Частота ультразвука $f$ , МГц
107°	37°	1,13	60,7°	43,7°	29,9°	130	175
105°	40°	1,16	50,1°	35,1°	21,0°	95	166
103°	43°	1,19	43°	30°	16,1°	70	154
100°	45°	1,26	33,9°	22,9°	11,2°	45	130
98°	46°	1,30	26,4°	18,4°	8,6°	28	110
95°	46°	1,37	16,6°	11,6°	5,1°	10	74
93°	46°	1,42	10,0°	7,0°	3,0°	3	47
80°	41°	1,77	-33,9°	-22,9°	-11,2°	11	177

Таблица 1. Акустические, оптические и акустооптические параметры широкоапертурной геометрии взаимодействия в плоскости YZ теллура

Приведены результаты исследования широкоапертурного фильтра на кристалле теллура. Для исследования была выбрана геометрия акустооптического взаимодействия соответствующая направлению распространения ультразвука  $\theta_a = 80^\circ$  (см. таблицу 1). Полученные на практике результаты в целом совпадали с рассчитанными параметрами, однако наблюдалось небольшое различие. Частота ультразвука и коэффициент акустооптического качества оказались несколько выше, чем ожидалось:  $f = 181$  МГц,  $M_2 = 13 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{Г}$ . На рисунке 2а представлена измеренная зависимость угла Брэгга от частоты ультразвука. Из-за большого поглощения необыкновенной волны в кристалле на практике удалось осуществить лишь режим заграждающей фильтрации, т.е. режим в котором из общего спектра светового пучка, прошедшего через фильтр, удаляется излучение с заданной длиной волны. Поэтому на рисунке 2 приведена только одна углочастотная зависимость, соответствующая обыкновенной поляризации света. На рисунке 2б представлена передаточная характеристика акустооптической ячейки. Как следует из рисунков 2а и 2б, угловая апертура прибора достигала значения  $24^\circ$ . К сожалению, на практике не удалось достичь высокой эффективностью дифракции  $\zeta = 1\%$ , данное значение было получено при мощности ультразвука  $P = 2$  мВт, размеры пьезопреобразователя ячейки при этом были  $4,0 \times 1,5$  мм. Причина низкой эффективности

дифракции заключается в несовершенстве метода возбуждения ультразвука в исследованной ячейке.

Очевидно, что максимальная эффективность дифракции в теллуре при данной геометрии акустооптического взаимодействия может быть достигнута при мощности ультразвука около 0,5 Вт в том случае, если пьезопреобразователь имеет длину 4,0 мм, а его ширина равна 1,5 мм. Таким образом, в третьей главе доказано, что теллур является перспективным материалом для создания акустооптических фильтров инфракрасного излучения с длинами волн более 5 мкм.

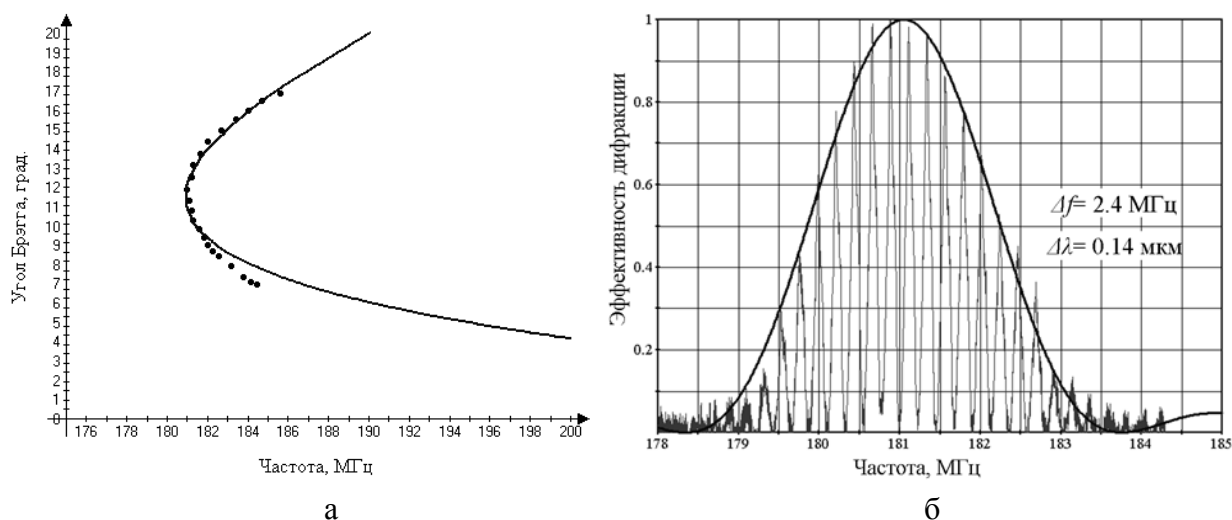


Рис. 2. Характеристики широкоапертурного акустооптического фильтра на кристалле теллура (а – углочастотная характеристика, б – передаточная характеристика).

В четвертой главе исследован акустооптический модулятор интенсивности инфракрасного излучения на основе кристалла теллура. В данном модуляторе реализовывалась изотропная геометрия акустооптического взаимодействия, обеспечивающая величину коэффициента  $M_2 = 16 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Благодаря высокому значению коэффициента акустооптического качества при мощности ультразвука 1Вт удалось достичь эффективности дифракции  $\zeta = 80\%$  на длине волны света  $\lambda = 10,6$  мкм при размерах пьезопреобразователя  $2,0 \times 8,0$  мм.

Следует отметить, что на оптические грани исследованной ячейки было нанесено просветляющее покрытие, и коэффициент отражения света от граней кристалла был достаточно мал. Поэтому на практике удалось реализовать геометрию двухпроходной заграждающей фильтрации. На рисунке 3 показана схема двухпроходного заграждающего фильтра.

В заграждающем фильтре используется излучение нулевого порядка дифракции, интенсивность которого существенно уменьшается при выполнении условия брэгговского синхронизма. Очевидно, что если с помощью зеркала луч нулевого дифракционного порядка направить в ячейку повторно, можно добиться большего коэффициента подавления.

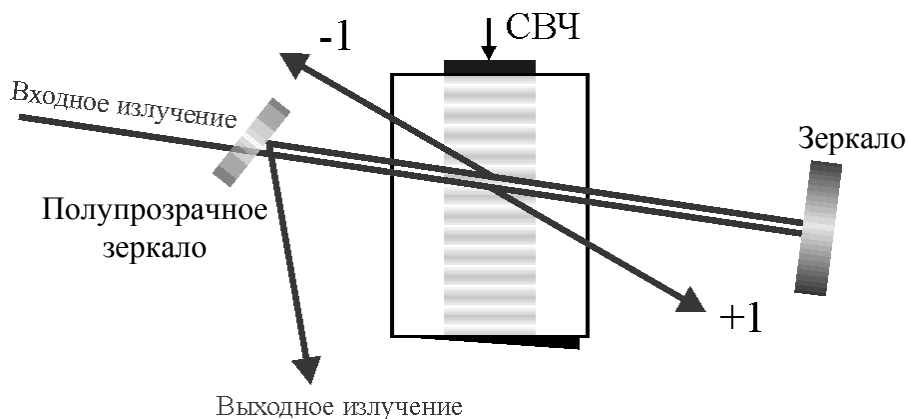


Рис. 3. Схема двухпроходного заграждающего фильтра

На рисунке 4 показана измеренная зависимость коэффициента подавления сигнала от мощности акустической волны. Как можно видеть из данного рисунка, коэффициент подавления повышается приблизительно в два раза при использовании двукратного прохождения света через звуковой столб. Зависимость коэффициента подавления сигнала двухпроходным фильтром, схема которого показана на рисунке 3, определяется формулой:

$$\chi_2 = 10 \lg(1 - \zeta(P, \Delta k))^2 = 2\chi_1,$$

где  $\chi_1$  – коэффициент подавления сигнала однопроходным заграждающим фильтром, а  $\zeta(P, \Delta k)$  – эффективность дифракции, которая определяется мощностью ультразвука и величиной вектора расстройки. Как следует из данной формулы, применение двукратного взаимодействия, помимо повышения коэффициента подавления сигнала, приводит к уширению спектральной полосы двухпроходного фильтра.

Очевидно, что можно предложить множество схем фильтрации, использующих многократное прохождение света через акустический пучок. В четвертой главе рассмотрены также схемы, использующие двух и трехкратное прохождение света, позволяющие добиться улучшения спектрального разрешения полосового фильтра. Изучение этих схем фильтрации проведено на примере квазиколлинеарной, а также широкоапертурной ячеек на кристалле парателлурита. Однако очевидно, что полученные результаты можно обобщить и на случай акустооптического устройства, использующего другой кристалл и иную геометрию взаимодействия.

Наиболее простой является схема, в которой первый порядок дифракции с помощью зеркала направляется обратно в ячейку; на выходе фильтра используется дважды протифрагированный свет. Применение подобной схемы позволяет добиться сужения спектральной полосы в 1,4 раза. Большого увеличения спектрального разрешения удаётся добиться путем применения схемы фильтрации с трехкратным прохождением света через звук. В рассмотренном в четвертой главе трехпроходном полосовом фильтре

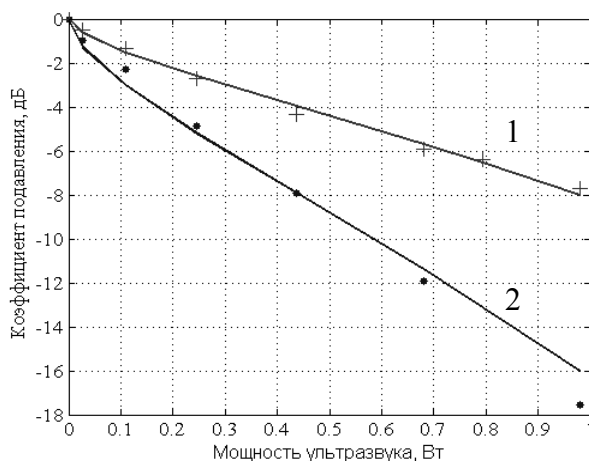


Рис. 4. Зависимость коэффициента подавления света акустооптической ячейкой, использующей однопроходную (1) и двухпроходную (2) систему фильтрации

луч каждый раз с помощью зеркала посылается в кристалл не под углом Брэгга, а с небольшим отклонением от условия синхронизма. Благодаря этому удаётся добиться двукратного сужения спектральной полосы фильтра. Обнаружено, что данные схемы, хотя и позволяют добиться улучшения спектральных характеристик ячейки, приводят к незначительному ухудшению эффективности дифракции.

В заключении кратко сформулированы основные результаты проведенных исследований и сформулированы выводы диссертационной работы:

1. Показано, что теллур является одним из наиболее перспективных кристаллов для создания акустооптических приборов, работающих с излучением среднего и дальнего диапазона оптических длин волн при  $\lambda = 3,5 - 25$  мкм. Существенным недостатком теллура является высокое поглощение оптического излучения необыкновенной поляризации. В полосе длин волн  $\lambda = 8 - 14$  мкм поглощение необыкновенной волны превышает величину  $3 \text{ см}^{-1}$ . Прозрачность данного материала существенно увеличивается при приближении распространения света к оптической оси материала, вплоть до  $0,4 \text{ см}^{-1}$ .

2. Проведены расчеты акустических и акустооптических характеристик теллура для различных направлений волновых векторов света и ультразвука. Предсказано, что наибольший коэффициент акустооптического качества кристалла теллура в режиме



анизотропной дифракции достигает величины  $M_2 = 160 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . В результате проведенных расчетов установлено, что наиболее удобной для создания акустооптических приборов на основе кристаллов теллура является чистая сдвиговая акустическая волна, распространяющаяся в плоскости  $YZ$  материала.

3. Проведен анализ характеристик широкоугольной геометрии взаимодействия света и ультразвука для различных направлений волнового вектора акустической волны в плоскости  $YZ$ . Установлено, что наибольшее значение коэффициента акустооптического качества при широкоугольном взаимодействии достигает значения  $M_2 = 130 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ , когда оптические лучи распространяются вдали от оси  $Z$  кристалла. При малых углах распространения оптических пучков наблюдается улучшение прозрачности материала, однако это сопровождается уменьшением коэффициента  $M_2$ .

4. Исследован макет широкоапертурного акустооптического фильтра на основе кристалла теллура, работающего в заграждающем режиме. Зафиксированная в эксперименте эффективность дифракции достигала 1% при мощности ультразвуковой волны 2мВт. Максимальная эффективность акустооптического взаимодействия может быть достигнута при значении мощности ультразвука 0,5 Вт. Высокая эффективность дифракции в данном устройстве обеспечивается благодаря значению качества  $M_2 = 13 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{г}$ . Спектральное разрешение данного фильтра равнялось  $A = 75$ , а угловая апертура достигала величины  $24^\circ$ .

5. На примере квазиколлинеарного фильтра изучены особенности акустооптического взаимодействия при многократном прохождении света через звуковой пучок. Показано, что применение двукратного взаимодействия приводит к повышению коэффициента подавления сигнала в заграждающем фильтре в 2 раза. Установлено, что при увеличении эффективности акустооптического взаимодействия наблюдается незначительное ухудшение спектральных характеристик устройств фильтрации.

6. Показано, что применение схем фильтрации с многократным прохождением света через акустооптическую ячейку может приводить к повышению спектрального разрешения фильтра. В эксперименте на длине волны света  $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$  достигнуто уменьшение полосы пропускания квазиколлинеарного фильтра с  $1,2\text{Å}$  до  $0,8\text{Å}$  при использовании схемы двукратного взаимодействия. Применение схемы с трехкратным прохождением света через звуковой пучок позволило получить двукратное уменьшение полосы фильтра с  $1,2\text{Å}$  до  $0,6\text{Å}$ .

### *Список публикаций по теме диссертации*

1. Г.А. Князев; Дифракция света на звуковом столбе сложного сечения. - сборник тезисов международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов - 2002», Москва, 10 апреля 2002г. стр.112-113.
2. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-Optic Cells with Non-Uniform Length of Light and Sound Interaction - abstracts 16-th Int. Symp. on Nonlinear Acoustics, Moscow, 2002, pp.198-199.
3. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-Optic Cells with Non-Uniform Length of Light and Sound Interaction - "Nonlinear Acoustics at the beginning of the 21<sup>st</sup> Century" ed. By O.V. Rudenko, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 2002, v.2, p. 881-884.
4. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-Optic Double-Pass Notch Filter Using Paratellurite Single Crystal - abstracts VI International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", St.Petersburg, 2003, p.39.
5. В.Б. Волошинов, Г.А. Князев; Акустооптические ячейки с неодинаковой длиной взаимодействия света и звука - Журнал Технической физики, 2003, т. 73, вып. 11, стр. 118-122.
6. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Application of Optical Multipass Configuration in Tunable Acousto-optic Filters - preliminary Program and Abstracts of 7-th International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", St.-Petersburg, 2004, pp. 18-19.
7. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-Optic Double-Pass Notch Filter Using Paratellurite Single Crystal - proc. VI Int. Conf. for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", St.-Petersburg, 2003, pp. A2-24 - A2-28.
8. G.A. Knyazev V.B. Voloshinov; Acousto-Optical Filtering Systems with Improved Spectral Resolution - preliminary Program and Abstracts of 8-th International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", St.-Petersburg, 2005, pp. 5-6.
9. В.Б. Волошинов, Л.Н. Магдич, Г.А. Князев; Акустооптический заграждающий фильтр на основе кристалла парателлурита. – Вестн. Моск. ун-та, сер. 3, Физ., астр., 2005, № 4, стр. 36 – 39.
10. Г.А. Князев; Акустооптические системы с улучшенным спектральным разрешением - сборник тезисов Молодежной научной конференции "Физика и прогресс", Санкт-Петербург, 2005, стр. p-10.
11. В.Б. Волошинов, Л.Н. Магдич, Г.А. Князев; Перестраиваемые акустооптические фильтры с многократным взаимодействием света и звука. – Квант. электр., 2005, т. 35, № 11, стр. 1057 – 1063.

12. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-optic properties of materials transparent in the infrared - 35<sup>th</sup> Winter School on Wave and Quantum Acoustics Conference Abstracts and Program, Ustroń, Poland, 2006, p. 43.
13. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-optic properties of materials transparent in the infrared - Archives of Acoustics, v. 31, N 1, 2006.
14. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov; Acousto-optical filtering systems with improved spectral resolution - proc. VIII Int. Conf. for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", St.-Petersburg, 2005, p. PS-2(<http://www.home.ru/weconf/PROC05/we05.pdf>).
15. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov, N. Gupta, V.I. Balakshy, L.A. Kulakova; Acousto-optic characteristics of single crystals of tellurium - preliminary Program and Abstracts of 9-th International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine", St.-Petersburg, Russia, 2006, p. 21.
16. Г.А. Князев; Акустооптические системы с улучшенным спектральным разрешением - Молодежная научная конференция "Физика и прогресс", сборник работ, Санкт-Петербург, 2005, стр. 45-48.
17. G.A. Knyazev V.B. Voloshinov N. Gupta V.I. Balakshy, L.A. Kulakova; Acousto-optic characteristics of single crystals of tellurium Proc. 9 Int. Conf. for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine", St.-Petersburg, 2006, p. B-8 (<http://www.home.ru/weconf/PROC06/we06.pdf>).
18. G.A. Knyazev, V.B. Voloshinov, N. Gupta, L.A. Kulakova; Tellurium-Based Acousto-Optic Cell with Wide Optical Aperture - Preliminary Program and Abstracts of 10-th International Conference for Young Researchers "Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems", St.-Petersburg, 2007, p. 26.
19. V.B. Voloshinov, V.B. Balakshy, L.A. Kulakova, N. Gupta, G.A. Knyazev; Acousto-optic Cells Operating in the Long Infrared Region of Spectrum – Proc. 10-th School on Acousto-optics and Applications, Gdansk - Sopot, Poland, 2008, p. 34.
20. Г.А. Князев, В.Б. Волошинов; Дифракция инфракрасного излучения на ультразвуке в кристаллах теллура – XI-Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах», часть 4, «Когерентная и нелинейная оптика. Фотоника», Звенигород МО, 2008, стр. 98-100.
21. В.И. Балакший, В.Б. Волошинов, Г.А. Князев, Л.А. Кулакова; Исследование акустооптических характеристик кристаллов теллура в режиме анизотропной дифракции света – Журнал Технической физики, 2008, т. 78, вып. 10, стр. 87-95.
22. Г.А.Князев, В.Б.Волошинов; Дифракция инфракрасного излучения на ультразвуке в кристаллах теллура – Известия РАН серия физика, 2008, № 12 (в печати).