

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи
УДК 535.241.13:534

Доброленский Юрий Сергеевич

КОЛЛИНЕАРНАЯ ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА УЛЬТРАЗВУКЕ В ОПТИЧЕСКИ
АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

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 технических наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ РАН С.Н.Антонов
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ВНИИФТРИ В.М.Епихин

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие НИИ «Полюс»

Защита состоится 21 февраля 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

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Взаимодействие световых и звуковых волн (акустооптический эффект) заключается в дифракции света на акустической волне. Это связано с тем, что акустическая (ультразвуковая) волна, распространяющаяся в оптически прозрачной среде, вызывает периодическое изменение показателя преломления этой среды, т. е. является дифракционной решёткой. Так как среда при этом не теряет своей прозрачности для света, такая решётка является фазовой. Первые теоретические и экспериментальные исследования акустооптической дифракции относятся к 20-м – 30-м годам XX века. Однако по-настоящему интенсивное развитие акустооптики и её практического применения началось в 1960-е годы после создания лазеров и продолжается по сей день.

В настоящее время на основе акустооптического эффекта создано большое число различных по принципу действия и назначению практических устройств, позволяющих управлять интенсивностью оптического излучения (модуляторы), направлением его распространения (дефлекторы), а также анализировать его спектральный состав и выделять из входного сигнала узкую полосу частот (анализаторы спектра и фильтры). В последнее время всё большее распространение получают системы оптической обработки информации. В таких системах также используются акустооптические элементы, позволяющие, например, осуществлять пространственную фильтрацию оптических изображений в режиме реального времени, что является несомненным преимуществом. Кроме того, акустооптические устройства применяются при решении других задач радиофизики: для анализа спектрального состава радиосигналов (также в режиме реального времени), визуализации акустических полей и пр. Наконец, дифракция света на ультразвуке используется для исследования свойств материалов: определения скорости и затухания акустической волны, изучения анизотропии кристаллов и т. д.

подавляющее большинство акустооптических элементов (акустооптических ячеек) изготавливаются на основе кристаллов. При этом наиболее широкие возможности для разнообразных практических применений открываются при использовании кристаллов, обладающих выраженной анизотропией как оптических, так и упругих свойств. С другой стороны, акустооптическая дифракция в анизотропной среде сама по себе представляет гораздо больший фундаментальный интерес, чем изотропный случай, тем более что последний в основном уже хорошо изучен. Поэтому внимание исследователей в последнее время сосредоточено именно на анизотропных средах.

Одним из частных случаев акустооптического взаимодействия является коллинеарное взаимодействие, при котором волновые векторы всех взаимодействующих волн направлены вдоль одной прямой. Такая геометрия обладает определёнными преимуществами. В частности, за счёт увеличения длины взаимодействия света и ультразвука возрастает эффективность дифракции; кроме того, повышается селективность акустооптического взаимодействия, что приводит к сужению полосы частот взаимодействия. Поэтому коллинеарная геометрия чаще всего используется в акустооптических фильтрах.

Однако реализация коллинеарной акустооптической дифракции во многих случаях сопряжена с определёнными проблемами. Две наиболее часто встречающиеся из них – это несовпадение направлений фазовой и групповой скорости волны (как оптической, так и акустической), распространяющейся в кристалле, и симметрия структуры кристалла, приводящая к отсутствию фотоупругого и, следовательно, акустооптического эффекта. Преодолению этих трудностей уделяется в последнее время повышенное внимание.

Вместе с тем, коллинеарное взаимодействие как частный случай анизотропной дифракции представляет также и фундаментальный научный интерес. Поскольку в оптически анизотропной среде возможна как анизотропная, так и изотропная дифракция, выяснение физических механизмов, приводящих именно к анизотропной дифракции (в том числе коллинеарной) является важным для понимания физики акустооптического взаимодействия. Эти механизмы остаются до настоящего времени не до конца изученными.

Наконец, развитие акустооптической техники и, в частности, повышение разрешающей способности фильтров приводят к тому, что на работе акустооптических приборов начинают сказываться эффекты, которыми до настоящего времени обычно пренебрегали. К числу таких эффектов относится, например, эффект Доплера. Поскольку наибольшим разрешением обладают фильтры с коллинеарной (или квазиколлинеарной) геометрией взаимодействия, влияние эффекта Доплера скажется в первую очередь на работе именно таких устройств. Актуальность этой проблемы возрастает с повышением частот ультразвука, тенденция к которому также имеет место в современной акустооптике.

Решению вышеперечисленных задач, связанных с коллинеарным акустооптическим взаимодействием в оптически анизотропных средах, посвящена данная диссертационная работа.

Цели диссертационной работы

Цели диссертационной работы состояли в исследовании различных аспектов коллинеарного акустооптического взаимодействия в оптически анизотропной среде как с точки зрения фундаментальной науки, так и в свете практических применений коллинеарной дифракции в акустооптических фильтрах. В работе были поставлены следующие задачи:

1. Теоретическое исследование коллинеарной анизотропной дифракции света на ультразвуке, в частности исследование среды акустооптического взаимодействия как слоистой оптически анизотропной среды с различной ориентацией соседних слоёв. Оценка эффективности дифракции в рамках разработанной модели.
2. Экспериментальное обнаружение и исследование коллинеарной дифракции расходящегося светового пучка на ультразвуке в кристалле парателлуриата вдоль направления, в котором взаимодействие плоских волн не имеет места.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование невзаимных свойств акустооптического взаимодействия в режиме коллинеарной дифракции, в частности обусловленного эффектом Доплера различия акустических частот брэгговского синхронизма при распространении света в противоположных направлениях. Оценка влияния указанного эффекта на полосы пропускания коллинеарных акустооптических фильтров.

Научная новизна работы

1. Показано, что оптически анизотропная среда с распространяющейся в ней акустической волной подобна слоистой периодической среде с различной ориентацией соседних слоёв. В рамках разработанного метода дано объяснение независимости эффективности дифракции от величины двулучепреломления материала.
2. Впервые обнаружено и экспериментально исследовано явление коллинеарной дифракции расходящегося света на ультразвуке в кристалле парателлуриата в направлении, запрещённом для акустооптического взаимодействия плоских волн. Показано, что при использовании расходящегося света коллинеарная дифракция имеет место. Измерены эффективность и полоса частот дифракции.
3. Исследованы невзаимные свойства акустооптического взаимодействия в режиме коллинеарной дифракции, в частности несовпадение частот ультразвука, соответствующих условию синхронизма, при распространении света в

противоположных направлениях. Получено аналитическое выражение и проведены расчёты разности этих частот в различных материалах. Невзаимный эффект зарегистрирован и исследован экспериментально в кристалле ниобата лития; результаты эксперимента оказались в хорошем соответствии с теорией.

Практическая значимость работы

Установлено, что величина двулучепреломления материала не влияет на эффективность дифракции. Это означает, что в акустооптике могут одинаково успешно применяться материалы как с большим, так и с малым двулучепреломлением.

Обнаруженное явление коллинеарной дифракции расходящегося светового пучка на ультразвуке в запрещённом направлении может быть использовано на практике. В частности, высокая эффективность дифракции и узкая полоса частот взаимодействия делают возможным создание коллинеарного фильтра на кристалле парателлурита с использованием расходящегося света. Кроме того, поперечная структура дифрагированного света позволяет осуществлять дифференцирование (оконтуривание) оптических изображений.

Показано, что при приближении акустических частот к сверхвысокочастотному диапазону доплеровские сдвиги частоты ультразвука становятся сравнимыми с шириной полосы пропускания коллинеарного фильтра. Это обстоятельство должно учитываться при проектировании акустооптических устройств, обладающих высоким разрешением и работающих на сверхвысоких акустических частотах. Такой учёт становится особенно важным для систем с многократным прохождением света через ультразвуковой столб или использующих отражение оптических и/или акустических пучков.

Теоретическая значимость работы

Развита теория коллинеарного акустооптического взаимодействия, в частности, разработан новый подход к изучению коллинеарной анизотропной дифракции на основе оптики анизотропных сред. Показано, что коллинеарное взаимодействие оптической и акустической волн в акустооптической ячейке может рассматриваться как процесс распространения света через последовательность повёрнутых друг относительно друга двулучепреломляющих пластин. Результаты, полученные в рамках такого рассмотрения, хорошо согласуются качественно и количественно с данными, полученными обычными акустооптическими методами.

Обнаружение коллинеарной дифракции расходящегося света на ультразвуке в кристалле парателлурита, имеющей высокую эффективность, доказывает правильность теории акустооптического взаимодействия, в рамках которой было предсказано существование такой дифракции.

На примере коллинеарной дифракции исследованы особенности акустооптического взаимодействия на сверхвысоких акустических частотах, в частности несовпадение акустических частот брэгговского синхронизма при распространении света в противоположных направлениях (невзаимный эффект). Проанализированы различные случаи взаимной ориентации волновых векторов света и ультразвука при дифракции в +1-й и -1-й порядки и найдены условия возникновения невзаимного эффекта. Получено аналитическое выражение для величины указанного эффекта, учитывающее также дисперсию показателя преломления среды взаимодействия. Полученные результаты показывают необходимость учёта этих факторов в теории акустооптического взаимодействия при больших значениях частоты ультразвука.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Оптически анизотропная среда с распространяющейся в ней акустической волной может рассматриваться как слоистая двулучепреломляющая среда с различной ориентацией соседних слоёв. В частности, использование поляризационного фильтра Шольца как модели коллинеарной акустооптической ячейки позволяет рассчитать эффективность дифракции и значение коэффициента акустооптической связи. Эффективность коллинеарной дифракции не зависит от величины двулучепреломления материала.
2. Коллинеарная дифракция света на ультразвуке в направлениях кристаллов, являющихся запрещёнными для акустооптического взаимодействия плоских волн, имеет место при использовании расходящегося света. На основе обнаруженного эффекта может быть создан коллинеарный акустооптический фильтр, использующий расходящийся оптический пучок. Поперечная структура дифрагированного света в данном фильтре позволяет также осуществлять дифференцирование (оконтуривание) оптических изображений.
3. Изменение взаимной ориентации волновых векторов падающего света и ультразвука на противоположную приводит к изменению акустической частоты коллинеарной дифракции, соответствующей условию брэгговского синхронизма. На сверхвысоких частотах ультразвука сдвиг акустической частоты становится сравнимым с шириной

полосы пропускания коллинеарного фильтра, что позволяет наблюдать указанный эффект экспериментально и требует его учёта при проектировании акустооптических устройств, работающих на сверхвысоких акустических частотах.

Апробация работы

Результаты проведённых исследований были представлены на международных конференциях: 10-я международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2003» (Россия, Москва, 2003 г.); 8-я международная конференция «Системный анализ и управление» (Украина, Евпатория, 2003 г.); 6th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems” (Россия, С.-Петербург, 2003 г.); 9th School on Acousto-optics and Applications (Польша, Гданьск, 2004 г.); International Congress on Optics and Optoelectronics (COO-2005, Польша, Варшава, 2005 г.); 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL–2005, Украина, Ялта, 2005 г.); 35th Winter School on Wave and Quantum Acoustics (Польша, Устронь, 2006 г.); 9th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine” (Россия, С.-Петербург, 2006 г.); 7th International Young Scientists Conference «Optics and High Technology Material Science» (SPO-2006, Украина, Киев, 2006 г.); 10th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems” (Россия, С.-Петербург, 2007 г.). Результаты исследований также обсуждались на научных семинарах лаборатории акустооптики и кафедры физики колебаний физического факультета МГУ. По материалам диссертации опубликованы работы, приведённые ниже.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём работы составляет 137 страниц. Диссертация включает 37 рисунков и 2 таблицы. Библиография содержит 142 наименования, в том числе 17 авторских публикаций.

Содержание работы

Во введении содержится обоснование актуальности темы исследований, излагаются цели диссертационной работы, приводится краткое содержание работы, отмечается

научная новизна и практическая значимость проведённых исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы.

Первая глава диссертации содержит необходимые для последующего изложения сведения из теории акустооптического взаимодействия в анизотропных средах вообще и коллинеарного взаимодействия в частности. Показано, что коллинеарное акустооптическое взаимодействие на низкой акустической частоте может иметь место только в анизотропной среде. Приведены основные параметры коллинеарной дифракции и характеристики коллинеарных акустооптических фильтров. Показаны преимущества коллинеарной геометрии дифракции для фильтрации оптических сигналов, а также фундаментальные проблемы, возникающие при реализации этого типа акустооптического взаимодействия.

Глава включает также обзор важнейших работ, посвящённых коллинеарным акустооптическим фильтрам, начиная с 1960-х годов и до настоящего времени. Приведены общие схемы и параметры основных фильтров, созданных в нашей стране и за рубежом. Описаны работы по использованию коллинеарных акустооптических ячеек в лазерных резонаторах для сужения линии генерации. Показано также, что использование сноса энергии в кристаллах позволяет существенно расширить круг изучаемых явлений и используемых материалов; приведены схемы соответствующих устройств. В связи с тем, что во многих кристаллах (например в парателлурите) чисто коллинеарное взаимодействие невозможно в силу симметрии кристаллической решётки материала, рассмотрены также способы реализации взаимодействия, имеющего близкую к коллинеарной геометрию: квазиколлинеарное взаимодействие и взаимодействие расходящихся пучков. Дан краткий обзор квазиколлинеарных фильтров на парателлурите.

Во второй главе диссертации проводится теоретическое исследование коллинеарного акустооптического взаимодействия в оптически анизотропной среде. Показывается, что процессы, происходящие в коллинеарной акустооптической ячейке, по своей физической сути близки к процессам и явлениям, наблюдаемым в системе последовательно расположенных фазовых пластинок с повернутыми друг относительно друга осями. В самом деле, распространяющаяся в кристалле акустическая волна вызывает изменение оптической индикатрисы последнего, конкретно – поворот и деформацию эллипсоида показателей преломления. Так как причиной анизотропной дифракции света на ультразвуке является поворот осей индикатрисы, в данной главе исследуется именно этот аспект воздействия акустического возмущения на анизотропную среду. Поскольку распространение акустической (ультразвуковой) волны является периодическим

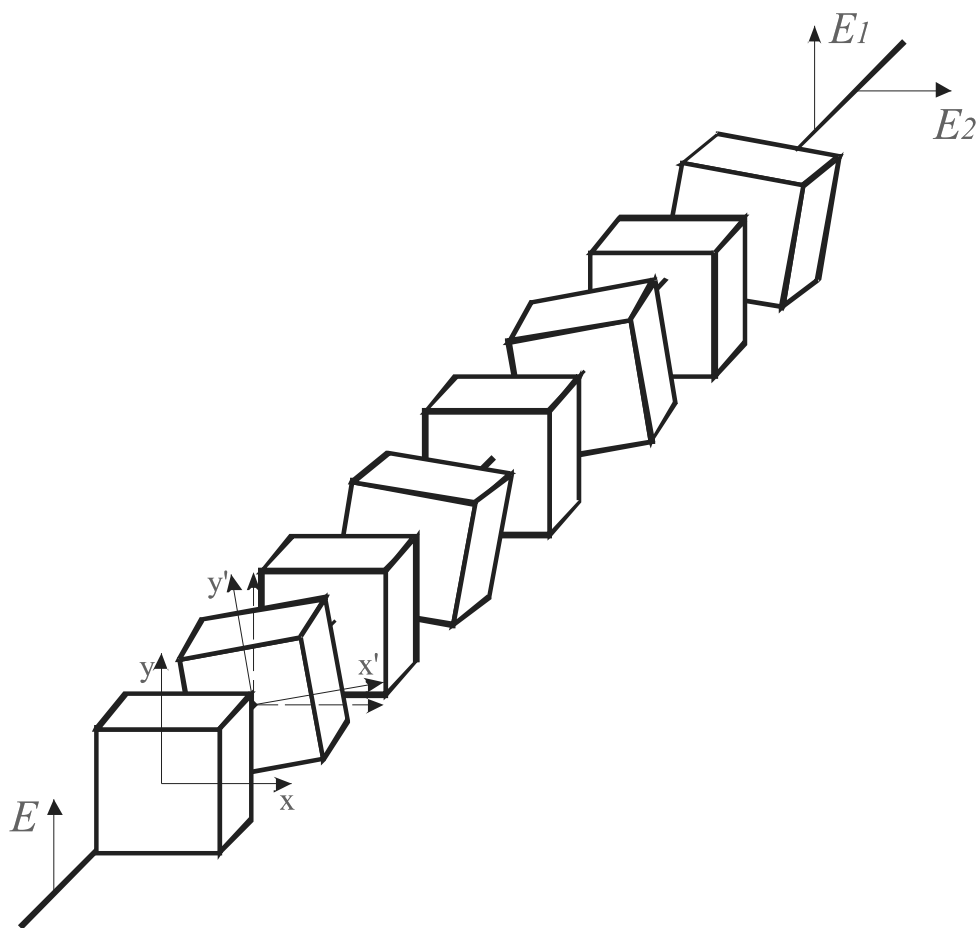


Рис.1. *Распространение света через систему повёрнутых друг относительно друга двулучепреломляющих пластин*

процессом, то можно утверждать, что эллипсоид поворачивается в разные стороны в соответствии с фазой волны, т. е. совершает колебания. Тогда акустическое поле в кристалле можно представить как набор тонких слоёв, в каждом из которых оси индикатрисы повёрнуты относительно соответствующих осей в соседних слоях. При коллинеарном взаимодействии падающий свет проходит все эти слои последовательно. Это и означает, что процесс распространения света в акустическом поле подобен процессу распространения света через систему повёрнутых друг относительно друга двулучепреломляющих пластин (рис. 1).

Такая система известна в оптике как поляризационный фильтр Шольца. Очевидно, что если на её входе имеется линейно поляризованная световая волна, то волна на выходе будет содержать как составляющую с исходной поляризацией, так и составляющую с поляризацией, ортогональной исходной. Поскольку при анизотропной акустооптической дифракции плоскости поляризации падающего и дифрагированного света взаимно

ортогональны, то первую волну можно считать прошедшей, а вторую – дифрагированной волной.

Полученные в рамках этой модели аналитические выражения для эффективности дифракции и параметра акустооптической связи согласуются с выражениями, полученными ранее в рамках «традиционного» для акустооптики рассмотрения. Это говорит об адекватности такого подхода при исследовании процессов акустооптического взаимодействия. Для большого числа слоёв расчёты эффективности дифракции проводились при помощи исчисления Джонса – матричного метода, позволяющего рассчитывать прохождение света через оптические системы из большого числа элементов. Результаты расчётов, проведённых для нескольких наиболее распространённых в акустооптике материалов, также оказались в хорошем согласии с известными данными. Таким образом, смысл проведённого исследования состоит в доказательстве того, что процесс акустооптической дифракции может быть объяснён в рамках общих соображений, известных из оптики анизотропных сред. Количественное совпадение полученных результатов с известными ранее показывает, что фильтр Шольца является хорошей моделью коллинеарной акустооптической ячейки.

Расчёты показывают, что угол поворота осей оптической индикатрисы очень мал практически во всех анизотропных средах (порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ радиан). Более того, его значение падает с увеличением двулучепреломления. Тем не менее эффективность дифракции на выходе всей ячейки не зависит от величины этого угла, т. е. не зависит от двулучепреломления материала. Это объясняется тем, что влияние двулучепреломления на величину угла поворота осей компенсируется влиянием на величину фазовой задержки между прошедшей и дифрагированной волнами. Полученный результат объясняет тот факт, что в акустооптике одинаково успешно применяются материалы как с большим, так и с малым двулучепреломлением.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальному изучению коллинеарной дифракции расходящегося светового пучка на ультразвуке в кристалле парателлурита в направлении, в котором взаимодействие плоских волн не имеет места. Причина этого заключается в том, что во всех кристаллах существуют направления, вдоль которых плоская акустическая волна не меняет показатель преломления среды для плоской световой волны, распространяющейся в этом же направлении. Отсутствие фотоупругого эффекта означает равенство нулю соответствующей фотоупругой константы, а значит, и акустооптического качества. Такие направления в кристаллах называются запрещёнными для соответствующего типа акустооптического взаимодействия. С другой стороны, реальные волны, как акустические, так и оптические, не являются плоскими, а

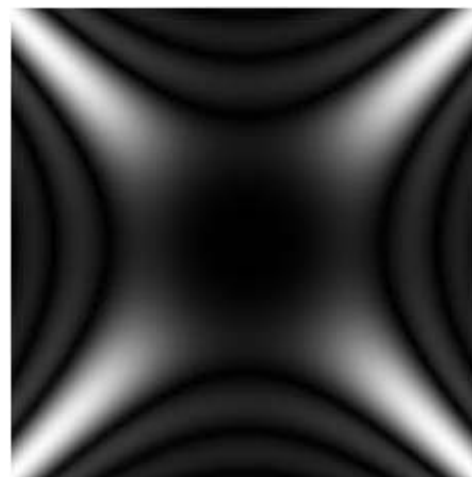
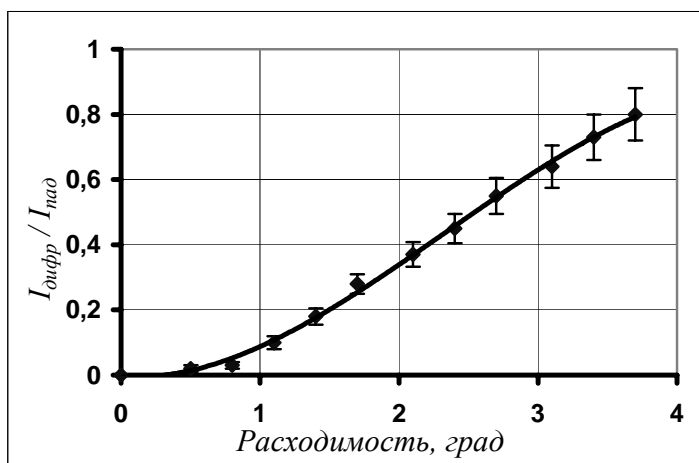
представляют собой пучки конечных поперечных размеров. Проведённые ранее теоретические исследования показали, что взаимодействие между расходящимися пучками может происходить даже в случае, если их осевые компоненты ориентированы вдоль запрещённого направления. В настоящей работе это явление впервые обнаружено и исследовано экспериментально на примере направления $[110]$ кристалла TeO_2 .

Эксперимент показал, что эффект действительно имеет место при использовании расходящегося света. Экспериментальная зависимость эффективности коллинеарной дифракции от угла расходимости света в воздухе показана на рис. 2, а (расходимость звука пренебрежимо мала). Видно, что при освещении ячейки коллимированным пучком дифракция практически отсутствует. По мере увеличения расходимости света эффективность возрастает и при расходимости $\sim 4^\circ$ в воздухе достигает 80 %, т. е. дифракция не только существует, но и с весьма большой эффективностью. Акустическая мощность при этом достигала величины $P \approx 2,4$ Вт, а длина кристалла составляла $L = 2,7$ см, однако вследствие большого затухания ультразвука (см. ниже) эффективная длина взаимодействия была меньше.

Измеренная зависимость эффективности дифракции от частоты ультразвука показывает, что ширина акустического частотного диапазона по уровню 0,5 от максимальной эффективности при расходимости 4° в воздухе составляет 50 кГц. Так как акустическая частота синхронизма равна $F = 149,2$ МГц (при длине волны света $\lambda = 632,8$ нм), разрешение устройства оказывается равным $R \approx 3000$. Поскольку это значение одинаково по свету и по звуку, для полосы пропускания по длинам волн света при $\lambda = 632,8$ нм получается значение $\Delta\lambda = 2,1$ Å. Полученные результаты говорят о возможности создания коллинеарного фильтра на парателлурите, использующего расходящийся свет.

В ходе экспериментов было установлено, что дифракционная картина имеет сложный крестообразный вид с тёмным провалом в центре, что соответствовало расчётам (расчётная дифракционная картина изображена на рис.2, б). Провал в центре соответствовал осевой компоненте пучка, идущей строго вдоль запрещённого направления. Картина была устойчива по отношению к поворотам ячейки в пределах нескольких градусов. Таким образом, к достоинствам предполагаемого фильтра добавляется широкая угловая апертура, а отсутствие дифракции в центре даёт возможность дифференцирования (оконтуривания) входных оптических изображений.

В третьей главе исследуется также влияние различных факторов, в частности затухания ультразвука, на эффективность коллинеарной дифракции и полосу пропускания фильтра. На примере направления $[110]$ парателлурита проведены соответствующие



а

б

Рис. 2. Дифракция в запрещённом направлении в кристалле парателлурита: зависимость эффективности от расходимости света (а) и дифракционная картина (б)

расчёты. Показано, что затухание акустической волны приводит к уменьшению эффективности дифракции и уширению полосы. Эти эффекты могут быть компенсированы увеличением акустической мощности. Величина затухания ультразвука $\beta = (3,8 \pm 0,8)$ дБ/см для медленной акустической моды в направлении [110] кристалла TeO_2 определена экспериментально. Показано, что полоса пропускания фильтра увеличивается также при увеличении расходимости света, что наблюдалось и в эксперименте.

Четвёртая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию невзаимных свойств акустооптического взаимодействия на примере коллинеарной дифракции.

По мере развития акустооптики происходит освоение всё более высоких частот ультразвука, и в настоящее время созданы акустооптические устройства, оперирующие частотами вплоть до нескольких гигагерц. На таких высоких частотах становятся заметными эффекты, которыми до настоящего времени обычно пренебрегали. К их числу относится невзаимность акустооптического взаимодействия, которая заключается в различии условий брэгговского синхронизма при распространении света в противоположных направлениях. В самом деле, если при брэгговском акустооптическом взаимодействии имеет место дифракция в +1-й порядок, то вследствие эффекта Доплера частота дифрагированного света выше частоты падающего. Если же изменить направление распространения света на противоположное (при неизменном направлении распространения ультразвука), то будет происходить дифракция в -1-й порядок. При этом

частота дифрагированного света оказывается ниже частоты падающего. Из векторных диаграмм следует, что несовпадение частот дифрагированного света в указанных двух случаях приводит к несовпадению акустических частот, соответствующих условию брэгговского синхронизма. Этот вопрос и исследуется подробно в данной главе. Очевидно, что невзаимный эффект можно также получить, изменяя направление распространения ультразвука при неизменном направлении распространения света.

В настоящей работе показано, что необходимым и достаточным условием проявления невзаимного эффекта является именно изменение на противоположную взаимной ориентации волновых векторов падающего света и ультразвука, а не смена знака дифракционного порядка (он может быть изменён также поворотом плоскости поляризации падающего света). Получено аналитическое выражение для разности частот ультразвука, показывающее зависимость величины «невзаимного сдвига» от оптических и акустических характеристик материала. Поскольку акустооптическое взаимодействие существует не на строго определённой частоте, а в некоторой полосе частот, то значение имеет не сдвиг резонансной частоты ультразвука сам по себе, а его отношение к полосе частот взаимодействия, показывающее, насколько смещается эта полоса:

$$\frac{\delta F}{\Delta F} = \frac{2,5n_d \Delta n V L}{\lambda_i c} \left(1 - \frac{\lambda_i}{n_d} \frac{dn_d}{d\lambda} \right) \quad (1)$$

Здесь δF – разность частот ультразвука, соответствующих условию синхронизма (при неизменной длине волны падающего света λ_i), ΔF – полоса частот коллинеарного взаимодействия (полоса пропускания коллинеарного фильтра по ультразвуку), n_d и Δn – показатель преломления среды для дифрагированного света и её двулучепреломление, V и c – скорости звука и света соответственно, L – длина взаимодействия. Величина $dn_d/d\lambda$ характеризует дисперсию показателя преломления. Так как в случае нормальной дисперсии $dn/d\lambda < 0$, в таких средах (к которым относятся и акустооптические кристаллы) дисперсия показателя преломления усиливает невзаимный эффект. Из (1) также видно, что эффект проявляется сильнее на более коротких длинах волн света. Проведены расчёты невзаимного эффекта для различных материалов, из которых следует, что на частотах ультразвука выше 1 ГГц отношение $\delta F/\Delta F$ становится порядка единицы.

Экспериментальное исследование, результаты которого также содержатся в четвёртой главе, подтвердило существование невзаимного эффекта. В качестве материала использовался ниобат лития LiNbO_3 . Эксперимент проводился на красном свете ($\lambda = 632,8$ нм), которому соответствует акустическая частота коллинеарной дифракции

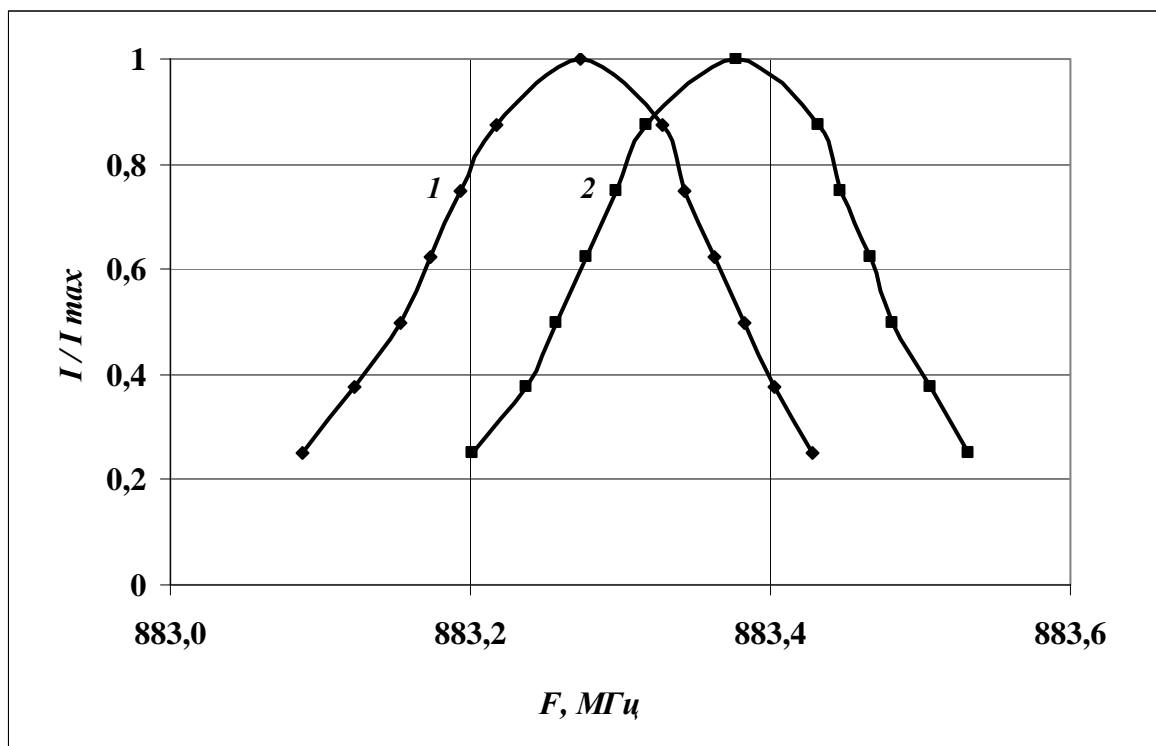


Рис. 3. Зависимости интенсивности дифрагированного света от частоты ультразвука для противоположно направленных световых пучков

$F \approx 883$ МГц (продольная мода, $V = 6,6$ км/с). Эффективность дифракции достигала 7 % при мощности ультразвука $P \approx 500$ мВт и длине кристалла $L = 4,1$ см, что представляет собой характерные значения для этого материала. На рис. 3 приведены зависимости интенсивности дифрагированного света от частоты ультразвука для двух направлений распространения света. На графике чётко видно несовпадение указанных кривых. Значение невязимного сдвига оказалось равным $\delta F \approx (104 \pm 10)$ кГц при ширине полосы частот взаимодействия $\Delta F \approx (210 \pm 10)$ кГц. Таким образом, в данном фильтре отношение невязимный сдвиг / полоса частот составляет величину $\delta F/\Delta F \approx 50$ %. Так же как и разрешение, это отношение должно быть одинаковым по звуку и по свету, т. е. $\delta F/\Delta F = \delta \lambda/\Delta \lambda$. Отсюда можно рассчитать разность длин волн падающего света, соответствующих условию синхронизма, при неизменном значении частоты ультразвука. В данном случае оно оказывается равным $\delta \lambda \approx 0,75 \text{ \AA}$. Независимость акустической частоты синхронизма от знака дифракционного порядка также проверена экспериментально.

Таким образом, показано, что невязимный эффект приводит к смещению полосы пропускания коллинеарного акустооптического фильтра. На сверхвысоких акустических частотах это смещение оказывается сравнимым с шириной полосы, поэтому невязимный

эффект должен учитываться при разработке акустооптических устройств, оперирующих такими частотами. Учёт этого фактора становится особенно важным в случае, если в фильтре используется многократное прохождение света через ультразвуковой столб или меняется взаимная ориентация волновых векторов света и ультразвука. Однако даже в отсутствие многократных проходов света через ячейку или каких-либо отражений добавка к акустической частоте брэгговского синхронизма, обусловленная эффектом Доплера, на сверхвысоких частотах может оказаться весьма существенной.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Показано, что оптически анизотропная среда с распространяющейся в ней акустической волной может рассматриваться как слоистая периодическая среда с различной ориентацией соседних слоёв. Полученные в рамках этой модели аналитические выражения для эффективности дифракции и коэффициента акустооптической (АО) связи согласуются с выражениями, полученными ранее другими АО методами. При помощи исчисления Джонса на основе разработанного метода проведены расчёты эффективности дифракции в наиболее распространённых АО материалах.

2. Установлено, что угол поворота осей оптической индикатрисы под действием акустической волны очень мал практически во всех двулучепреломляющих средах (порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ радиан). В то же время, показано, что эффективность дифракции не зависит от величины двулучепреломления материала и, следовательно, от угла поворота осей. Это означает, что в акустооптике одинаково успешно можно применять материалы как с большим, так и с малым двулучепреломлением.

3. Впервые обнаружена и экспериментально исследована коллинеарная дифракция расходящегося света на ультразвуке в направлении [110] парателлурита. Показано, что дифракция в направлении, запрещённом для АО взаимодействия плоских волн, имеет место при использовании расходящегося светового пучка. Установлено, что при длине волны света $\lambda = 0,63$ мкм дифракция происходит в кристалле на частоте ультразвука $f = 149,2$ МГц, а ширина акустического частотного диапазона растёт с увеличением расходимости света и при расходимости $\sim 4^\circ$ в воздухе составляет $\Delta f \approx 50$ кГц, что соответствует оптической полосе пропускания фильтра $\Delta\lambda = 2,1 \text{ \AA}$.

4. Исследован макет АО фильтра на парателлурите, обладающий высоким спектральным разрешением ($R \approx 3000$), большой эффективностью дифракции (80 %) и широкой угловой апертурой (несколько градусов). Кроме того, установлено, что поперечная структура дифрагированного света – крестообразная с тёмным провалом в центре – позволяет осуществлять дифференцирование (оконтуривание) оптических изображений. Таким образом, доказана возможность создания коллинеарного фильтра на

основе кристалла TeO_2 , использующего расходящийся оптический пучок, с возможностями дифференцирования изображений в монохроматическом свете.

5. Исследованы невзаимные свойства АО взаимодействия в режиме коллинейрной дифракции. Получено аналитическое выражение и проведены расчёты различия частот ультразвука, соответствующих условию синхронизма, при распространении света в противоположных направлениях. Невзаимный эффект зарегистрирован экспериментально в АО ячейке на кристалле ниобата лития. Установлено, что относительное смещение полосы пропускания ячейки при изменении направления распространения света на противоположное достигает в исследованном фильтре 50 %, что при ширине полосы пропускания фильтра по свету $\Delta\lambda = 1,5 \text{ \AA}$ составляет величину $\delta\lambda = 0,75 \text{ \AA}$.

6. Показано, что при приближении акустических частот к сверхвысокочастотному диапазону сдвиг частоты ультразвука, обусловленный невзаимным эффектом, становится сравнимым с шириной полосы пропускания коллинейрного фильтра. Эффект также усиливается при переходе на более короткие длины волн света. Это доказывает необходимость учёта невзаимного эффекта при проектировании АО устройств с высоким спектральным разрешением и работающих на сверхвысоких акустических частотах.

Список публикаций по теме диссертации

1. Доброленский Ю.С. Экспериментальное исследование дифракции в запрещённом направлении в кристалле парателлурита. – Тезисы 10-й межд. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных по фундам. наукам “Ломоносов-2003”, секция “Физика”. – М., 2003, стр. 138 – 140.
2. Доброленский Ю.С. Применение дифракции в запрещённом направлении для фильтрации оптических сигналов и обработки изображений. – Тезисы 8-й межд. конф. “Системный анализ и управление”. – Евпатория, 2003, стр. 70.
3. Dobrolenskiy Y.S., Parygin V.N. Experimental Research of Collinear Diffraction Along Direction Forbidden by Crystal Symmetry in Paratellurite. – Abstracts 6th Int. conf. for young researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems”. – St. Petersburg, 2003, pp. 40 – 41.
4. Dobrolenskiy Y.S., Parygin V.N. Experimental Research of Collinear Diffraction Along Direction Forbidden by Crystal Symmetry in Paratellurite. – Proc. 6th Int. conf. for young researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems”. – St. Petersburg, 2003, pp. A2-29 – A2-32.

5. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B., Parygin V.N. Collinear Acousto-Optic Interaction of Divergent Beams in Crystal of Paratellurite. – Archives of Acoustics (quarterly), 2004, v. 29, № 3, p. 505.
6. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B., Parygin V.N. Collinear Acousto-optic Interaction of Divergent Beams in Paratellurite Crystal. – Proc. SPIE, 2005, v. 5828, pp. 16 – 24.
7. Доброленский Ю.С., Волошинов В.Б., Парыгин В.Н. Коллинеарная дифракция расходящегося светового пучка на ультразвуке в кристалле парателлурита. – Опт. и спектр., 2005, т. 98, № 4, стр. 673 – 678.
8. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B., Parygin V.N. Collinear Acousto-Optic Filter on the Base of Paratellurite Crystal. – Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2005). – Yalta, 2005, pp. 208 – 211.
9. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B. Efficiency of Collinear Acousto-Optic Interaction in Anisotropic Media. – Abstracts Int. Congress on Optics and Optoelectronics (COO-2005). – Warsaw, 2005, p. 116.
10. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B. Efficiency of Collinear Acousto-Optic Interaction in Anisotropic Media. – Proc. SPIE, 2005, v. 5953, pp. 59530B-1 – 59530B-9.
11. Dobrolenskiy Y.S. Non-Reciprocal Effects of Acousto-Optic Interaction in Birefringent Media. – Abstracts 35th Winter School on Wave and Quantum Acoustics. – Ustron, Poland, 2006, p. 30.
12. Dobrolenskiy Y.S. Non-Reciprocal Effects of Acousto-Optic Interaction in Birefringent Media. – Archives of Acoustics (quarterly), 2006, v. 31, № 1, p. 124.
13. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B. Non-Reciprocal Effects of Acousto-Optic Interaction in Optically Anisotropic Media. – Abstracts 9th Int. conf. for young researchers “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine”. – St. Petersburg, 2006, p. 22.
14. Dobrolenskiy Y.S. Non-Reciprocal Effects of Acousto-Optic Interaction in Various Materials. – Scientific works 7th Int. young scientists conf. “Optics and High Technology Material Science (SPO 2006)”. – Kiev, 2006, p. 114.
15. Dobrolenskiy Y.S., Voloshinov V.B., Zyuryukin Y.A., Yulaev A.N. Non-Reciprocity of Acousto-Optic Interaction: Investigation of Collinear Diffraction. – Abstracts 10th Int. conf. for young researchers “Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems”. – St. Petersburg, 2007, p. 20.
16. Доброленский Ю.С., Волошинов В.Б. Эффективность коллинеарного акустооптического взаимодействия в анизотропной среде. – Вестн. Моск. ун-та, сер. 3, Физ., астр., 2007, № 3, стр. 30 – 34.

17. Доброленский Ю.С., Волошинов В.Б., Зюрюкин Ю.А. Влияние невязимного эффекта на работу коллинеарного акустооптического фильтра. – Квант. электр., 2008, т. 38, № 1, стр. 46 – 50.