

На правах рукописи

Мачихин Александр Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ПРИ ДИФРАКЦИИ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ  
В КРИСТАЛЛАХ

Специальность: 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в учреждении РАН «Научно-технологический центр уникального приборостроения».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией НТЦ УП РАН  
В.Э. Пожар

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
г.н.с. ИБХФ им. Н.М.Эммануэля РАН  
Л.А Чернозатонский

доктор технических наук,  
заведующий лабораторией ФГУП «ВНИИФТРИ»  
М.М. Мазур

Ведущая организация: Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

Защита состоится 24 ноября 2010 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.135.01 в учреждении РАН «Научно-технологический центр уникального приборостроения» по адресу: 117342, г. Москва, улица Бутлерова, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения РАН «Научно-технологический центр уникального приборостроения».

Автореферат разослан 16 октября 2010 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.135.01



Е.А. Отливанчик

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

В настоящее время приборы для анализа спектральных свойств объектов являются неотъемлемым инструментом при решении биомедицинских, криминалистических, астрофизических и многих других задач. Особенно важная роль при этом отводится спектрометрам для оптической обработки информации, позволяющим производить операции в режиме, близком к режиму реального времени. Для разработки подобных приборов АО фильтры подходят в наибольшей степени, так как их отличает отсутствие подвижных частей, быстрая произвольная спектральная перестройка, возможность модуляции и синтеза передаточной функции. Способность осуществлять фильтрацию пучков, переносящих изображения – одно из ключевых свойств АО фильтров, поскольку позволяет использовать их также для задач одновременного анализа пространственных, спектральных и поляризационных свойств объекта.

Эти уникальные особенности АО фильтров позволяют возложить на АО спектрометры изображений часть функций обработки информации, которые в спектрометрах, работающих на других физических принципах, обычно выполняют либо специализированными аппаратными средствами либо методами цифровой постобработки. К настоящему времени разработаны и реально эксплуатируются АО спектрометры, позволяющие в реальном времени управлять интенсивностью, поляризацией, спектральным составом, направлением и пространственной структурой светового пучка. В сравнении с другими оптическими управляемыми фильтрами АО фильтр обеспечивает перестройку в более широком спектральном диапазоне с весьма высоким для таких компактных устройств разрешением (до 0,1 нм). Несмотря на нелокальный характер дифракции, обусловленный тем, что дифракция происходит на объемной решетке, АО фильтры обеспечивают неплохое разрешение (до 1000 разрешимых положений по каждой из координат).

Тем не менее, пространственно-спектральные искажения изображения, величина которых может достигать нескольких процентов, не позволяют использовать АО спектрометры в тех задачах, где необходима высокая качество передачи изображения, например, для прецизионной фотосъемки и некоторых других задачах дистанционного зондирования, в криминалистике, при неразрушающем контроле материалов. К тому же существенная спектральная зависимость пространственных искажений делает затруднительным групповую обработку спектральных изображений, определение спектральных характеристик и зависимостей в отдельных точках поля зрения.

Трансформация изображения при АО взаимодействии сводится к пространственным деформациям, описывающим относительное смещение каждой точки изображения, связанное с отклонением соответствующей ей плоской световой волны при дифракции, и амплитудному преобразованию, описываемому коэффициентом передачи по интенсивности, который определяется эффективностью дифракции соответствующей волны. До сих пор расчет характеристик дифракции света на звуковой волне проводят либо численно для каждой отдельной конфигурации АО фильтра либо используют ряд приближений, существенно облегчающих анализ и заведомо ограничивающих точность получаемых оценок. Поэтому исследование пространственно-спектральных и амплитудных искажений изображений при дифракции световых пучков на акустических волнах в кристаллах с целью нахождения закона трансформации изображения и функции передачи для произвольных направлений распространения света и звука является актуальной задачей. Решение данной задачи позволит на этапе проектирования АО фильтра осуществлять расчет и анализ его характеристик с большей точностью и учитывать при этом значительно большее количество факторов.

Разработка методов коррекции искажений, вносимых в изображение АО фильтрами, является непременным условием расширения областей применения данных устройств и улучшения их характеристик. При этом актуальной является разработка как методов цифровой коррекции уже зарегистрированных спектральных изображений, так и аппаратных средств компенсации аберраций АО фильтров. Первые могут стать эффективным и универсальным инструментом повышения информативности изготовленных и реально используемых АО спектрометров. Вторые позволят в режиме реального времени регистрировать скорректированные спектральные изображения и осуществлять их совместную обработку.

В настоящее время на практике для передачи изображений наиболее часто используется широкоугольная геометрия АО взаимодействия, обеспечивающая высокую эффективность дифракции в широком диапазоне углов падения света. Данная геометрия находит широкое применение при решении задач, связанных с необходимостью получения АО фильтров большой угловой апертуры. Кроме того, значительная величина отклонения света при дифракции позволяет пространственно разделять нулевой и первый порядок.

Несмотря на то, что широкоугольные перестраиваемые АО фильтры нашли многочисленные применения, лишь малое число работ посвящено анализу в общем виде их спектрально-угловых характеристик и основных параметров: спектрального разрешения и угловой апертуры по двум координатам. При этом используются облегчающие анализ приближение малого двулучепреломления и оценка характеристик дифракции лишь в

полярной плоскости, обладающей симметрией, и перпендикулярной к ней азимутальной плоскости. То, что таких приближений недостаточно, ясно хотя бы из того, что в общем случае дифракции брэгговский треугольник волновых векторов не принадлежит ни одной из этих плоскостей. Поэтому для совершенствования методов разработки и соответственно расширения областей применения широкоугольных АО фильтров важным и актуальным является задача исследования в общем виде характеристик широкоугольного АО взаимодействия.

## **Цели диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является исследование трансформации изображения при брэгговской дифракции световых пучков на акустических волнах в одноосных кристаллах. При этом были поставлены и решались следующие задачи:

1. Исследование пространственно-спектральных искажений изображения, переносимого световым пучком, возникающих при дифракции последнего на акустической волне в кристалле.
2. Разработка методов аппаратной и цифровой компенсации пространственно-спектральных искажений в АО спектрометрах изображений.
3. Изучение влияния параметров широкоугольного АО фильтра на качество передаваемого изображения.
4. Исследование формы функции передачи при дифракции неколлимированных пучков света на ультразвуке для произвольных направлений распространения света и звука.

## **Научная новизна и практическая значимость**

1. Развита теория дифракции неколлимированных световых пучков на акустической волне в одноосном кристалле. Получено общее аналитическое решение, описывающее зависимость углов дифракции и величины волновой расстройки от углов распространения и длины волны падающего света, параметров кристалла и ультразвуковой волны. Оно позволяет на этапе проектирования АО фильтров осуществлять расчет и анализ их характеристик с большей точностью и учитывать при этом значительно большее количество факторов.
2. Исследован характер пространственно-спектральных искажений изображения, переносимого световым пучком, возникающих при дифракции последнего на акустической волне в кристалле. Рассмотрены методы коррекции данных искажений

на основе цифровой постобработки и синтеза специализированных оптических компонентов-корректоров. Исследованы коррекционные возможности АО фильтра с фильтрацией изображения в двух последовательно расположенных АО ячейках. Полученные результаты позволяют существенно расширить область применения АО фильтров в задачах, требующих высокого качества передачи изображения.

3. Получены аналитические выражения для угла распространения звука как функции угла падения света при широкоугольном АО взаимодействии, а также формулы для углов света и звука, при которых наблюдается экстремальная геометрия широкоугольной дифракции. Данные выражения позволяют при заданных материале фильтра и длине волны падающего излучения определить угловые параметры широкоугольной дифракции.
4. Проведен подробный анализ формы функции передачи при дифракции неколлимированных пучков света на ультразвуке в АО фильтре широкоугольной конфигурации. Установлены все виды функции передачи в зависимости от направления распространения «е»- и «о»-поляризованного света. Это позволяет оптимальным образом выбирать направление распространения света и звука в кристалле с целью обеспечения требуемых параметров АО фильтра.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Полученные точные формулы, связывающие направление дифракции светового пучка на ультразвуковой волне с направлением падения света и ориентацией ультразвука, позволяют вычислять пространственно-угловые искажения оптических изображений при дифракции.
2. Найденная точная зависимость ориентации ультразвуковой волны от направления падения света, при которой имеет место широкоугольная дифракция, и найденные точные формулы, описывающая ориентацию волн в геометрии, обеспечивающей максимальную угловую ширину синхронизма в полярной плоскости, позволяют вычислять соответствующие угловые параметры АО фильтров при произвольной величине двулучепреломления.
3. При последовательной дифракции света в двух идентичных АО ячейках, вторая из которых развернута на  $180^\circ$  относительно первой в плоскости, проходящей через

оптическую ось, пространственно-спектральные искажения изображения, вызываемые каждой из АО ячеек, компенсируются полностью.

4. В широкоугольных АО фильтрах форма сечения функции передачи яркости изображения существенным образом зависит от ориентации светового пучка, причем при изменении угла падения света трансформация формы имеет принципиально разный характер для дифракции обыкновенно и необыкновенно поляризованного света.

### **Апробация работы**

Результаты проведенных исследований были представлены на следующих конференциях:

- ✓ V Всероссийская межвузовская конференция молодых учёных (Санкт-Петербург, 2008);
- ✓ Всероссийская конференция «Реконструкция обстоятельств дорожно-транспортного происшествия при проведении судебных экспертиз. Правовые и методические вопросы судебной экспертизы» (Уфа, 2008);
- ✓ VI Российская научно-техническая конференция «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли» (Туапсе, 2008);
- ✓ XIX международная конференция «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, 2008);
- ✓ 11-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2009)» (Москва, 2009);
- ✓ III Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2009);
- ✓ 10-я международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2009);
- ✓ 3-я международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (Суздаль, 2009);
- ✓ 6-я международная конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009» (Санкт-Петербург, 2009);
- ✓ XXIV Съезд по спектроскопии (Москва, 2010);
- ✓ 12-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2010);

- ✓ IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2010);
- ✓ X International Conference for Young Researchers WECONF-2010 (Saint-Petersburg, 2010);
- ✓ VI международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2010);
- ✓ IX международная конференция «Прикладная оптика» (Санкт-Петербург, 2010),

а также докладывались и обсуждались на научных семинарах НТЦ УП РАН и лаборатории акустооптики кафедры физики колебаний физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

По материалам диссертации опубликовано 20 работ, включая тезисы докладов и статьи в научных журналах и трудах конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем работы составляет 114 страниц. Диссертация содержит 46 рисунков, 6 таблиц. Библиография содержит 119 наименований, включая 20 авторских публикаций.

### **Содержание работы**

Во введении содержится краткий исторический обзор, обоснование актуальности темы исследования, приводится краткое содержание работы, отмечается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ общих принципов построения и преимуществ применения спектрометров изображений на основе перестраиваемых АО фильтров. Глава содержит необходимые для последующего изложения сведения из теории акустооптического взаимодействия в одноосных анизотропных кристаллах.

Показано, что с появлением перестраиваемых спектральных АО фильтров изображений открывается возможность создания новых спектрально адаптивных систем, обладающих уникальными характеристиками. Показано, что фактором, ограничивающим применение АО спектрометров при решении ряда задач, является недостаточное качество передачи ими изображений, а именно вносимые АО ячейками пространственные и амплитудные искажения. Рассмотрен метод их количественной оценки на основе

вычисления коэффициентов разложения в ряд Тейлора зависимостей углов распространения дифрагированного света от углов распространения падающего света и анализа функции передачи соответственно.

Рассмотрена задача анизотропной брэгговской дифракции в приближении плоских световых волн. Показано, что для анализа в общем виде пространственных и амплитудных искажений, вносимых в изображение АО фильтром, необходимо получить общее аналитическое решение, описывающее зависимость углов  $\psi_i$  ( $i = 1,2$ ) распространения дифрагированного света и величины волновой расстройки  $\Delta k$  от углов падения  $\theta_i$  и длины волны  $\lambda$  падающего света, ориентации  $\gamma_i$  и длины  $\Lambda$  звуковой волны, показателей преломления кристалла для обыкновенной  $n_o$  и необыкновенной  $n_e$  волн.

В качестве возможных методов коррекции пространственно-спектральных искажений рассмотрены два подхода: метод цифровой коррекции на основе предварительной калибровки АО спектрометра и метод аппаратной коррекции на основе синтеза специализированных корректирующих оптических элементов. Сформулированы общие требования к таким элементам. Описаны алгоритмы реализации каждого подхода.

Во второй главе исследуется задача передачи изображения, переносимого световым пучком, при дифракции последнего на акустической волне в одноосном кристалле.

Проанализирован вопрос выбора ориентации вектора волновой расстройки  $\vec{\Delta k}$  при дифракции расходящегося светового пучка. С учетом того, что в общем случае область взаимодействия имеет примерно одинаковые размеры во всех направлениях и однозначно не предопределяет направление вектора волновой расстройки  $\vec{\Delta k}$ , предложено полагать этот вектор направленным по кратчайшему расстоянию (нормали) к поверхности волновых векторов обыкновенной поляризации.

На основе анализа диаграмм волновых векторов в полярной и азимутальной плоскостях получено точное аналитическое выражение для величины волновой расстройки при АО дифракции

$$\Delta k = kn_o \left( \sqrt{(\xi(\theta_1) - \eta)^2 + 2\eta\xi(\theta_1)(1-A)} - 1 \right), \quad (1)$$

и углов распространения дифрагированного света

$$\psi_1 = \arctg \left( \frac{\xi(\theta_1) \sin \theta_1 - \eta \sin \gamma_1}{\sqrt{(\xi(\theta_1) \cos \theta_1 - \eta \cos \gamma_1)^2 + 2\eta\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \cos \gamma_1 (1 - \cos(\theta_2 - \gamma_2))}} \right), \quad (2.1)$$

$$\psi_2 = \arctg \left( \frac{\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \eta \cos \gamma_1 \sin \gamma_2}{\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \eta \cos \gamma_1 \cos \gamma_2} \right), \quad (2.2)$$

где  $\xi(\theta_1) = n_e / \sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_1 + n_e^2 \sin^2 \theta_1}$  - параметр двулучепреломления кристалла;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\eta = \lambda/(\Lambda n_o)$ ;  $A = \cos(\theta_1 - \gamma_1) - \cos \theta_1 \cos \gamma_1 (1 - \cos(\theta_2 - \gamma_2))$  - эффективный параметр геометрии АО ячейки. Данные выражения справедливы в случае дифракции «е»-поляризованного света. В случае дифракции «о»-поляризованного света справедливы формулы

$$\Delta k = kn_0 \left( -\eta A - \sqrt{\eta^2 (A^2 - 1) + \xi^2(\theta_1) + 1} \right), \quad (3)$$

$$\psi_1 = \arcsin \left( \left( \left( 1 - \frac{\Delta k}{kn_0} \right) \sin \theta_1 - \eta \sin \gamma_1 \right) / \xi(\theta_1) \right), \quad (4.1)$$

$$\psi_2 = \arctg \left( \frac{\left( 1 - \frac{\Delta k}{kn_0} \right) \sin \theta_1 \sin \theta_2 + \eta \cos \gamma_1 \sin \gamma_2}{\left( 1 - \frac{\Delta k}{kn_0} \right) \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \eta \cos \gamma_1 \cos \gamma_2} \right), \quad (4.2)$$

полученные в приближении  $(\xi_0^2 - 1) \sin(\psi_1 - \theta_1) \ll 1$  ( $\xi_0 = \xi(0) = n_e/n_o$ ), с высокой точностью выполняющемся для всех известных АО ячеек, используемых для передачи изображений.

Выражения (2-4) позволяют по заданным значениям углов распространения звука  $\gamma_i$  и света  $\theta_i$  для любой длины волны звука  $\Lambda$  и для каждой длины волны света  $\lambda$  определить направление распространения  $\psi_i$  световой волны после дифракции и величину волновой расстройки  $\Delta k$  для этого конкретного процесса.

На основе выражений (2) и (4) реализован алгоритм расчета и моделирования геометрических искажений изображения (рис. 1), передаваемого АО фильтром.

Установлено, что в ходе дифракции имеют место следующие эффекты: сдвиг, изменение масштаба и нелинейные искажения изображения. Причем все эти эффекты носят спектрально зависимый характер, и величина искажений может достигать 10% в диапазоне от 0,4 до 4 мкм (для широкоугольной АО ячейки из  $\text{TeO}_2$ ). Установлено, что в случае дифракции «е»- и «о»-поляризованного света коэффициенты искажений близки по модулю, однако имеют противоположный знак. Это дает предпосылки для разработки методов компенсации искажений, вносимых АО фильтром, за счет использования в его конструкции двух определенным образом расположенных АО ячеек.

На основе соотношений (1) и (3) в линейном приближении (при невысоком коэффициенте передачи) получено выражение для функции передачи АО фильтра, описывающей неравномерность яркости входного изображения. Эта функция позволяет определить форму и размеры области углового  $\delta\theta_1 \times \delta\theta_2$  и спектрального  $\delta\lambda$  синхронизма, что дает возможность оптимально выбрать пространственное  $N_i = A_i \delta\theta_i / (1,22 \lambda)$  ( $A_i$  - входная апертура) и спектральное  $R = \lambda/\delta\lambda$  разрешение АО фильтра.

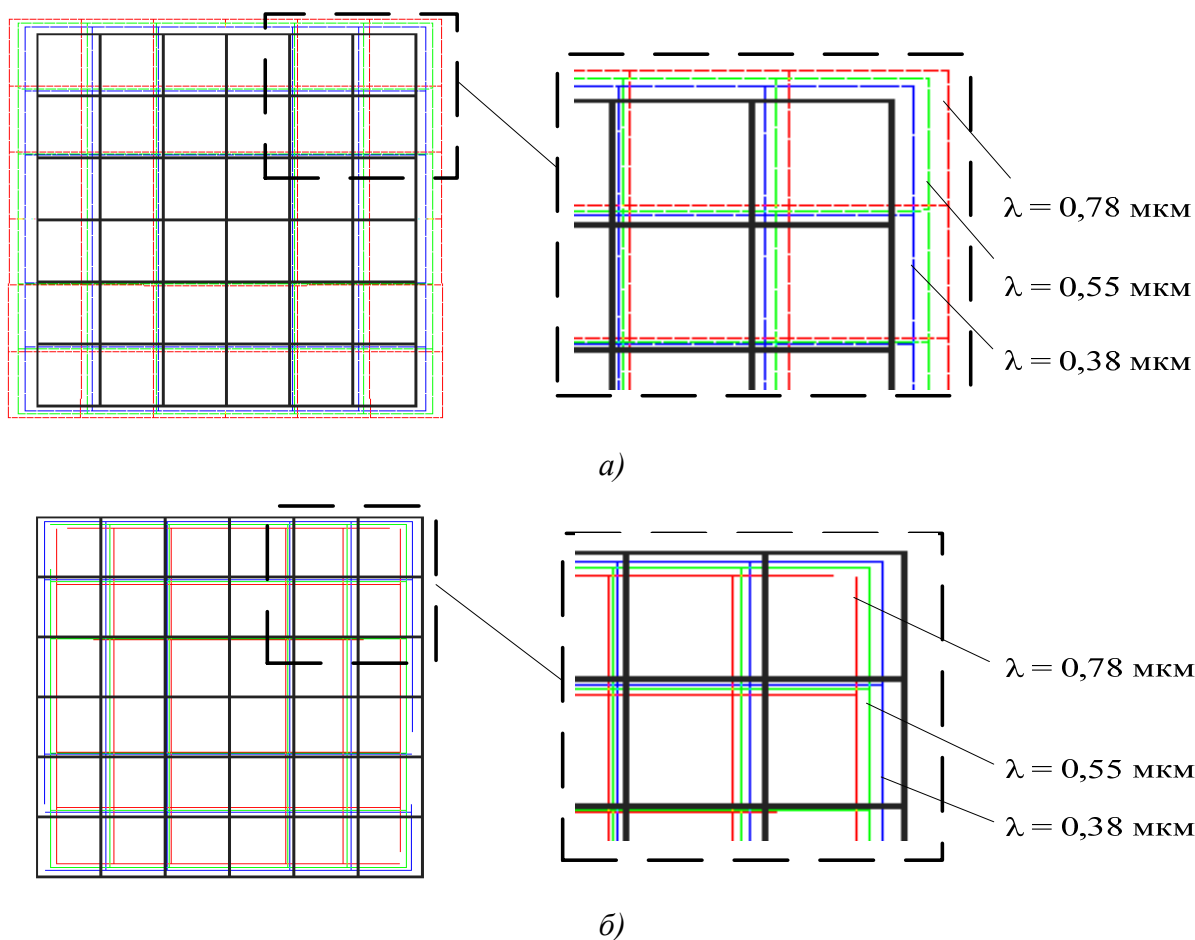


Рис. 1. Объект (черный) и его рассчитанные спектральные изображения при АО дифракции «e»-поляризованного (а) и «o»-поляризованного (б) света в экстремальном неколлинеарном фильтре из  $\text{TeO}_2$  ( $\theta_1 = 32,6^\circ$ ;  $\gamma_1 = -18,9^\circ$ ; угловой размер изображения  $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = 1,5^\circ$ )

Для случая дифракции «e»-поляризованного излучения получены точные выражения для угловой апертуры и спектрального разрешения произвольного АО фильтра. На примере двух типов широкоугольных АО фильтров, используемых на практике: коллинеарного осевого ( $\text{SiO}_2$ ,  $\lambda = 0,633$  мкм,  $L = 18$  см) и широкоугольного ( $\text{TeO}_2$ ,  $\lambda = 0,633$  мкм,  $L = 1$  см,  $\theta_1 = 73,6^\circ$ ,  $\gamma_1 = -7,1^\circ$ ,  $\theta_2 = \gamma_2 = 0$ ) показано, что рассчитанные по полученным формулам значения хорошо согласуются с экспериментальными данными (табл. 1).

Исследована возможность коррекции искажений одиночного АО фильтра посредством применения двух определенным образом расположенных ячеек. Показано, что при последовательной дифракции света в двух идентичных АО ячейках, вторая из которых развернута на  $180^\circ$ , относительно первой в плоскости, проходящей через оптическую ось, пространственно-спектральные искажения изображения, вызываемые, каждой из АО ячеек, компенсируются полностью.

Табл. 1. Вычисленные и экспериментально определенные параметры АО фильтров

| Параметры                              | Тип АО фильтра               |                          |                               |                                |
|--|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|  | коллинеарный осевой          |                          | неколлинеарный широкоугольный |                                |
|  | расчет                       | эксперимент              | расчет                        | эксперимент                    |
| $\delta\theta_1 \times \delta\theta_2$ | $2,2^\circ \times 2,2^\circ$ | $2^\circ \times 2^\circ$ | $1,7^\circ \times 6^\circ$    | $1,7^\circ \times 1,7^\circ$ * |
| $N_1 \times N_2$                       | $298 \times 298$             | $270 \times 270$         | $230 \times 810$              | $250 \times 320$ *             |
| $\delta\lambda$ , нм                   | 0,2                          | 0,2                      | 4,0                           | 3,5                            |
| R                                      | 2900                         | 3100                     | 158                           | 180                            |

\* В эксперименте использовалась полевая диафрагма с круглым отверстием, которая ограничивала угловую апертуру АО фильтра в азимутальной плоскости.

В третьей главе проводится точный расчет параметров широкоугольного АО фильтра и исследование их влияния на качество передаваемого изображения.

Из условия обеспечения широкоугольности (параллельности касательных к поверхностям волновых векторов) впервые без приближения малости двулучепреломления  $\Delta n \ll n_0$  получены аналитические выражения для угла распространения звука  $\gamma_{1w}$  как функции угла падения света  $\theta_{1w}$  для случая широкоугольной дифракции «е»-поляризованного света

$$\gamma_{1w} = -\arctg \left( \frac{\xi_0 \operatorname{tg} \theta_{1w}}{\sqrt{(\xi_0^4 \operatorname{tg}^2 \theta_{1w} + 1)(\xi_0^2 \operatorname{tg}^2 \theta_{1w} + 1)} + \xi_0^3 \operatorname{tg}^2 \theta_{1w}} \right) \quad (5.1)$$

и случая дифракции «о»-поляризованного света

$$\gamma_{1w} = -\arctg \left( \frac{\operatorname{tg} \theta_{1w}}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \theta_{1w} + 1)(\operatorname{tg}^2 \theta_{1w} + \xi_0^2)} + \operatorname{tg}^2 \theta_{1w}} \right). \quad (5.2)$$

Связь (5.1) и (5.2) углов ориентации света  $\theta_{1w}$  и звука  $\gamma_{1w}$  при широкоугольной дифракции имеет вид немонотонной кривой, представленной на рис. 2. Видно, что для материалов со значительным двулучепреломлением (например,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$   $\xi_0 = 1,34$ ) приближение  $\Delta n \ll n_0$  дает большие отклонения от точной зависимости.

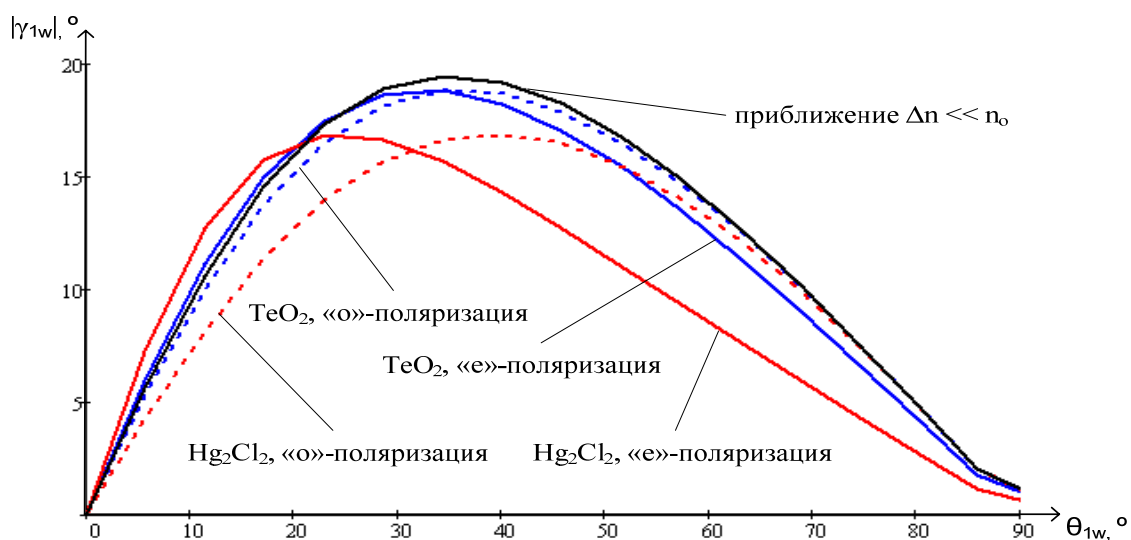


Рис. 2. Связь углов распространения звука  $\gamma_{1w}$  и света  $\theta_{1w}$  при широкоугольной дифракции для двух материалов:  $\text{TeO}_2$  ( $\xi_0 = 1,07$ ,  $\lambda = 0,6$  мкм);  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  ( $\xi_0 = 1,34$ ,  $\lambda = 2$  мкм)

Далее, используя полученные формулы, выведены точные аналитические выражения для углов падения света  $\theta_{\text{ext}}$  и звука  $\gamma_{\text{ext}}$ , при которых наблюдается экстремальная геометрия широкоугольной дифракции, обеспечивающая максимальную угловую ширину синхронизма в полярной плоскости

$$\theta_{\text{ext}} = \text{arctg}\left(\zeta^4 \sqrt{\zeta^2 + 1}\right), \quad (6.1)$$

$$\gamma_{\text{ext}} = -\text{arctg}\left((\zeta^2 + 1)^{3/2}\right), \quad (6.2)$$

где  $\zeta = \sqrt[3]{\xi_0}$ .

Из (6) видно, что углы  $\theta_{\text{ext}}$  и  $\gamma_{\text{ext}}$  зависят лишь от параметра двулучепреломления  $\xi_0$  и соответственно от длины волны  $\lambda$  падающего света. Для основных кристаллов (кальцита  $\text{CaCO}_3$ , KDP  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , каломели  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , парателлурита  $\text{TeO}_2$ ), используемых для изготовления широкоугольных АО фильтров, вычислены значения этих углов. Показано, что данные значения совпадают с полученными экспериментально результатами.

Построены и проанализированы точные зависимости угловой апертуры  $\delta\theta_1 \times \delta\theta_2$  и спектрального разрешения  $R = \lambda/\delta\lambda$  широкоугольного АО фильтра от угла  $\theta_{1w}$  распространения света во всем диапазоне (от  $90^\circ$  до  $0^\circ$  по отношению к оптической оси) изменения этого угла. Установлено, что апертуры широкоугольного АО фильтра в полярной  $\delta\theta_1$  и азимутальной  $\delta\theta_2$  плоскостях существенно по-разному зависят от  $\theta_{1w}$ . В азимутальной плоскости угловая апертура с ростом  $\theta_{1w}$  монотонно растет, а в полярной плоскости при  $\theta_{1w} = \theta_{\text{ext}}$  угловая апертура имеет максимум.

Впервые исследованы пространственно-спектральные искажения изображения, вызываемые действием широкоугольного АО фильтра. Вычислены зависимости

коэффициентов линейных и нелинейных искажений от угла падения света  $\theta_{1w}$ . Для нескольких АО фильтров широкоугольной конфигурации выполнен точный расчет искажений модельного объекта в виде сетки.

Исследован вид функции передачи  $T(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  широкоугольного АО фильтра во всем диапазоне углов падения света  $\theta_{1w}$  (в приближении малой мощности звука). Показано, что при дифракции необыкновенно поляризованного света по мере изменения угла падения света (от  $90^\circ$  до  $0^\circ$  по отношению к оптической оси) форма сечения функции передачи принимает последовательно следующий вид: 1) крестообразная область; 2) вытянутая в направлении оптической оси область; 3) овал; 4) вытянутая в направлении, перпендикулярном оптической оси, овальная область; 5) прямоугольная вытянутая в направлении, перпендикулярном оптической оси, неограниченная область (рис. 3).

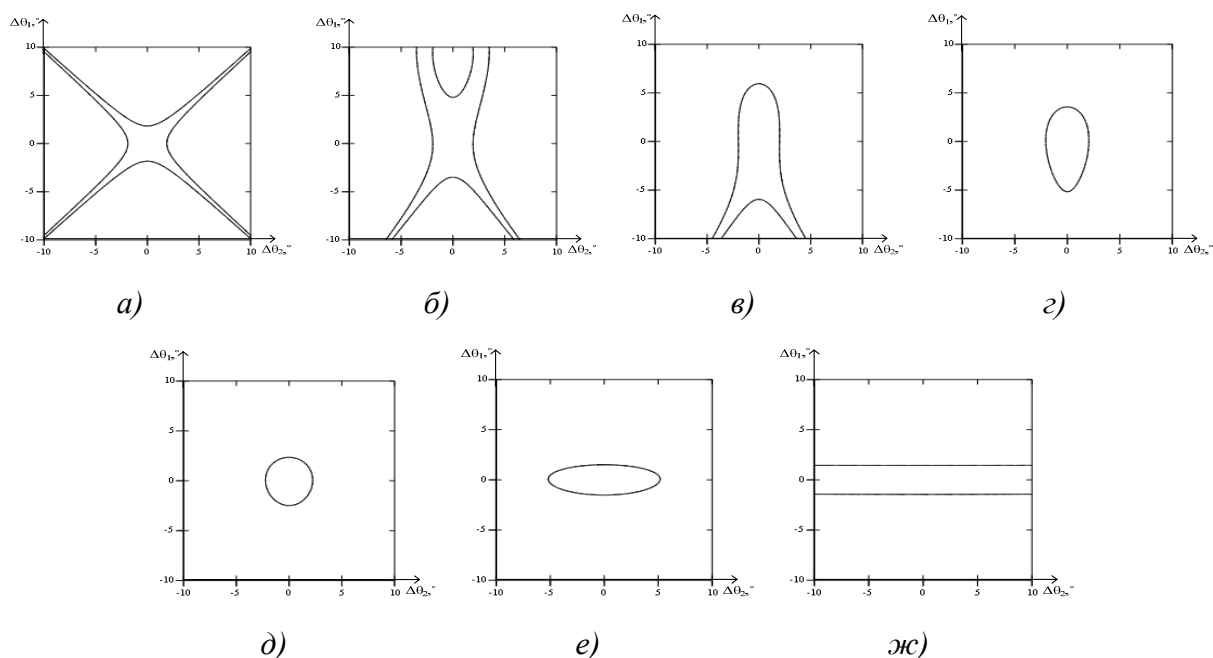


Рис. 3. Сечение по уровню 0,5 нормированной функции передачи  $T(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  широкоугольного АО фильтра ( $\text{TeO}_2$ ,  $\lambda = 0,6$  мкм,  $L = 1$  см) при дифракции «e»-поляризованного света  
 а)  $\gamma_{1w} = 0^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 0^\circ$ ; б)  $\gamma_{1w} = -18,6^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 28^\circ$ ; в)  $\gamma_{1w} = -18,9^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 32,6^\circ$ ; г)  $\gamma_{1w} = -18,7^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 37^\circ$ ; д)  $\gamma_{1w} = -17,3^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 45^\circ$ ; е)  $\gamma_{1w} = -7,1^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 73,6^\circ$ ; ж)  $\gamma_{1w} = -0,4^\circ$ ,  $\theta_{1w} = 89^\circ$

При дифракции обыкновенно поляризованного света форма сечения функции передачи принимает последовательно следующий вид: 1) крестообразная область; 2) дугообразная полоса, вытянутая в направлении, перпендикулярном оптической оси; 3) две дугообразных полосы, вытянутые в направлении, перпендикулярном оптической оси; 4) вытянутый в направлении, перпендикулярном оптической оси, овал; 5) прямоугольная вытянутая в направлении, перпендикулярном оптической оси, неограниченная область.

Описана разработанная на основе полученных в главах 2 и 3 формул и реализованная в среде MATLAB программа, позволяющая по заданным параметрам АО фильтра построить его функцию передачи, вычислить угловую апертуру и спектральное разрешение, а также коэффициенты вносимых фильтром линейных и нелинейных искажений изображения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Получено общее аналитическое решение, описывающее зависимость углов дифракции и величины волновой расстройки от углов падения и длины волны падающего света, параметров кристалла и ультразвуковой волны для случаев дифракции обыкновенно и необыкновенно поляризованного излучения. В отличие от ранее используемых формул данное решение описывает дифракцию в общем случае, а не только в плоскости оптической оси и справедливо для произвольной величины двулучепреломления.
2. Исследованы пространственно-спектральные искажения изображения, вызванные действием АО фильтра. Вычислены зависимости коэффициентов линейных и нелинейных искажений от угла падения света в случае широкоугольной дифракции.
3. Изучены методы аппаратной и цифровой коррекции пространственно-спектральных искажений изображения, вызываемых АО фильтром. В частности, для метода коррекции с использованием двух идентичных АО ячеек, вторая из которых развернута на  $180^\circ$  относительно первой в плоскости, проходящей через оптическую ось, показано, что пространственно-спектральные искажения изображения, вызываемые каждой из АО ячеек, компенсируются полностью.
4. Получены точные (без приближения малого двулучепреломления) аналитические выражения для угла распространения звука как функции угла падения света в случае широкоугольной дифракции света, а также для углов распространения света и звука, при которых наблюдается экстремальная геометрия широкоугольной дифракции.
5. На основе полученных точных формул вычислена функция передачи АО фильтра, позволяющая определить форму и размеры области углового синхронизма. В частности, для широкоугольной геометрии выявлены все возможные типы формы функции передачи.
6. Разработана и реализована программа, позволяющая по заданным параметрам АО фильтра построить его функцию передачи, вычислить угловую апертуру, пространственное и спектральное разрешение, а также коэффициенты вносимых фильтром линейных и нелинейных искажений изображения.

## Список публикаций по теме диссертации

1. Мачихин А.С. Анализ возможности применения акустооптических фильтров в задаче реконструкции трехмерной структуры микрообъектов в произвольных спектральных интервалах. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. №49. С. 74-78.
2. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Анализ возможности применения акустооптических видеоспектрометров в задачах судебной экспертизы. // Доклады и сообщения всероссийской конференции «Реконструкция обстоятельств дорожно-транспортного происшествия при проведении судебных экспертиз. Правовые и методические вопросы судебной экспертизы». Уфа, 2009. С. 195-201.
3. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Возможности применения акустооптических видеоспектрометров и аппарата R-функций в задаче таксации леса. // Материалы НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли». М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2008. С. 218-220.
4. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Исследование характеристик изображений, полученных акустооптическим фильтром. // Сборник трудов 8-й международной конференции «Прикладная оптика». Спб., 2008. Т. 3. С. 374-376.
5. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Алгоритм построения интегральной картины распределения спектральных особенностей микрообъекта. // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова: Материалы 11-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2009)». М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2009. Т. 2. С. 622-624.
6. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Перчик А.В. Биомедицинский стенд для получения спектральных и флуоресцентных изображений на основе акустооптического фильтра и микроскопа. // Сборник докладов III всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009. С. 193-196.
7. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Перчик А.В. Применение акустооптических фильтров в задаче определения содержания и концентрации частиц с различными физико-химическими свойствами по их спектральным изображениям. // Материалы 10-й МНТК «Оптические методы исследования потоков». М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 298-301.
8. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Метод коррекции спектральных искажений для спектрометра изображений. // Приборы и техника эксперимента, 2009. № 6. С. 92-98.

9. Пожар В.Э., Мачихин А.С. Искажения изображения, возникающие при передаче через двойной акустооптический монохроматор. // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова: Материалы 3-й международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2009. С. 187-190.
10. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Искажения изображения, возникающие при передаче через двойной акустооптический монохроматор. // Электромагнитные волны и электронные системы, 2009. Т. 14. №11. С. 63-68.
11. Мачихин А.С., Пожар В.Э., Глебов П.Г. Разработка оптических систем для компенсации искажений, вносимых акустооптическим фильтром. // Труды 6-й международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009». СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 75-77.
12. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Исследование особенностей передачи изображения через акустооптические фильтры. // Труды XXIV Съезда по спектроскопии. Т. 2. Троицк: «Тровант», 2010. С. 451-452.
13. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Влияние величины двулучепреломления на качество изображения, передаваемого управляемым оптическим фильтром. // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова: Материалы 12-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2010)». М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010. Т. 2. С. 178-180.
14. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Аберрации изображения в акустооптическом перестраиваемом фильтре. // ЖТФ, 2010. Т. 80. № 10. С. 101-108.
15. Пожар В.Э., Мачихин А.С., Перчик А.В. К вопросу о ширине синхронизма при акустооптическом взаимодействии. // Сборник докладов IV всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. Принято к публикации.
16. Пожар В.Э., Перчик А.В., Мачихин А.С. Спектрометрический стенд для флуоресцентной диагностики на основе акустооптических спектрометров. // Сборник докладов IV всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010. Принято к публикации.
17. V.E. Pozhar, A.S. Machihin. Computation of image distortion caused by wide angular acousto-optic interaction. // Proceedings of X International Conference for Young Researchers WECNF-2010. St.Peterburg, 2010. P. .23

18. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Особенности передачи изображений при коллинеарной дифракции света на звуке. // Сборник трудов VI международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики». СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. С. 90-93.
19. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Передача изображений при широкоугольном акустооптическом взаимодействии. // Квантовая электроника, 2010. № 40. С. 837-841.
20. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Влияние направления поляризации света на искажения изображений при акустооптической фильтрации. // Сборник трудов 9-й международной конференции «Прикладная оптика». Спб., 2008. Т. 1. Ч. 1. С. 232-235.

Тираж 100 Заказ \_\_\_\_\_  
отпечатано 14.10.2010 в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5