

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи
УДК 535.241.13:534

Москера Москера Хулио Сесар

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ
НА ОСНОВЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ КРИСТАЛЛОВ

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,
профессор физического факультета МГУ
А.И.Коробов

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ИРЭ РАН
А.В.Герус

Ведущая организация: Российский университет дружбы народов

Защита состоится 20 марта 2008 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.67 в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119991, 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

В настоящее время созданы различные типы акустооптических приборов, позволяющих управлять интенсивностью светового пучка, его направлением распространения, поляризацией, спектральным составом и пространственной структурой. Особенно важная область применения акустооптических устройств — системы оптической обработки информации. Существенная роль в системах оптической обработки информации принадлежит акустооптическим приборам, которые позволяют производить операции в реальном времени. В частности, акустооптические устройства применяются для спектральной и пространственной фильтрации оптических пучков, в том числе несущих изображение. Кроме того, акустооптические устройства используются для анализа сверхвысокочастотных радиосигналов, для визуализации акустических полей, для химического анализа и т.д.

Данная диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию акустооптических фильтров, которые позволяют обрабатывать оптические пучки, несущие изображения. С помощью рассмотренных акустооптических устройств можно осуществлять спектральный и поляризационный анализ изображений. Известно, что спектральные приборы играют исключительно важную роль в современной науке и технике. По сравнению с различными типами «классических» спектрометров, акустооптические фильтры, представляющие собой новый класс спектральных приборов, обладают рядом неоспоримых достоинств. Акустооптические устройства не содержат движущихся частей, а их перестройка осуществляется за счет полностью электронного управления, которое, в частности, может обеспечиваться компьютером. Акустооптические фильтры изображений характеризуются хорошим спектральным разрешением, вплоть до нескольких ангстрем, а также быстрой, в реальном времени, перестройкой по спектральному

диапазону. Спектральные системы на основе акустооптических приборов являются компактными и обладают высокой надежностью.

В основе работы акустооптических фильтров лежит эффект дифракции света на фазовой дифракционной решетке, созданной ультразвуком. Акустооптические явления изучаются уже несколько десятков лет. В 60-х годах XX века произошел всплеск интереса к физике акустооптических явлений, вызванный появлением лазеров. С этого времени начинает интенсивно развиваться прикладная акустооптика – создаются акустооптические приборы, управляющие различными параметрами оптических пучков, прежде всего, лазерных.

В конце 60-х годов XX века начался новый этап развития акустооптики, связанный с изучением акустооптического эффекта в анизотропных средах. В настоящее время интерес исследователей к проблеме акустооптического взаимодействия в кристаллах исключительно велик. Большой интерес к акустооптическому рассеянию в анизотропных средах в значительной мере вызван хорошими перспективами акустооптических приборов на основе кристаллов. Такие приборы обладают существенно более высокими характеристиками по сравнению со своими аналогами, использующими изотропные материалы.

Особенная роль в современной физике акустооптических взаимодействий, а также в акустооптической технике принадлежит двулучепреломляющим кристаллам. Только в оптически анизотропных средах можно наблюдать ряд специфических режимов акустооптического взаимодействия, которые невозможны в жидкостях и стеклах. К одному из таких режимов относится так называемая широкоапертурная дифракция Брэгга, исследованию которой в одноосных кристаллах посвящена основная часть диссертационной работы. Именно широкоапертурная дифракция позволяет осуществлять акустооптическую фильтрацию расходящихся оптических пучков, формирующих изображение.

Следует отметить, что дифракция Брэгга, как правило, характеризуется наличием только одного дифрагированного оптического пучка. В данной

диссертационной работе исследован особый режим брэгговского рассеяния в кристаллах, при котором дифракция осуществляется одновременно в $+1$ и в -1 порядки, причем в разные дифракционные порядки отклоняются различные поляризационные компоненты падающего оптического излучения. Поэтому такой двойной режим дифракции позволяет осуществить анализ оптического излучения по поляризации. В то же время, данный режим акустооптического рассеяния позволяет обрабатывать расходящиеся пучки света, то есть, делает возможным анализ изображений по поляризации. Таким образом, появляется новый метод анализа поляризационных свойств как точечных, так и протяженных объектов.

Как показано в диссертации, акустооптические устройства на основе одноосных кристаллов являются уникальными приборами, которые позволяют одновременно выполнить как спектральный, так и поляризационный анализ изображений. Работа таких спектрально-поляризационных акустооптических систем исследована в данной работе теоретически и экспериментально. Кроме того, продемонстрирован ряд возможных практических применений акустооптических систем анализа изображений. Проведенные исследования показали, что акустооптические фильтры изображений, благодаря своим совершенным характеристикам и простоте использования, могут стать высоко востребованными устройствами в современной науке, технике и производстве.

Цели диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось исследование закономерностей брэгговского широкоапертурного рассеяния оптического излучения на пучке ультразвука в оптически анизотропной одноосной среде, в том числе изучение явления широкоапертурной акустооптической фильтрации излучения оптического диапазона. В работе были поставлены следующие задачи:

1. Определение оптимального угла наклона акустической грани двулучепреломляющего кристалла, обеспечивающего наибольшую угловую апертуру брэгговского акустооптического взаимодействия.

2. Исследование влияния оптических параметров кристаллической среды на характеристики широкоапертурного акустооптического взаимодействия, например, на угловую апертуру акустооптического фильтра, а также на его спектральное разрешение.
3. Экспериментальная реализация акустооптического метода спектрального и поляризационного анализа изображений, а также изучение практических возможностей данного метода.

Научная новизна работы

1. Найдена оптимальная геометрия широкоапертурной дифракции, обеспечивающая наибольшую угловую апертуру брэгговского акустооптического взаимодействия. Теоретически исследована зависимость величины оптимального угла наклона акустической грани кристалла от оптических параметров одноосных анизотропных сред.
2. Теоретически и экспериментально изучены параметры широкоапертурной акустооптической фильтрации в зависимости от направления ультразвука в кристалле акустооптической ячейки, а также от двулучепреломления кристалла. Доказано, что факторами, ограничивающим угловую апертуру широкоугольного акустооптического фильтра, являются величины допустимого угла дифракции, а также угол пространственного разделения пучков на выходе фильтра. Угол разделения пучков обычно оказывается существенно меньше допустимой угловой апертуры акустооптического взаимодействия.
3. Исследован режим двойного брэгговского акустооптического взаимодействия, при котором дифракция Брэгга одновременно осуществляется в $+1$ и -1 порядки дифракции. Показано, что данный режим дифракции позволяет получать в первых дифракционных максимумах изображения исходного объекта, выделенные по двум ортогональным состояниям поляризации. Это позволило осуществить спектрально-поляризационный анализ изображений ряда тестовых объектов.

Практическая значимость работы

Полученные научные результаты могут быть использованы при создании широкоапертурных акустооптических фильтров на основе одноосных двулучепреломляющих кристаллов. Такие фильтры могут успешно применяться для спектрального анализа изображений объектов различного происхождения и могут найти многочисленные применения в различных областях науки и техники. Теоретически и экспериментально обоснована возможность использования двойной анизотропной дифракции Брэгга для поляризационного анализа оптических изображений с помощью акустооптических устройств. Примечательно, что акустооптические фильтры, использующие режим двойной анизотропной дифракции Брэгга, позволяют анализировать оптические изображения одновременно как по спектральному составу, так и по поляризации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что величина оптимального угла наклона волнового фронта ультразвука относительно оптической оси α_{opt} , обеспечивающего наибольшую угловую апертуру дифракции, зависит от коэффициента двулучепреломления материала. Значения оптимального угла наклона α_{opt} заключены в интервале от $\alpha_{opt} = 16,4^\circ$ (для кристалла Hg_2Br_2) до $\alpha_{opt} = 20,6^\circ$ (в кристалле CaCO_3). Наименьшие значения угла α_{opt} наблюдаются в положительных кристаллах с максимальным двулучепреломлением, а наибольшие величины оптимального угла соответствуют отрицательным одноосным кристаллам с большой абсолютной величиной двулучепреломления.
2. Доказано, что главными факторами, ограничивающими угловую апертуру широкоугольного акустооптического фильтра, являются величина допустимой угловой апертуры дифракции и угол пространственного разделения пучков. Показано, что угол пространственного разделения

возрастает с увеличением параметра относительного двулучепреломления материала.

3. Обнаружено, что в одноосных кристаллах существует режим акустооптического взаимодействия, при котором дифракция Брэгга осуществляется одновременно в +1 и -1 порядки дифракции. Данный вид акустооптического взаимодействия обеспечивает возможность обработки произвольно поляризованных пучков, несущих изображение, а также анализ оптического излучения по поляризации.

Апробация работы

По результатам проведенных исследований были сделаны доклады на всесоюзных, международных и национальных конференциях: 35th Winter School on Wave and Quantum Acoustics. – Ustron, Poland, 2006; XII Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial, “STSIVA 2007”, Barranquilla, Colombia 2007; XI Simposio de tratamiento de señales, imagines y visión artificial, “STSIVA 2006”, Bogotá, Colombia 2006; IX Encuentro Nacional de óptica, Medellín, Colombia 2005; Resumen XX Congreso Nacional de Física, Armenia, Colombia 2003; “Ultrasonics International 91”, Le Touquet, France, 1991; Вторая всесоюзная конференция «Оптическое изображение и регистрирующие среды», Ленинград 1990; Восьмая всесоюзная научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», Москва 1990. Также результаты исследований обсуждались на научных семинарах кафедр физики колебаний физического факультета МГУ, радиофизики РУДН и опубликованы в работах, приведенных ниже.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем работы составляет 130 страниц. Диссертация включает 55 рисунков и 5 таблиц. Библиография содержит 155 наименований, в том числе 13 авторских публикаций.

Содержание работы

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертационной работы, излагаются цели работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приводится краткое содержание диссертации, отмечается новизна и практическая значимость проведенных исследований, приводятся сведения об апробации результатов работы.

Первая глава диссертации содержит необходимые для последующего изложения сведения из теории акустооптического взаимодействия в оптически анизотропных средах, а также посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию условий синхронизма анизотропной дифракции Брэгга. Рассмотрены оптические свойства двулучепреломляющих материалов и проанализированы зависимости брэгговского угла от акустической частоты $\theta_B(f)$ для акустооптической дифракции в оптически одноосной среде. Центральное место занимает анализ широкоапертурной геометрии акустооптического взаимодействия, при которой условие брэгговского синхронизма выполняется с высокой точностью в относительно большом интервале углов падения оптического излучения на акустооптическую ячейку. Исследован вид частотных зависимостей брэгговского угла, а также параметры широкоапертурной дифракции при различных направлениях ультразвука в кристалле, а также в кристаллах с различными показателями двулучепреломления. Приведены результаты экспериментальных исследований частотных зависимостей угла Брэгга, характерных для широкоапертурной дифракции. Измерения выполнены с использованием кристаллического парателлуриата (TeO_2), а также кристаллов KDP (KH_2PO_4) и MgF_2 .

На Рис. 1 показаны рассчитанные и измеренные на длине волны света $\lambda = 0,63$ мкм зависимости брэгговского угла от акустической частоты $\theta_B(f)$ в выбранных для изучения материалах: в кристалле фторида магния (а), дигидрофосфата калия (б) и парателлуриата (в, г). Угол между волновым

фронтом и осью Z кристалла MgF_2 составлял $\alpha = 8^\circ$, в то время как для кристалла KDP этот угол был равен $\alpha = 9^\circ$. Исследованные акустооптические ячейки на кристалле парателлурита характеризовались углами среза $\alpha = 10^\circ$ и $\alpha = \alpha_{opt} = 18,9^\circ$, где α_{opt} – оптимальный угол среза, обеспечивающий наибольшую угловую апертуру брэгговского акустооптического взаимодействия в главной оптической плоскости данного кристалла. Широкоугольный характер дифракции подтверждается видом измеренных частотно-угловых характеристик. Наличие точки с вертикальной касательной на характеристике соответствует тому, что условие фазового синхронизма в окрестности этой точки выполняется с большой точностью в широком диапазоне углов падения света, что обеспечивает брэгговское акустооптическое взаимодействие с широкой угловой апертурой. Теоретически и экспериментально показано, что оптимальная широкоапертурная геометрия в парателлурите наблюдается в том случае, когда волновой вектор ультразвука в кристалле парателлурита составляет угол $\alpha_{opt} = 18,9^\circ$ с осью $[110]$. Соответствующая частотная зависимость угла Брэгга при этом имеет точку перегиба, в которой обращается в ноль вторая производная $d^2 f / d\theta_B^2 = 0$ (Рис. 1, г).

Показано, что величина оптимального угла среза α_{opt} этого угла зависит от коэффициента относительного двулучепреломления материала δ , причем для известных акустооптических кристаллов значения угла α_{opt} заключены в интервале от $\alpha_{opt} = 16,4^\circ$ (Hg_2Br_2) до $\alpha_{opt} = 20,6^\circ$ ($CaCO_3$). Наименьшие значения угла α_{opt} наблюдаются для положительных кристаллов с максимальными величинами коэффициента двулучепреломления $\delta \approx 0,3$, к которым относятся кристаллические соединения ртути Hg_2Cl_2 и Hg_2Br_2 . Наибольшие величины угла $\alpha_{opt} > 20^\circ$ соответствуют отрицательным одноосным кристаллам, характеризующимся большой абсолютной величиной коэффициента $|\delta| \approx 0,1$. Для материалов, обладающих малым двулучепреломлением, таких как кварц или фторид магния, величина оптимального угла оказывается приблизительно равной $\alpha_{opt} \approx 19,5^\circ$.

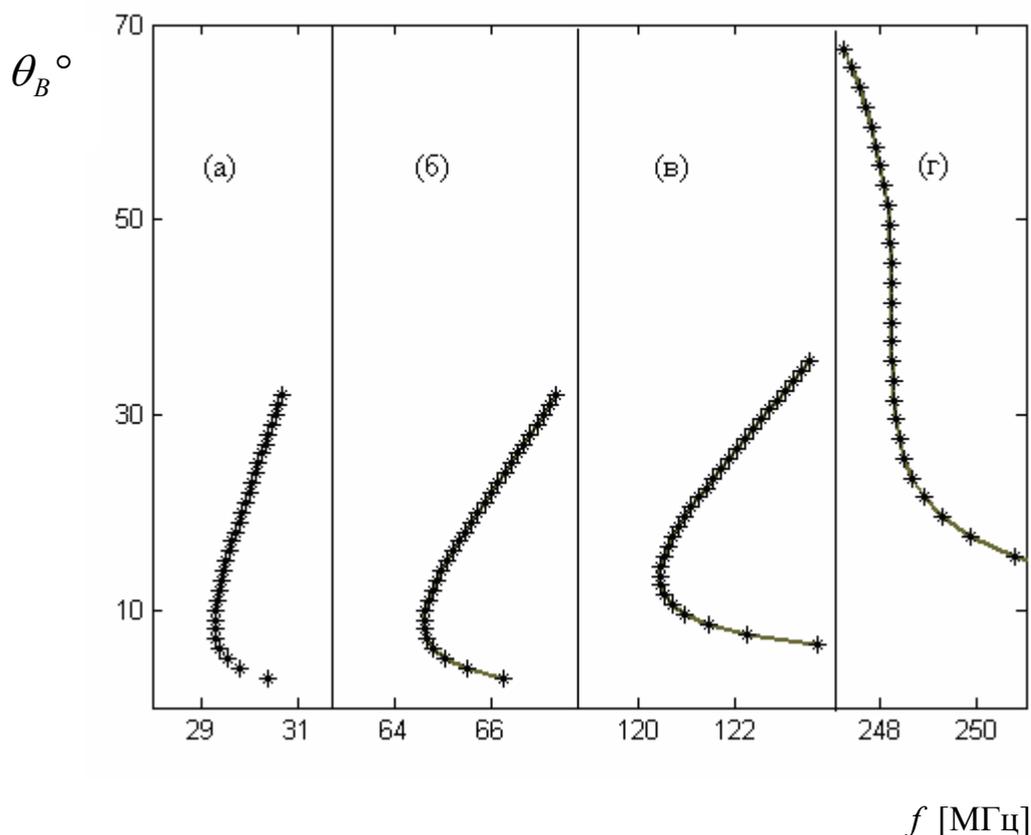


Рис. 1. Измеренные зависимости брэгговского угла падения от акустической частоты для кристалла MgF_2 с углом среза $\alpha = 8^\circ$ (а), KDP с углом $\alpha = 9^\circ$ (б) и TeO_2 с углами среза $\alpha = 10^\circ$ (в) и $\alpha = 18,9^\circ$ (г)

Во второй главе диссертации рассмотрено явление широкоапертурной акустооптической фильтрации света. Проанализирована анизотропная дифракция Брэгга при условии умеренного нарушения условий фазового синхронизма и исследован вопрос о спектральном разрешении широкоапертурного акустооптического фильтра. Найдено, что в случае широкоапертурного взаимодействия в среде с оптической и акустической анизотропией интервал длин волн брэгговской дифракции может быть вычислен по приближенной формуле:

$$\Delta\lambda \approx \frac{0,8 \lambda^2 (1 + \text{tg}\theta_B \text{tg}\Psi)}{\Delta n l \cos\theta_B \sin^2(\theta_B + \alpha)}, \quad (1)$$

где λ – центральная длина волны оптического излучения, θ_B – угол Брэгга, Ψ – угол между векторами фазовой и групповой скорости акустической волны, Δn – величина двулучепреломления кристалла. При этом обнаружено, что наибольшая величина спектрального разрешения $R = \lambda/\Delta\lambda$ достигается в материалах с большим двулучепреломлением при углах среза, соответствующих оптимальному углу $\alpha = \alpha_{opt}$ для данного кристалла.

Приведены результаты экспериментального исследования частотной полосы и угловой апертуры широкоугольной дифракции, полученные для кристаллов парателлуриита, дигидрофосфата калия и фторида магния. Измерение частотной полосы дифракции Δf позволяет сделать вывод о величине спектральной полосы $\Delta\lambda$, так при $\Delta f/f \ll 1$ выполняется соотношение $\Delta\lambda/\lambda \approx \Delta f/f$, где f – центральная частота дифракции, соответствующая фазовому синхронизму акустооптического взаимодействия. Выполненные измерения подтвердили правильность теоретического анализа.

Показано, что величина угла пространственного разделения пучков на выходе фильтра $\Delta\theta$ прямо пропорциональна коэффициенту относительного $\Delta n/n_o$ (n_o – показатель преломления обыкновенной волны в кристалле):

$$\Delta\theta = (\Delta n / n_o) \sin^2(\theta_B + \alpha) \cot \theta_B. \quad (2)$$

Теоретически и экспериментально исследован режим двойной анизотропной дифракции в различных кристаллах и определена его угловая апертура. При двойной дифракции свет одновременно рассеивается из нулевого порядка дифракции в +1 и –1 максимумы. Пример зависимостей нормированной интенсивности света в дифракционных порядках от угла падения света на акустооптическую ячейку, наблюдавшихся при двойной анизотропной дифракции, приведен на Рис. 2. Данные графики построены по результатам измерений на длине волны света $\lambda = 0,67$ мкм в кристалле парателлуриита с углом среза $\alpha = 8,0^\circ$. Частота ультразвука в ходе измерений была фиксированной, $f = 85$ МГц, и соответствовала геометрии двойной дифракции.

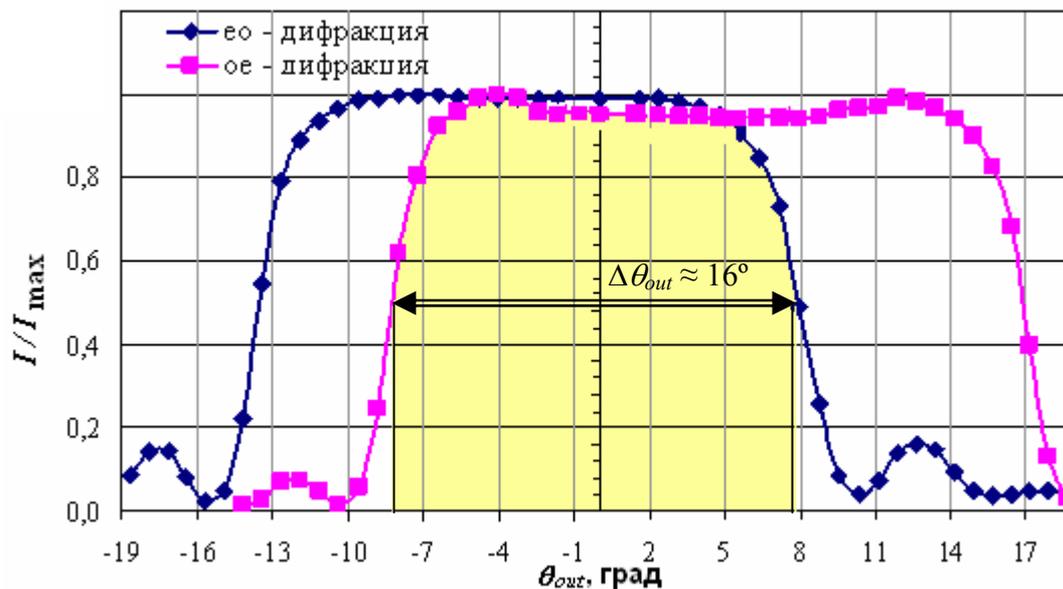


Рис. 2. Перекрывание угловых зависимостей интенсивности дифракции для двух оптических мод (TeO_2 , $\alpha = 8,0^\circ$, $\lambda = 0,67$ мкм, $f = 85$ МГц).

Один из графиков на Рис. 2 соответствует дифракции необыкновенно поляризованного пучка. Этот процесс дифракции обозначен на рисунке «eo». Второй график соответствует дифракции оптического пучка с ортогональной поляризацией («oe»-дифракция). При этом дифрагированные пучки отклоняются в различные дифракционные порядки, в плюс первый и в минус первый. Эффективность дифракции обеих поляризационных компонент света составляла около 80 % при весьма небольшой мощности ультразвука, $P = 0,5$ Вт. Одновременное отклонение различных поляризационных компонент оптического излучения позволяет обрабатывать неполяризованное или произвольно поляризованное излучение. Таким образом, на основе двойного режима брэгговской дифракции могут быть созданы эффективные акустооптические устройства, нечувствительные к поляризации падающего света. С другой стороны, режим двойной дифракции позволяет разделять

падающее излучение по ортогональным поляризационным компонентам. Поэтому данный эффект может лежать в основе работы систем поляризационного анализа света. Графики, приведенные на Рис. 2, показывают, что режим двойной дифракции, исследованный в эксперименте, характеризуется также большой угловой апертурой, около 16° . Однако, угол отклонения дифрагированного пучка при этом оказывается меньше, $\Delta\theta = 9^\circ$. Именно эта величина и определяет угловую апертуру фильтра. Вместе с тем, она является достаточной для обработки оптических изображений.

В третьей главе обсуждается экспериментальная реализация акустооптического метода спектрального и поляризационного анализа оптических изображений, который основывается на физических явлениях, рассмотренных в первой и второй главах диссертации. Приводятся результаты спектрального и поляризационного анализа различных природных и искусственных объектов, полученные с помощью акустооптических фильтров на кристаллах парателлурита. Описан эксперимент, при котором с помощью одной акустооптической ячейки, работающей в режиме двойной анизотропной дифракции, осуществлен одновременно спектральный и поляризационный анализ изображений тестовых объектов. Тестовый спектрально-поляризационный анализ изображений был выполнен с помощью АО фильтра на кристалле TeO_2 , характеризующимся оптимальным углом среза, $\alpha = 18,9^\circ$. Изображения, полученные в результате эксперимента, приведены на Рис. 3.

Тестовый объект на Рис. 3 представляет собой диапозитив, часть которого закрыта двумя различно ориентированными пластинами поляризаторов (фотография на Рис. 3, б). Отфильтрованные на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм изображения, полученные в $+1$ и -1 порядках дифракции, были зарегистрированы. На рисунке 3 (а) показана картина в $+1$ порядке дифракции, а изображение для -1 порядка приведено на Рис. 3 (в).

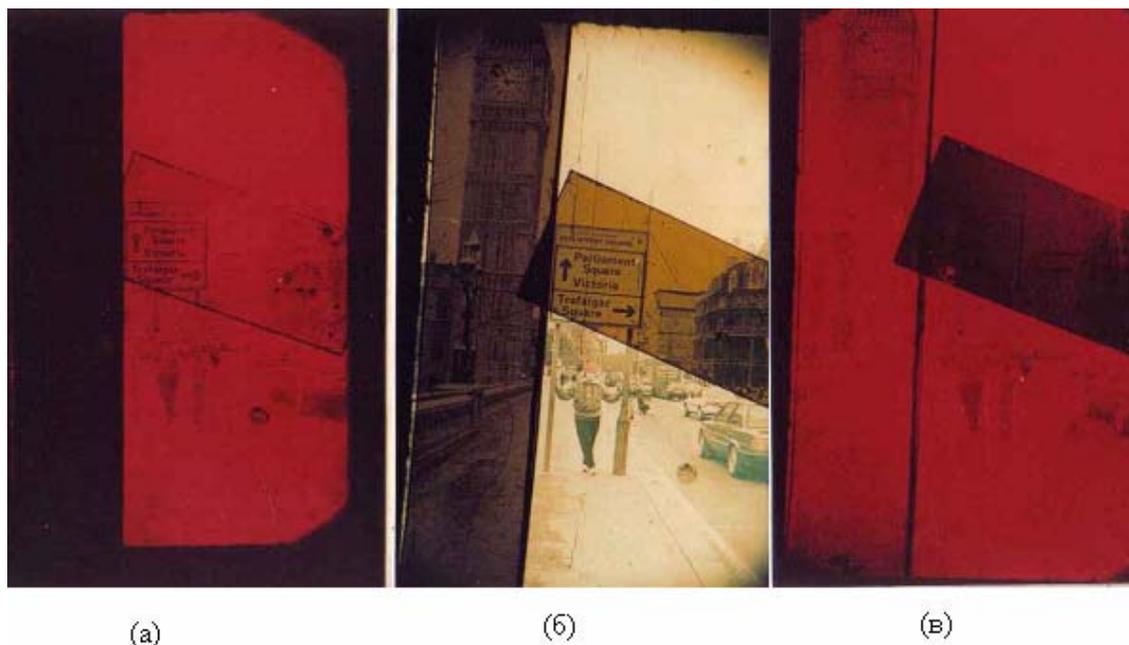


Рис. 3. Изображения тестового объекта на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм, выделенные по поляризации с помощью фильтра с углом среза $\alpha = 18,9^\circ$; а) необыкновенно поляризованная компонента изображения в минус первом порядке дифракции; б) исходное изображение объекта; в) изображение в обыкновенно поляризованном свете в плюс первом порядке дифракции

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Выявлены факторы, ограничивающие угловую апертуру широкоугольных акустооптических фильтров. Показано, что основным ограничивающим фактором является угол пространственного разделения пучков, который в случае широкоапертурной геометрии дифракции оказывается меньше угловой апертуры брэгговского взаимодействия. Найдено, что максимальный угол пространственного разделения пучков $\Delta\theta_d$ определяется величиной относительного двулучепреломления кристалла. В случае широкоапертурной дифракции в кристалле парателлурифта максимальный угол пространственного разделения пучков в воздухе составляет 9° .

2. Определена ширина спектральной полосы фильтрации $\Delta\lambda$ и спектральное разрешение широкоапертурного акустооптического фильтра. Доказано, что наибольшая величина разрешения достигается в материалах с наибольшим двулучепреломлением. Для кристалла парателлурита на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм величина спектральной полосы дифракции составила $\Delta\lambda = 7,8 \text{ \AA}$ при расчетном значении $\Delta\lambda = 7,3 \text{ \AA}$, когда длина пьезопреобразователя была равна $l = 1,25$ см и волновой вектор ультразвука направлен под углом $\alpha = 18,9^\circ$ к оси [110]. Достигнута наибольшая угловая апертура в кристалле парателлурита, а также близкий к максимальному угол пространственного разделения пучков $\Delta\theta_d = 9^\circ$.

3. Осуществлен тестовый спектральный анализ в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне объектов природного и искусственного происхождения с помощью акустооптических фильтров на кристаллах парателлурита с углами среза $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha = 18,9^\circ$. Проведенные эксперименты показали перспективность использования акустооптического метода в различных областях науки и производства.. Для демонстрации возможностей акустооптического метода были проведены всесторонние спектральные исследования плодов кофе и банана, находящихся на различных стадиях созревания. Спектральное исследование повреждений кожи человека показало потенциальную возможность применения акустооптических систем анализа изображений в медицине.

4. Реализован режим одновременной дифракции, позволившей осуществить поляризационный анализ изображений тестовых объектов с помощью акустооптических фильтров на кристалле парателлурита с углами среза $\alpha = 18,9^\circ$ и $\alpha = 8^\circ$. Теоретически и экспериментально исследован режим двойной анизотропной дифракции, при котором рассеяние Брэгга одновременно осуществляется в $+1$ и -1 порядки дифракции. Доказано, что с помощью акустооптической системы, содержащей единственную акустооптическую ячейку, можно проводить одновременно как спектральный, так и поляризационный анализ изображений. Исследование поляризационных и спектральных характеристик объектов живой и неживой природы показали эффективность данной методики спектрально-поляризационного анализа.

Список публикаций по теме диссертации

1. Mosquera Julio César, Sepúlveda G. Alberto e Isaza B. César, “Procesamiento de imágenes ópticas de frutos de café en cereza por medio de filtros acusto-ópticos”, – *Ingeniería y Desarrollo*, No. 21, 2008, (в печати).
2. Волошинов В.Б., Москера Х.С., “Широкоапертурное акустооптическое взаимодействие в двулучепреломляющих кристаллах”, – *Опт. и спектр.*, 2006, т. 101, No 4, стр. 677 – 684.
3. Voloshinov Vitaly B. and Mosquera Julio C., “Influence of birefringence on parameters of imaging acousto-optic filters”, – Abstracts 35th Winter School on Wave and Quantum Acoustics., – Ustron, Poland, 2006, p. 65.
4. Voloshinov Vitaly B. and Mosquera Julio C., “Influence of birefringence on parameters of imaging acousto-optic filters”, – *Archives of Acoustics*, 2006, vol. 31, No.1, p.132.
5. Mosquera Julio César, Sepúlveda G. Alberto e Isaza B. César, “Procesamiento de imágenes ópticas de frutos de café en cereza por medio de filtros acusto-ópticos”, – XII Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial, “STSIVA 2007”, Barranquilla, Colombia 2007.
6. Ariza C. Hernando, Mosquera Julio Cesar y Voloshinov Vitaly B., “Análisis de imágenes por métodos acusto-ópticos en el espectro visible y cercano IR”, – XI Simposio de tratamiento de señales, imagines y visión artificial, “STSIVA 2006”, p. 77 – 80. Bogotá, Colombia 2006.
7. Mosquera M. Julio C. y Vitaly B. Voloshinov, “Análisis de la birrefringencia en algunos cristales y la ley de reflexión”, – IX Encuentro Nacional de óptica, Medellín, Colombia 2005.
8. Mosquera M. Julio C. y Vitaly B. Voloshinov, “Análisis espectral y polarizacional de imágenes con métodos acusto-ópticos”, – Resumen XX Congreso Nacional de Física, Armenia, Colombia 2003, p. 232.
9. Voloshinov V.B., Molchanov V. Ya. and Mosquera J. C., “Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics”, – *Optics & Laser Technology*, vol. 28, No. 2, pp. 119 – 127, 1996.

10. V. B. Voloshinov and J. C. Mosquera, "Filtration of optical images using acoustic waves in paratellurite crystal", – Program and abstract book of Int. Conf. "*Ultrasonics International 91*", Le Touquet, France, p. 78, 1991.
11. В.Б. Волошинов, Д. Д. Мишин, Х.С.Москера, «Акустооптическая спектрально-поляризационная фильтрация оптических изображений», – Вторая всесоюзная конференция «*Оптическое изображение и регистрирующие среды*», Ленинград 1990, том 2, с. 218-219.
12. В.Б. Волошинов, Д. Д. Мишин, Х.С. Москера, «Спектральная фильтрация электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 0,9–1,3 мкм», – Восьмая всесоюзная научно–техническая конференция «*Фотометрия и ее метрологическое обеспечение*», Москва 1990, С. 29.
13. Х.С. Москера, «Акустооптическая спектрально-поляризационная фильтрация оптических изображений», дипломная работа, физический факультет МГУ, 1991.