

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

На правах рукописи

УДК 535.241.13:534

Костюк Дмитрий Евгеньевич

ОБРАБОТКА КОГЕРЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

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: доктор физико-математических наук,
профессор В.И. Балакший

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор физического факультета
МГУ им. М.В.Ломоносова В.А. Бушуев

доктор физико-математических наук,
руководитель лаборатории НТЦ
Уникального Приборостроения РАН
В.Э. Пожар

Ведущая организация: Институт Радиотехники и Электроники
РАН

Защита состоится 22 мая 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 «__» апреля 2008 года

Учёный секретарь диссертационного совета Д 501.001.67

А.Ф.Королёв

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время трудно найти какую-либо область науки и техники, где не приходилось бы сталкиваться с вопросами обработки сигналов и измерения их параметров. Несмотря на огромные успехи цифровой вычислительной техники, внимание ученых и инженеров все более привлекают оптические методы обработки, предоставляющие ряд уникальных возможностей, которыми цифровые методы в принципе не обладают. Основными из них являются: возможность параллельной обработки информации, возможность построения устройств, в которых скорость обработки определяется только скоростью распространения оптических сигналов, и, конечно же, возможность выполнения «сверхбыстрого» преобразования Фурье над огромными массивами информации, содержащимися в оптических изображениях. В отличие от компьютерных методов, скорость вычисления фурье-образа в оптической системе одинакова для любого количества разрешаемых элементов в изображении, а сама оптическая схема может состоять всего из одного элемента – линзы. Разумеется, для достижения большой производительности нужен столь же быстрый ввод изображений в оптическую систему, что реализовать весьма не просто. Кроме того, оптика в технологическом плане пока существенно отстает от электроники, что также затрудняет создание конкурентоспособных устройств оптической обработки информации. Однако эти проблемы постепенно решаются, и можно надеяться, что оптические устройства займут подобающее им место в информационной технике.

Одно из основных направлений оптической обработки информации охватывает методы, основанные на пространственной фильтрации оптического изображения. К этому направлению относятся и акустооптические (АО) методы обработки изображений. К настоящему времени акустооптика превратилась в обширный раздел физики, тесно связанный с акустикой, лазерной физикой, оптикой и кристаллофизикой. Большой интерес к эффекту дифракции света на ультразвуке обусловлен, во-первых, его сложностью и разнообразием проявления в различных средах и при разных условиях эксперимента, а во-вторых, – и это является главной причиной, – высокой эффективностью и широкими функциональными возможностями АО метода управления оптическим излучением. К настоящему времени предложено и исследовано более десятка различных типов АО устройств, отличающихся назначением и принципом действия. Некоторые из них, такие

как модуляторы света, дефлекторы и фильтры, выпускаются серийно промышленностью.

Дифракция света на ультразвуковых волнах может также использоваться для управления пространственной структурой световых пучков, что является основой для АО обработки изображений. Было показано, что АО ячейка действует на входной оптический сигнал (оптическое изображение) как фильтр пространственных частот. Передаточная функция такого фильтра отражает селективные свойства АО взаимодействия. Конкретный вид передаточной функции зависит от структуры акустического поля в АО ячейке и от геометрии АО взаимодействия. По сравнению с другими известными методами обработки изображений, АО метод обладает рядом преимуществ. АО пространственные фильтры не чувствительны к их положению в оптической системе, они не требуют точной юстировки и дополнительной оптики для формирования фурье-спектра. Такие устройства способны обрабатывать как когерентные, так и некогерентные изображения. Но главное достоинство АО фильтров заключается в возможности их быстрой электронной перестройки (путем изменения параметров акустической волны), что обеспечивает обработку поступающей информации в реальном времени. Все это свидетельствует о важности и *актуальности* исследований в области АО фильтрации оптических сигналов.

Цели диссертационной работы

Цели диссертационной работы состояли в исследовании различных аспектов АО пространственной фильтрации, как с точки зрения фундаментальной науки, так и в свете практических применений для оптической обработки информации. В работе были поставлены и решались следующие задачи:

1. изучение пространственной структуры АО фазового синхронизма и двумерной передаточной функции для любых срезов и геометрий АО взаимодействия в одноосных кристаллах, а также исследование возможностей использования различных вариантов геометрии АО взаимодействия для обработки оптических сигналов;
2. теоретическое исследование АО пространственной фильтрации, а также разработка адекватной компьютерной модели фильтрации, учитывающей все особенности АО взаимодействия в анизотропных средах;
3. теоретическое и экспериментальное исследование АО метода визуализации двумерных фазовых объектов;
4. разработка нового АО метода раздельной визуализации амплитуды и фазы светового поля, реализующего особенности и достоинства явления дифракции света на

ультразвуке;

5. создание экспериментальной установки для АО пространственной фильтрации и проведение экспериментальных исследований по проверке основных результатов теории.

Научная новизна работы

1. Развита теория АО взаимодействия волн, имеющих сложную пространственно-временную структуру. На примере кристаллов парателлурита и молибдата кальция впервые исследована и подробно описана пространственная структура АО фазового синхронизма для любых направлений распространения и любых частот ультразвука в одноосных кристаллах; рассчитана объемная структура брэгговских углов.
2. Впервые проведен подробный теоретический анализ двумерной структуры передаточных функций АО ячейки. Теоретически и экспериментально показано, что в одноосных кристаллах существует три принципиально различных вида передаточной функции (одномерный, крестообразный и аксиально-симметричный), представляющих широкие возможности для обработки изображений методом АО пространственной фильтрации.
3. Исследован АО метод пространственной фильтрации двумерных изображений. Впервые проведен расчет ЧКХ системы фильтрации для разных видов преобразования изображений (интегрирование, дифференцирование, визуализация оптического волнового фронта и др.) с использованием нулевого и первого порядков брэгговской дифракции. Проведена оценка предельных возможностей системы обработки изображений для разных геометрий АО взаимодействия, включая ортогональную, коллинеарную и тангенциальную; установлены особенности каждой геометрии, их достоинства и недостатки при выполнении одинаковых операций обработки.
4. Впервые теоретически и экспериментально исследован АО метод визуализации двумерных фазовых объектов. Показано, что в зависимости от выбора положения рабочей точки на передаточной функции можно реализовать различные законы преобразования фазовой модуляции светового поля в модуляцию интенсивности. Наибольший интерес представляет вариант, когда распределение интенсивности в выходном сигнале пропорционально градиенту фазы исходного светового поля. Установлено, что в этом случае контраст визуализированного изображения пропорционален глубине фазового рельефа исходного изображения, а разрешение

определяется расходимостью акустического пучка. Впервые экспериментально получены изображения фазового объекта АО методом.

5. Предложен и детально исследован АО метод раздельной визуализации амплитудной и фазовой структуры светового поля, заключающийся в регистрации и последующей обработке двух изображений, полученных при симметричных положениях рабочей точки на противоположных склонах передаточной функции. Работоспособность метода подтверждена с помощью компьютерного моделирования, а также при его экспериментальной реализации.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость диссертационной работы для акустооптики в целом определяется тем, что выполненные в ней исследования дают более ясное представление об особенностях АО взаимодействия ограниченных волновых пучков в анизотропных средах, указывают на важность учета структуры пучков не только в плоскости АО взаимодействия, но также и в ортогональной плоскости, что в итоге позволяет определять пути совершенствования АО устройств.

Исследованный в диссертации АО метод обработки оптических сигналов имеет ряд преимуществ перед другими используемыми в настоящее время методами. По быстродействию он существенно превосходит компьютерные способы обработки изображений. По сравнению же с методами, основанными на пространственной фильтрации, он отличается нечувствительностью к юстировке системы и месту расположения в ней АО фильтра, а главное, – позволяет быстро (за микросекунды) перестраивать передаточную функцию и, таким образом, обрабатывать информацию в режиме реального времени.

На основе разработанного метода визуализации фазовой структуры световой волны могут быть созданы эффективные датчики волнового фронта для лазерной физики, адаптивной оптики, систем контроля качества оптических изделий и т.д. В исследованном методе, в отличие от ранее используемых, визуализируется градиент фазы оптического сигнала, что дает псевдообъемное изображение волнового фронта, позволяющее составить наглядное представление о форме и объемных свойствах прозрачного объекта. Одним из несомненных достоинств АО метода и его отличием от других методов визуализации фазовых объектов является то, что он позволяет осуществлять одновременный анализ как амплитудной, так и фазовой структуры оптического поля. Все это дает основания

предполагать, что разработанный АО метод обработки оптических сигналов найдет широкое применение не только в физических исследованиях, но и в других областях знаний, включая медицину и биологию.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Совокупность всех углов Брэгга анизотропной дифракции в одноосных кристаллах образует конические поверхности с направляющими, форма и пространственная ориентация которых определяются направлением распространения и частотой ультразвука. В частности, при распространении акустического пучка перпендикулярно оптической оси кристалла направляющие образуют симметричные кривые, похожие на «овалы Кассини» (лемнискаты с двумя фокусами). При повороте волнового вектора ультразвука к оптической оси поверхности трансформируются в круговые конусы.
2. В АО ячейках, созданных на основе одноосных кристаллов, существует три вида двумерных передаточных функций: крестообразный – при коллинеарном взаимодействии, аксиально-симметричный – в области тангенциальной геометрии и в форме дуги – во всех остальных случаях.
3. Эффект визуализации оптического волнового фронта возникает, когда фазомодулированная световая волна падает на АО ячейку, работающую в брэгговском режиме, под углом, отличающимся от угла Брэгга. Оптимальным является угол падения, соответствующий середине склона передаточной функции АО ячейки. При этом визуализируется градиент фазы оптического сигнала.
4. При помощи АО метода возможна раздельная визуализация распределения амплитуды и фазы в когерентном световом поле путем регистрации и последующей обработки двух изображений, полученных при симметричных положениях рабочей точки на противоположных склонах передаточной функции. Такая визуализация наиболее эффективно реализуется в особой геометрии АО взаимодействия, когда световой пучок дифрагирует одновременно в два брэгговских порядка.

Достоверность полученных в работе результатов определяется корректностью постановки задач, использованием апробированных методов теоретического анализа и эксперимента, а также согласием теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования и экспериментов. Теоретический анализ АО эффектов проводился методами теории волн на основе дифференциальных уравнений, которые вытекают из уравнений Максвелла для

среды, возмущенной акустической волной. АО взаимодействие сложных по структуре пучков исследовалось спектральным методом в его пространственном варианте. Широко использовались компьютерные методы расчета с применением обобщенных безразмерных параметров. В основе экспериментальных исследований лежали классические методы оптики, лазерной физики и акустооптики.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований были представлены на следующих международных конференциях:

- 2-я школа молодых ученых «Оптика-2002», Санкт Петербург, 2002 г.
- 10-я международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2003», Москва, 2003 г.
- 32nd Winter School “Molecular and Quantum Acoustics”, Szczyrk, Poland, 2003.
- 6th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems”, St. Petersburg, Russia, 2003.
- 9th School on Acousto-optics and Applications, Gdansk, Poland, 2004.
- International Congress on Optics and Optoelectronics (COO-2005), Warsaw, Poland, 2005.
- 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL–2005), Yalta, Ukraine, 2005.
- 35th Winter School “Molecular and Quantum Acoustics”, Ustron, Poland, 2006.
- 9th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems, Non-Destructive Testing, Security and Medicine”, St. Petersburg, Russia, 2006.
- 7th International Young Scientists Conference «Optics and High Technology Material Science» (SPO-2006), Kiev, Ukraine, 2006.
- 36th Winter School “Molecular and Quantum Acoustics”, Wisla, Poland, 2007
- 10th International Conference for Young Researchers “Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems”, St. Petersburg, Russia, 2007.

Кроме того, результаты исследований докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории акустооптики и кафедры физики колебаний физического факультета МГУ.

Работа была также представлена на конкурсе молодых ученых «The Inside Edge 2007», проводимом компанией Samsung Electromechanics, где заняла третье место.

По материалам диссертации опубликовано 10 статей в научных журналах и трудах конференций и 12 тезисов докладов. Список публикаций представлен в конце автореферата.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём работы составляет 170 страниц. Диссертация включает 59 рисунков. Библиография содержит 168 наименования, в том числе 22 авторские публикации.

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 имеет в основном обзорный характер. Она содержит необходимые для последующего изложения сведения из теории АО взаимодействия в анизотропных средах. Отмечены основные особенности АО взаимодействия в анизотропных средах, показаны достоинства анизотропной дифракции, обусловленные особой зависимостью угла Брэгга от частоты ультразвука. Глава включает также информацию об АО взаимодействии волновых пучков, имеющих сложную пространственно-временную структуру, и ее влиянии на спектр дифрагированного света. Приведено общее решение дифракционной задачи.

Во второй главе диссертации проводится изучение АО ячейки как фильтра пространственных частот. Задача АО взаимодействия решается в классической постановке с использованием спектрального метода. Анизотропная АО ячейка рассматривается как линейная оптическая система с передаточной функцией $T_a^{(1)}$ для первого порядка дифракции и $T_a^{(0)}$ - для нулевого порядка. В случае брэгговского двухмодового рассеяния света передаточные функции имеют вид

$$T_a^{(1)}(\vartheta_i, \chi) = -(A/2) \operatorname{sinc}\left(\sqrt{A^2 + R^2} / 2\pi\right), \quad (1)$$

$$T_a^{(0)}(\vartheta_i, \chi) = \left[\cos\left(\sqrt{A^2 + R^2}/2\right) - j(R/2)\text{sinc}\left(\sqrt{A^2 + R^2}/2\pi\right) \right] \exp(jR/2), \quad (2)$$

где ϑ_i и χ - углы, определяющие пространственные частоты $f_z = n_0\vartheta_i/\lambda$ и $f_y = n_0\chi/\lambda$, λ - длина волны света в вакууме. В формулах (1)-(2) $A = A(\vartheta_i, \chi)$ - параметр Рамана-Нага, пропорциональный амплитуде акустической волны, а $R = R(\vartheta_i, \chi)$ - безразмерная расстройка. Для квазиколлинеарного взаимодействия

$$R = \frac{2\pi l}{\lambda} \left(-n_0 \sin \vartheta_i \pm \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \cos^2 \vartheta_i} - \frac{\lambda f}{V} \right), \quad (3)$$

а для квазиортогонального

$$R = \frac{2\pi l}{\lambda} \left(n_0 \cos \vartheta_i \cos \chi \mp \sqrt{n_1^2 - \left(n_0 \sin \vartheta_i + \frac{\lambda f}{V} \right)^2 - n_0 \cos^2 \vartheta_i \sin^2 \chi} \right), \quad (4)$$

где n_0 и n_1 - показатели преломления падающей и дифрагированной световых волн, ϑ_i - угол падения света, l - длина АО взаимодействия, λ - длина волны света, f - частота ультразвука, V - скорость распространения акустической волны. Соотношения (3)-(4) получены в предположении, что дифракция света происходит в положительном кристалле, а падающий свет имеет необыкновенную поляризацию, вследствие чего $n_0 = n_0(\vartheta_i, \chi)$.

Из условия фазового синхронизма $R = 0$ в диссертационной работе получены частотные зависимости углов Брэгга и рассчитана пространственная структура АО фазового синхронизма, определяющая для фиксированных значений частоты и ориентации волнового вектора ультразвука направления, в которых падающий на АО ячейку свет будет дифрагировать с максимальной эффективностью. Показано, что совокупность брэгговских углов анизотропной дифракции в одноосных кристаллах образует конические поверхности с направляющими, форма которых зависит от частоты и направления распространения ультразвука относительно кристаллографических осей. В частности, при распространении акустического пучка в плоскости, перпендикулярной оптической оси кристалла, направляющие образуют симметричные кривые типа овалов Кассини (лемнискаты с двумя фокусами). При повороте волнового вектора ультразвука к оптической оси поверхности трансформируются в круговые конусы.

Пространственная структура брэгговских углов дает возможность представить себе двумерную структуру передаточных функций АО ячейки. Выполненные во второй главе расчеты показывают, что в одноосных кристаллах можно выделить три принципиально различных варианта передаточных функций. Для большинства случаев передаточная

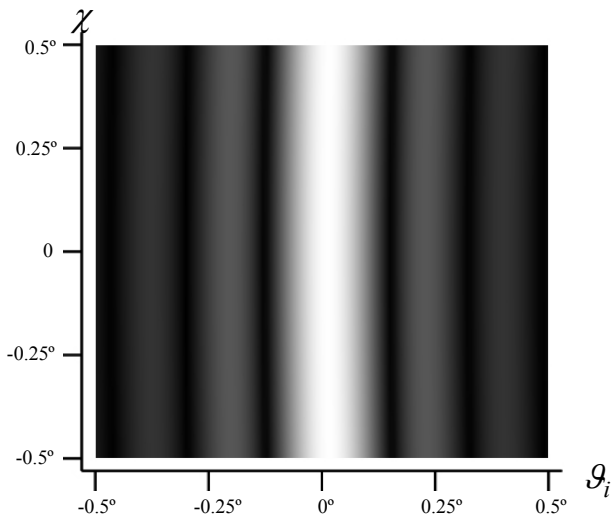


Рис. 1. Двумерная передаточная функция первого порядка дифракции, рассчитанная для АО ячейки на основе CaMoO_4 при $\alpha = 17^\circ$, $f = 42.6$ МГц, $l = 4$ см.

функция имеет форму дуги (рис. 1). Здесь показана двумерная структура передаточной функции в координатных осях, соответствующих пространственным частотам. Большой яркости изображения соответствует большее значение передаточной функции. Представленный вид передаточной функции характерен для всех вариантов изотропной дифракции. При этом дуга ориентирована перпендикулярно плоскости АО взаимодействия. В случае

анизотропной дифракции дуга может иметь любую ориентацию относительно плоскости взаимодействия, в том числе и вдоль плоскости взаимодействия.

Совсем другой вид имеют передаточные функции при коллинеарной дифракции (рис. 2). Если акустическая частота равна частоте коллинеарного фазового синхронизма f_c , то передаточная функция имеет крестообразную форму с лучами, ориентированными приблизительно под углом 45° к оптическим осям Y и Z кристалла (рис. 2а). При уменьшении частоты крест расщепляется на две дуги, смещающиеся по оси θ_i в противоположных направлениях (рис. 2б). Если же частота увеличивается, то крест разделяется на две дуги, перемещающиеся по оси χ (рис. 2в).

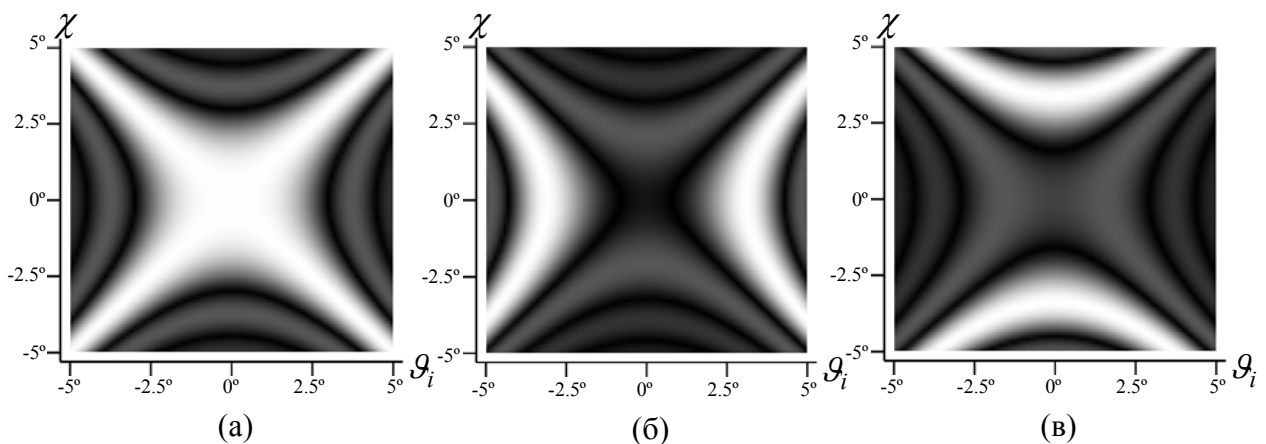


Рис. 2. Двумерные передаточные функции первого порядка коллинеарной дифракции. а: $f = f_c = 46.62$ МГц; б: $f = 46.55$ МГц; в: $f = 46.7$ МГц.

Третий вариант передаточных функций реализуется в области тангенциальной геометрии АО взаимодействия. Двумерные передаточные функции для этого варианта, рассчитанные для ячейки на основе кристалла TeO_2 , показаны на рис. 3. Видно, что передаточные функции практически осесимметричны. Если акустическая частота равна частоте тангенциального фазового синхронизма f_t , то передаточная функция имеет вид круглого пятна. При уменьшении частоты ультразвука форма передаточной функции сохраняется, но пропорционально уменьшаются амплитуды дифрагированных компонент спектра. Иная картина наблюдается при $f > f_t$: в центре передаточной функции появляется провал, а сама функция приобретает кольцеобразную форму (рис. 3б,в).

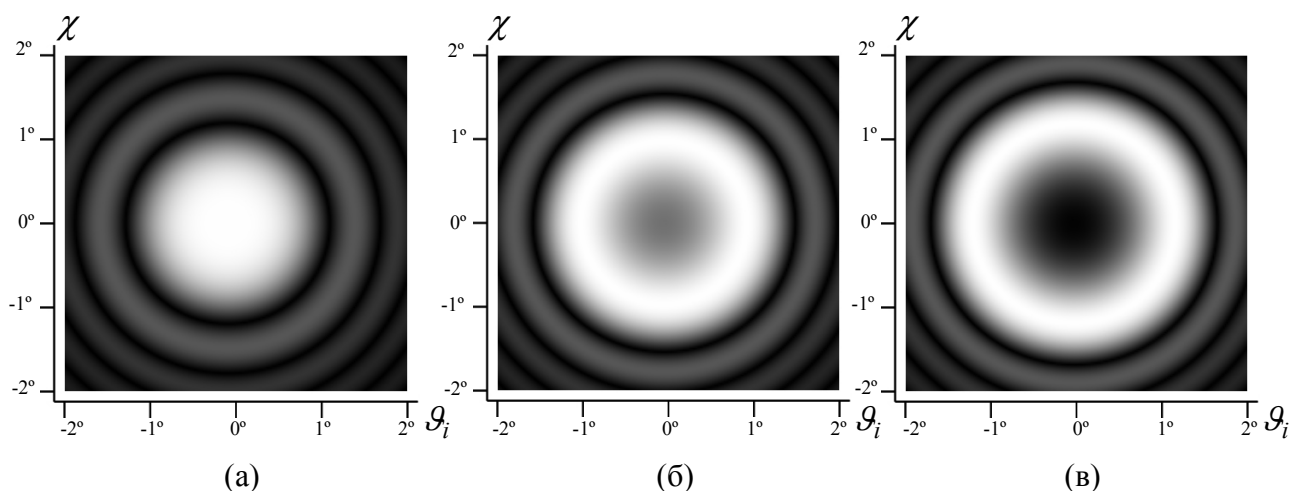


Рис. 3. Двумерные передаточные функции первого порядка дифракции тангенциальной геометрии в TeO_2 .
 а: $f = f_t = 119.5$ МГц; б: $f = 119.7$ МГц; в: $f = 119.8$ МГц.

Во второй главе также проанализировано влияние анизотропии АО качества кристалла на передаточные функции. Установлено заметное отличие передаточных функций ячейки на основе кристалла парателлуриата при распространении ультразвука и света в направлении $[110]$ от тех, что показаны на рис. 2.

Описан эксперимент по визуализации двумерных передаточных функций АО ячейки. В этом случае ячейка освещалась расходящимся световым пучком. При этом каждая спектральная компонента светового пучка дифрагировала с эффективностью $|T_a^{(1)}|^2$, и в результате на выходе ячейки формировалось световое поле, характеризующее передаточную функцию. Приведены экспериментальные изображения передаточных функций для ячеек на основе кристаллов парателлуриата и молибдата кальция, которые находятся в хорошем соответствии с теоретическим расчетом.

Третья глава диссертации посвящена исследованиям АО пространственной фильтрации изображений.

На примере пространственной фильтрации одномерных изображений проведена оценка фильтрующих свойств АО ячейки. Для этого рассмотрен случай, когда через ячейку распространяется оптический сигнал, сформированный синусоидальной амплитудной ячейкой с периодом d . Представлены частотно-контрастные характеристики для различных случаев одномерной АО обработки изображений и на их основе проведена оценка предельных возможностей АО пространственных фильтров.

Возможности АО обработки изображений проиллюстрированы при помощи компьютерного моделирования. Все расчеты проводились с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. На первом этапе по заданному распределению светового поля исходного изображения $u_{in}(y, z)$ находился пространственный спектр оптического сигнала $U_{in}(\theta_i, \chi)$. Далее спектр $U_{in}(\theta_i, \chi)$ умножался на передаточную функцию $T_a(\theta_i, \chi)$, для расчета которой использовалась отдельно разработанная программа. Наконец, на третьем этапе с помощью быстрого преобразования Фурье от функции $U_{in} \cdot T_a$ находилось выходное световое поле $u_{out}(y, z)$. Вычисления были выполнены для всех основных вариантов двумерной передаточной функции АО ячейки, представленных на рис. 1-3. Результаты моделирования показали, что при помощи АО ячеек на основе одноосных кристаллов могут быть эффективно реализованы операции интегрирования и оконтуривания, а также выборочного интегрирования и дифференцирования изображений.

В третьей главе также описан эксперимент по АО пространственной фильтрации двумерных изображений и приведены наиболее наглядные результаты этих исследований. Рис. 4а иллюстрирует работу системы в режиме выборочного дифференцирования вдоль горизонтальной оси. Здесь слева показан исходный, а справа – отфильтрованный оптические сигналы. В этом случае в эксперименте была реализована геометрия с передаточной функцией в форме вертикальной дуги. Эффект был зарегистрирован в нулевом порядке дифракции. При этом передаточная функция выглядела как инвертированная относительно функции, показанной на рис. 1. Это обеспечило практически полное подавление всех спектральных составляющих вдоль вертикальной оси, включая нулевую центральную спектральную составляющую. Для составляющих вдоль горизонтальной оси пропускание фильтра росло по мере удаления от оси пучка. В

результате в отфильтрованных изображениях видны только вертикальные контуры.

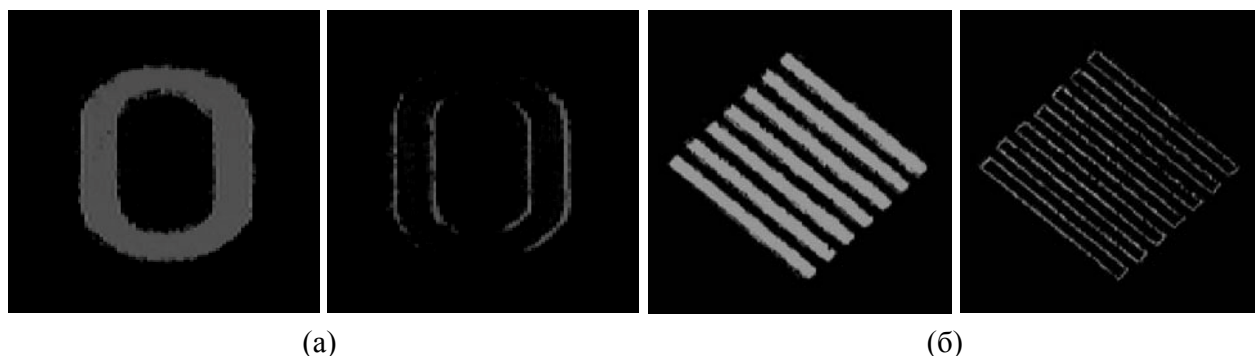


Рис. 4. Эффекты выборочного дифференцирования вдоль горизонтальной оси (а) и оконтуривания (б).

Рис. 4б, на котором, как и в предыдущем случае, слева показан исходный, а справа отфильтрованный оптические сигналы, иллюстрирует работу системы в режиме оконтуривания изображений. В данном случае использовался нулевой порядок тангенциальной геометрии АО взаимодействия. Передаточная функция выглядела как инвертированная, относительно функции, показанной на рис. 3а. Это обеспечило практически полное подавление низкочастотных спектральных составляющих, а для высокочастотных составляющих пропускание фильтра росло по мере удаления от оси пучка, что и явилось причиной появления эффекта оконтуривания.

Четвёртая глава диссертационной работы представляет результаты теоретических и экспериментальных исследований АО метода визуализации оптического волнового фронта.

АО метод визуализации был предложен некоторое время тому назад. Однако до настоящего момента были проведены только предварительные исследования метода применительно к визуализации одномерных фазовых объектов. В диссертации проблема АО визуализации изучена в самой широкой постановке применительно к визуализации двумерных фазовых объектов. Кроме того, предложен и исследован АО метод отдельной визуализации амплитудной и фазовой структуры оптического сигнала. Сущность АО метода визуализации фазовых объектов заключается в следующем. В фазово-модулированной световой волне, которую для одномерного случая можно записать в виде $u_{in} = u_0 \exp[j\gamma(z)]$ направление волновой нормали меняется вдоль волнового фронта по закону

$$\mathcal{G}_i(z) = \frac{1}{k_0} \frac{d\gamma}{dz} \equiv \frac{\gamma'}{k_0}, \quad (5)$$

где k_0 - волновое число, а $\gamma'(z) = d\gamma/dz$ - фазовый градиент. При прохождении такой волны через АО ячейку, работающую в брэгговском режиме дифракции, разные участки светового пучка, благодаря угловой селективности, дифрагируют с различной эффективностью. В результате дифрагированная волна оказывается промодулированной по интенсивности пропорционально локальным значениям фазового градиента $\gamma'(z)$. Таким образом, закон преобразования фазы в интенсивность имеет специфический характер: $I_{out} \sim \gamma'$. При АО визуализации фазовых объектов на результирующее изображение сильное влияние оказывает геометрия АО взаимодействия и, следовательно, форма передаточной функции АО ячейки.

Расчет характеристик системы визуализации выполнен для одномерных фазовых объектов в предположении, что визуализируемое световое поле промодулировано по фазе по гармоническому закону с периодом d и амплитудой γ_0 . Показано, что эффект визуализации сильно зависит от выбора рабочей точки на передаточной функции, или, другими словами, от угла падения визуализируемого пучка. Если пучок падает на ячейку под углом Брэгга, как это всегда бывает при обработке амплитудных изображений, эффект визуализации отсутствует. Визуализация происходит, когда рабочая точка выбирается на склоне передаточной функции. Показано, что наилучший результат получается при выборе рабочей точки на участке передаточной функции с наибольшей крутизной ее склона.

Также в четвертой главе представлены результаты компьютерного моделирования АО визуализации двумерных фазовых объектов, иллюстрирующие возможности АО метода. Моделирование выполнено по тому же алгоритму, что и при обработке амплитудных объектов. Рис. 5 иллюстрирует результаты моделирования визуализации в первом порядке тангенциальной геометрии АО взаимодействия. В этом случае предполагалось, что фазовый объект представляет собой однородную прозрачную пластинку, на которой concentрически расположены плоские кольцо и диск, сделанные из того же материала. Для визуализации использовалась передаточная функция представленная на рис. 5а. Рис. 5б,в показывают визуализированные изображения объекта для разных положений рабочих точек, указанных цифрами 1 и 2 на рис. 5а. В обоих случаях рабочие точки расположены на склоне передаточной функции так, чтобы визуализировать фазовый градиент в направлении под углом 45° к горизонтали. Благодаря особенностям

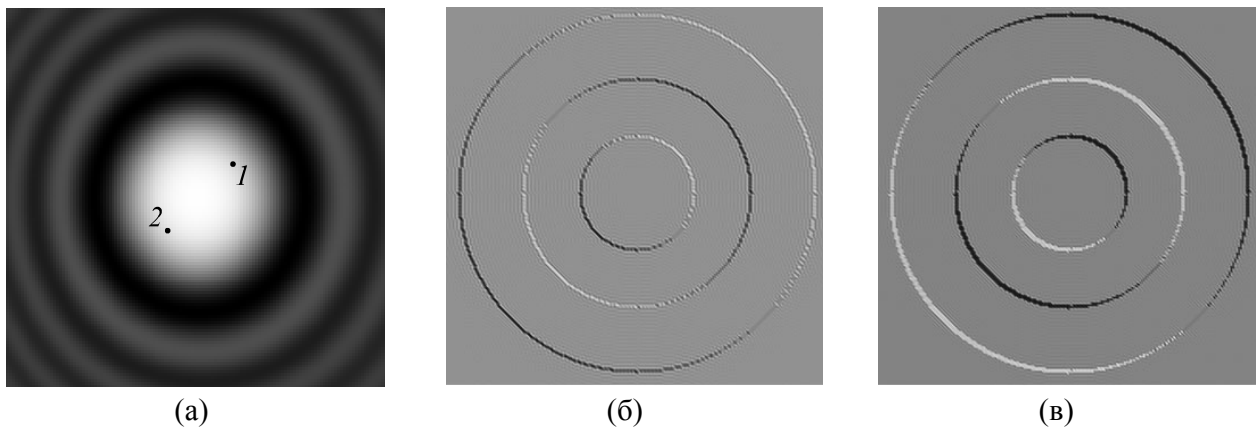


Рис. 5. АО визуализация фазового объекта с использованием передаточной функции тангенциальной геометрии.
 (а) - передаточная функция; (б),(г) - выходные изображения.

АО визуализации, получается псевдообъемное изображение волнового фронта, словно подсвеченное сверху и справа – в случае рис. 5б и слева и снизу в случае рис. 5в. Так происходит потому, что при смещении рабочей точки с одного склона на другой имеет место инверсия контраста.

Одним из достоинств АО метода и его существенным отличием от других известных на сегодняшний момент методов регистрации фазовых объектов является возможность осуществлять разделение амплитудной и фазовой информации, присутствующей в исходном оптическом сигнале. Если выбирая рабочие точки на противоположных склонах передаточной функции (например, как это показано на рис. 6а), последовательно получить два изображения $I_1(y, z)$ и $I_2(y, z)$, то в этих изображениях амплитудная информация будет идентична, а фазовая информация, благодаря различию в знаках градиента, будет иметь инверсный характер. Результатом электронной обработки сигналов $I_1(y, z)$ и $I_2(y, z)$ в соответствии с формулой

$$I_\varphi = \frac{I_1(y, z) - I_2(y, z)}{I_1(y, z) + I_2(y, z)} \quad (6)$$

будет визуализация распределения фазы в чистом виде. Рассмотрено три возможных варианта реализации такого метода. В первом и втором вариантах смещение рабочей точки на противоположный склон передаточной функции осуществляется при перестройке угла падения света или частоты ультразвука. В третьем варианте предлагается использование особой геометрии АО взаимодействия с рассеянием света одновременно в два дифракционных максимума +1-го и -1-го порядков. При этом, отстроив частоту

ультразвука от частоты брэгговского синхронизма f^* на величину

$$\Delta f \approx \pm \frac{V^2 n}{2\lambda f^*}, \quad (7)$$

можно зарегистрировать на выходе АО ячейки одновременно два визуализированных изображения $I_1(y, z)$ и $I_2(y, z)$, соответствующих положениям рабочей точки на противоположных склонах передаточной функции. Обработка этих изображений в соответствии с формулой (6) позволяет производить визуализацию волнового фронта в режиме реального времени.

В последнем разделе четвертой главы представлены результаты экспериментального исследования АО метода визуализации оптического волнового фронта. В качестве визуализируемого объекта использовалась капля жидкости (масла), зажата между двумя параллельными стеклянными пластинками. Такой объект должен производить только фазовую модуляцию проходящего через него света и не должен быть виден при обычном способе наблюдения. В реальности же граница раздела жидкости и воздушной прослойки дает рассеяние света в широком угловом диапазоне, превышающем угловую апертуру входного объектива. В результате этого в выходном изображении граница капли оказывается четко очерчена темной линией, одинаковой вдоль всей границы. Эта граница в виде овала хорошо видна на рис. 6а, полученном при выключенном ультразвуке.

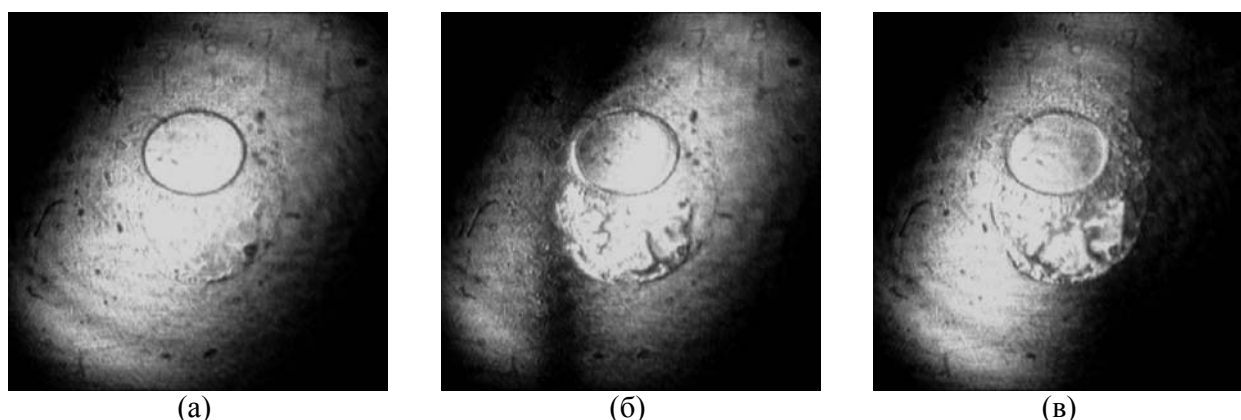


Рис. 6. Экспериментальные результаты АО визуализации фазовых объектов. (а) – входное изображение; (б), (в) – отфильтрованные изображения при различных частотах ультразвука.

Рис. 6б, в демонстрируют отфильтрованные изображения объекта при различных частотах ультразвука. Они содержат больше информации об объекте, чем рис. 6а. В нижней части картины (ниже овальной капли) проявились детали изображения, которые

отсутствовали на рис. 6а. Дело в том, что помимо капли масла, зажатой между стеклянными пластинками, на одной из пластинок был нанесен слой масла толщиной меньшей, чем расстояние между пластинками. Этот слой оказался переменной толщины и представлял собой идеальный фазовый объект. В полном соответствии с компьютерным моделированием, здесь видно псевдообъемное изображение исследуемого объекта. Наибольший контраст изображения получается в области, на которую приходится наибольшая крутизна передаточной характеристики АО фильтра. Таким образом, плавно изменяя частоту ультразвука и тем самым изменяя контраст различных частей изображения, можно наблюдать наиболее интересные области визуализируемого объекта и производить измерения фазового объекта в режиме реального времени.

Использованный в этом эксперименте объект не являлся идеальным фазовым объектом. Поэтому, полученная информация о распределении фазы в световой волне была искажена наложением паразитных амплитудных составляющих – границ раздела жидкости и воздушной прослойки, интерференционных полос, частиц пыли, царапин на оптике и пр. Амплитудные детали видны как в отсутствии ультразвука (рис. 6а), так и в отфильтрованных изображениях (рис. 6б,в). В соответствии с предложенным методом разделения амплитудной и фазовой модуляции, по алгоритму (6) были обработаны парные изображения, полученные при разных положениях рабочей точки. Смещение рабочей точки осуществлялось изменением частоты ультразвука. Рис. 7 демонстрирует результат эксперимента. Видно, что паразитные амплитудные составляющие сигнала почти полностью исчезли и не мешают наблюдению волнового фронта в виде псевдообъемной структуры.

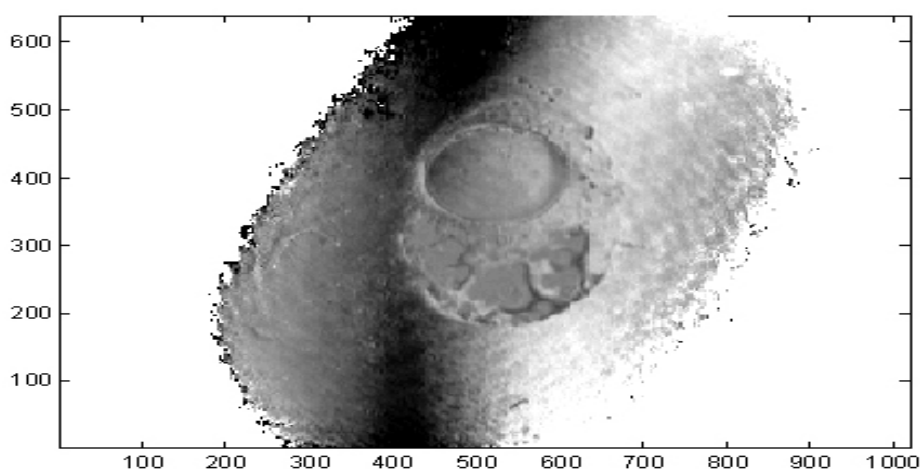


Рис. 8. Визуализация фазового объекта отдельно от паразитных амплитудных составляющих.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Впервые исследована и подробно описана пространственная структура АО фазового синхронизма для разных срезов одноосного кристалла, направлений акустической волны и частот ультразвука. Показано, что совокупность углов Брэгга анизотропной дифракции образует сложные конические поверхности с направляющими, форма и пространственная ориентация которых определяются анизотропией оптических и акустических свойств кристалла, а также направлением распространения и частотой ультразвука.

2. Впервые проведен теоретический анализ двумерной структуры передаточных функции АО ячейки. Показано, что в одноосных кристаллах возможны различные виды передаточных функций: в форме дуги, ориентированной под разными углами к главной плоскости АО взаимодействия, в форме кольца с аксиальной симметрией (в области тангенциальной геометрии) и в форме креста (в области коллинеарной геометрии). Установлено на примере кристалла парателлуриата, что сильная анизотропия АО качества может существенно изменить форму передаточной функции. Разнообразие видов передаточных функций дает широкие возможности для формирования световых пучков с необходимой пространственной структурой и для пространственной фильтрации изображений.

3. Эксперименты по визуализации передаточных функций, выполненные с АО ячейками на основе кристаллов парателлуриата и молибдата кальция, показали хорошее соответствие наблюдавшейся формы передаточных функций с результатами расчетов.

4. Впервые выполнен детальный расчет пространственно-частотных характеристик системы АО обработки изображений для случаев пространственной фильтрации в нулевом и первом порядках брэгговской дифракции и в разных геометриях АО взаимодействия. Установлено, что квазиортогональная геометрия позволяет осуществлять узкополосную фильтрацию, тогда как тангенциальная и коллинеарная геометрии оптимальны для обработки изображений с высоким разрешением. При помощи компьютерного моделирования продемонстрированы различные виды АО обработки изображений, такие как интегрирование и оконтуривание, а также выборочное дифференцирование и интегрирование. Показано, что АО метод позволяет быстро (в течение нескольких микросекунд) перестраивать передаточную функцию и таким образом переходить от

одного вида обработки изображений к другому. Это позволяет обрабатывать изображения в реальном масштабе времени.

5. Создан макет системы АО фильтрации изображений на основе ячейки из кристалла парателлуриата 4^о-го среза, работавшей в диапазоне частот 40÷70 МГц, на котором в режиме анизотропной дифракции на длине волны света 632.8 нм экспериментально проверены основные выводы теории. Полученные отфильтрованные изображения хорошо соответствуют результатам теоретического анализа.

6. Впервые теоретически и экспериментально исследован АО метод визуализации двумерных фазовых объектов. Показано, что в зависимости от выбора положения рабочей точки на передаточной функции можно реализовать различные законы преобразования фазовой модуляции светового поля в модуляцию интенсивности. Наибольший интерес представляет вариант, когда распределение интенсивности в выходном сигнале пропорционально градиенту фазы исходного светового поля. Установлено, что в этом случае контраст визуализированного изображения пропорционален глубине фазового рельефа исходного изображения, а разрешение определяется расходимостью акустического пучка. Впервые экспериментально получены изображения фазового объекта АО методом.

7. Предложен и детально исследован АО метод отдельной визуализации амплитудной и фазовой структуры светового поля, заключающийся в регистрации и последующей обработке двух изображений, полученных при симметричных положениях рабочей точки на противоположных склонах передаточной функции. Показано, что эти два изображения могут регистрироваться как последовательно в одном дифрагированном пучке при перестройке угла падения света или частоты ультразвука, так и одновременно в двух дифракционных максимумах при использовании особой геометрии анизотропной дифракции света. Работоспособность метода подтверждена с помощью компьютерного моделирования, а также при его экспериментальной реализации.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Kostyuk D.E.** Optical image processing by means of acousto-optic spatial filtration. // *J. Modern Optics*, 2004, v. 52, №1, pp.1-20.
2. **Балакший В.И., Костюк Д.Е.** Пространственная структура акустооптического фазового синхронизма в одноосных кристаллах. // *Оптика и спектроскопия*, 2006, т.101, №2, с.283-289.
3. **Балакший В.И., Костюк Д.Е.** Применение тангенциальной геометрии акустооптического взаимодействия для визуализации фазовых объектов. // *Оптика и спектроскопия*, 2008, т.104, №4, с.680-686.
4. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Application of acousto-optic selectivity for optical image processing. // *Proc. SPIE*, 2004, v.5828, pp.95-104.
5. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Phase object visualization at Bragg acousto-optic interaction. // *Proc. SPIE*, 2004, v.5828, pp.84-94.
6. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Application of Bragg acousto-optic interaction for optical wavefront visualization. // *Proc. SPIE*, 2005, v.5953, pp.136-147.
7. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Acousto-optic selection of optical spatial frequencies in uniaxial crystals. // *Proceedings of 32nd Winter School "Molecular and Quantum Acoustics"*, Szczyrk, Poland, 2003, pp.169-175.
8. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** The usage of acousto-optic spatial filtration in optical image processing. // *Proceedings of VI International Conference for Young Researchers WECNF-2003*, St.Petersburg, 2003, pp.A1-A10.
9. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Visualization of light field phase structure in tangential geometry of acousto-optic interaction. // *Proceedings of IX International Conference for Young Researchers WECNF-2006*, St.Petersburg, 2006, pp.10-16.
10. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Visualization of phase objects in geometry of tangential acousto-optic interaction. // *J. Phys. IV*, 2006, v.137, pp.3-8.
11. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Simulation of acousto-optic spatial filtration of images in uniaxial crystals. // *Proc. of 2nd young scientists school «Optics-2002»*, St.Petersburg, 2002, pp.148-149.
12. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Measurements of optic signals phase structure by means of Bragg acousto-optic interaction. // *Proc. 2 Int. Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, Yalta, 2005, v.2, pp.234-237.

13. **Костюк Д.Е.** Пространственная АО фильтрация в одноосных кристаллах. // *Тезисы 10-й Межд. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам “Ломоносов-2003”, секция “Физика”*. – М., 2003, с.145-147.
14. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** The usage of acousto-optic spatial filtration in optical image processing. // *Abstracts of VI International Conference for Young Researchers WECONF-2003*, St.Petersburg, 2003, pp.26-28.
15. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Phase object visualization of Bragg acousto-optic interaction. // *Archives of Acoustics*. 2004, v.29, №3, p.504.
16. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Application of Bragg acousto-optic interaction for optical wavefront visualization. // *Abstracts of Int. Congress “Optics and Optoelectronics”*, Warsaw, Poland, 2005, p.117.
17. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Visualization of phase objects in geometry of tangential acousto-optic interaction. // *Abstracts of 35th Winter School on Wave and Quantum Acoustics*, Ustron, Poland, 2006, p.21.
18. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Visualization of phase objects in geometry of tangential acousto-optic interaction. // *Archives of Acoustics*, 2006, v.31, №1, p.128.
19. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Visualization of light field phase structure in tangential geometry of acousto-optic interaction. // *Abstracts of IX International Conference for Young Researchers WECONF-2006*, St.Petersburg, 2006, p.20.
20. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Using of tangential geometry of acousto-optic interaction in light field phase structure visualization. // *Abstracts of International Conference “Optics and High Technology Material Science SPO 2006”*, Kiev, 2006, p.113.
21. Experimental investigation of image processing by means of acousto-optic spatial filtration, // *Abstracts of 36th Winter School on Wave and Quantum Acoustics*, Wisla, Poland, 2007, p.22.
22. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Image processing by means of acousto-optics. // *Abstracts of X International Conference for Young Researchers WECONF-2006*, St.Petersburg, 2007, p.16.

Подписано к печати 15.04.2008
Тираж 100 Заказ 1

Отпечатано в ООО «Большая Медведица».