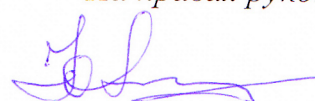


*На правах рукописи*



МОКРУШИН Юрий Михайлович

**АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОМ В ГИРОТРОПНЫХ  
КРИСТАЛЛАХ**

Специальность: 01.04.03 – радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург–2012

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Бирюков Александр Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор  
Липовский Андрей Александрович

доктор технических наук  
Гуревич Борис Симхович

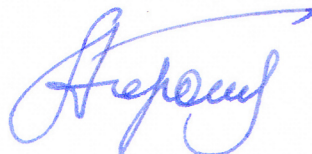
Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики

Защита состоится 28 марта 2012 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II уч. корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук  
профессор



Коротков А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию акустооптического взаимодействия излучения импульсных лазеров с ультразвуком, происходящего в кристаллическом звукопроводе акустооптических модуляторов из парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), обладающего гиротропными свойствами.

**Актуальность проблемы.** Создание устройств, способных отображать большой объем информации при высоком качестве воспроизводимого изображения представляет практический интерес в таких областях науки и техники, как оптическая обработка информации, запись информации на различные виды носителей, воспроизведение телевизионных изображений, связь и других, где мы имеем дело с большими потоками информации в реальном масштабе времени.

В настоящее время большие усилия ведущих электронных компаний мира направлены на создание телевизионных систем отображения информации с использованием лазерных источников света. Лазеры обеспечивают высокую яркость и недостижимый для ламп и люминофоров цветовой контраст в изображении. Среди лазерных источников выделяются импульсные лазеры, позволяющие осуществлять эффективное нелинейное преобразование излучения в другие участки видимого спектра и, таким образом, охватить весь существующий для зрительного восприятия диапазон длин волн. Одним из перспективных методов формирования изображения в реальном масштабе времени для этих лазеров является метод импульсной проекции изображения амплитудно-модулированной ультразвуковой строки, которая заполняет апертуру акустооптического модулятора.

В рассматриваемом способе модуляции отсутствует высокоскоростная развертка по строке, а также, в отличие от существующих методов, которые используют матричные модуляторы, нет дискретной структуры в изображении. Оно формируется в реальном времени без задержки и лучше согласуется с последовательным способом передачи информации по каналу связи. Размеры изображения при этом могут легко трансформироваться без изменения самих устройств модуляции. При записи информации на различные виды носителей имеется возможность осуществления когерентной оптической обработки этой информации. Возможность использования полностью акустооптических устройств управления для рассматриваемой системы позволяет для целого ряда задач отказаться от таких механических устройств управления, как

зеркальные сканаторы, многогранные вращающиеся призмы, матрицы и линейки микрозеркал. Кроме того, используемые в системе кристаллические среды для модуляторов могут выдерживать большие средние и импульсные мощности лазерного излучения, что позволяет использовать рассматриваемые системы в технологических целях.

Несмотря на то, что импульсный метод формирования изображения давно известен, существует много нерешенных вопросов, связанных с эффективностью и качеством формирования изображения при помощи наиболее эффективных в настоящее время акустооптических модуляторов (АОМ) на кристалле парателлуриита ( $\text{TeO}_2$ ) [1] при амплитудной модуляции ультразвука. Сложность задачи заключается в том, что акустооптическую дифракцию необходимо рассматривать для анизотропной гиротропной среды, которой является кристалл  $\text{TeO}_2$ , и для промежуточного режима дифракции света на звуке. Неясен вопрос о перспективах практического применения данного метода для отображения полноцветной телевизионной информации на больших экранах в стандарте высокой четкости.

Необходимо также рассмотреть вопрос об оптимизации выходных параметров лазера для целей формирования изображения импульсным методом. В диссертационной работе в качестве такого источника выбран лазер на парах меди, который остается одним из самых мощных источников светового излучения в видимой области спектра и по своим выходным характеристикам достаточно хорошо согласуется с требованиями, предъявляемыми к импульсной системе формирования изображения. В России продолжаются работы по совершенствованию этих лазеров в направлении повышения эффективности накачки и практического коэффициента полезного действия [2].

Настоящая диссертация является завершающей по циклу работ, проводившихся на кафедре "Квантовая электроника" СПбГТУ, связанных с теоретическим рассмотрением процесса дифракции света на звуке методом интегрального уравнения [3÷6, А11, А58÷А60], а также с работами по практическому созданию лазеров на парах меди и акустооптических устройств управления лазерным излучением для систем отображения и записи информации [А27, А33, А34, А38, А42, А50].

### **Цели и задачи диссертационной работы.**

Целью работы является развитие теории акустооптического взаимодействия для анизотропных кристаллических сред, обладающих гиротропными свойствами, и на ее

основе разработана методика расчета пространственного распределения интенсивности светового излучения на проекционном экране при дифракции импульсного лазерного излучения на амплитудно-модулированном ультразвуковом сигнале в кристалле парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ).

Для достижения указанной цели были поставлены и решались следующие задачи.

1. Разработка методики численного расчета амплитуд дифрагированных световых волн при анизотропной дифракции света на медленной сдвиговой упругой волне, распространяющейся в кристалле  $\text{TeO}_2$  вблизи его оптической оси в промежуточном режиме и при больших амплитудах ультразвукового возмущения.
2. Определение закономерностей формирования светового изображения в акустооптической системе с импульсным лазером при дифракции света на амплитудно-модулированной ультразвуковой волне.
3. Разработка методики расчета эффективности дифракции в зависимости от амплитуды и частоты модуляции, а также определение границ применимости математических методов для расчета интенсивности световых полей.
4. Создание и исследование работы прототипа лазерной проекционной системы отображения и записи ТВ информации, в которой используется импульсный лазер на парах меди в качестве основного излучения или излучения накачки и акустооптический модулятор на парателлурите.
5. Исследование возможности создания цветной акустооптической системы отображения информации с импульсными лазерами, работающей в стандарте высокой четкости.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Развита теория дифракции света на звуке в гиротропном кристалле парателлурита для анизотропной широкополосной геометрии рассеяния вблизи оптической оси кристалла в промежуточном режиме дифракции.
2. На основе решения интегрального уравнения, полученного путем введения эквивалентных токов и разложения искомого поля по плоским волнам в среде взаимодействия, предложена методика расчета амплитуд дифрагированных световых полей для выбранного дифракционного порядка в приближении высоких порядков взаимодействия.

3. Предложена методика расчета двумерного распределения интенсивности светового поля в +1 дифракционном порядке для сходящегося светового пучка в фокальной плоскости входной цилиндрической линзы, а также среднего по времени распределения интенсивности света от импульсного когерентного источника в плоскости изображения.
4. Для акустооптической системы формирования изображения строки с импульсным лазером на парах меди и АОМ из  $\text{TeO}_2$  теоретически рассчитаны:
  - контраст в изображении модулированного по гармоническому закону ультразвукового сигнала для различных частот модуляции, длительностей светового импульса, несущих частот ультразвука, длины акустооптического взаимодействия, а также конуса углов падения света на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости рассеяния
  - нелинейные искажения в сигнале изображения и эффективность дифракции в зависимости от индекса и частоты модуляции, а также определены границы применимости приближения первого и третьего порядков взаимодействия при их расчетах.
5. Сформулированы требования, предъявляемые к источнику лазерного излучения, оптической системе, характеристикам акустооптического модулятора и параметрам управляющих сигналов, позволяющие формировать при помощи рассматриваемой системы изображение высокого качества.
6. Результаты теории экспериментально подтверждены при исследовании характеристик акустооптических систем для проекции изображений и записи информации с импульсными лазерами на парах меди для основного и преобразованного в другой диапазон длин волн (синяя линия) излучения на частотах повторения, соответствующих строчной частоте ТВ системы.
7. Предложены экспериментальные установки для реализации многоцветных систем отображения и записи информации, работающие по принципу формирования строки за один импульс излучения лазера в стандарте повышенной четкости изображения.

### **Научно-практическая ценность результатов работы**

Результаты теоретического исследования носят общий характер и могут быть использованы для нахождения дифрагированных световых полей в промежуточном



режиме для произвольных геометрий акустооптического взаимодействия для акустических кристаллов, обладающих, в том числе, и гиротропными свойствами. Эти результаты позволяют рассчитать дифрагированные световые поля в промежуточном режиме дифракции для сложного частотного спектра ультразвукового сигнала и при его амплитудном распределении по двум координатам в звукопроводе.

Результаты теоретического рассмотрения дифракции света на амплитудно-модулированном ультразвуковом сигнале также справедливы для непрерывного лазера и лазера, работающего в режиме синхронизации мод с пикосекундной длительностью световых импульсов. Это распространяет результаты исследования на другие лазерные проекционные системы, в которых используются акустооптические модуляторы на парателлурите.

Исследование характеристик акустооптической системы с импульсным методом формирования строки для отображения и записи информации с использованием лазеров на парах меди позволяет распространить результаты диссертационной работы на системы с использованием полноцветных импульсных твердотельных лазеров.

Разработанный прототип акустооптической системы формирования телевизионных изображений может найти применение для управления излучением мощных импульсных лазеров, а также в специальных системах, требующих, например, отсутствия механических систем отклонения лазерного луча, а также в подводной локации.

**Реализация результатов работ.** На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан ряд акустооптических устройств и лазерных систем, защищенных авторскими свидетельствами и патентом России, в том числе:

акустооптические модуляторы и дефлекторы на кристалле  $\text{TeO}_2$  с преобразованием типов упругих мод на боковой грани звукопровода, позволяющие производить коррекцию направления распространения ультразвуковой волны на конечной стадии изготовления после приварки пьезопреобразователя [А3]; прототип акустооптической системы отображения телевизионной информации с лазером на парах меди [А19]; магнитный генератор импульсов накачки лазера на парах меди [А14], лазеры на парах меди с внутриврезонаторным акустооптическим управлением спектральными, амплитудными и временными характеристиками выходного излучения [А50].

Результаты работ, вошедших в диссертацию, были использованы при реализации НИР, проводившихся на кафедре квантовой электроники СПбГПУ со следующими

учреждениями и организациями: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ВНИИРА (Санкт-Петербург), НПО "Исток" (Фрязино), ГОИ им. С.И. Вавилова, СКБ АП (Санкт-Петербург), а также с рядом Российских и зарубежных организаций занимающихся системами отображения информации, лазерной подсветкой и лазерной технологией.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Теория дифракции света на звуке в гиротропном кристалле парателлурита для анизотропной широкополосной геометрии рассеяния вблизи оптической оси кристалла в промежуточном режиме дифракции.

2. Методика расчета амплитуд дифрагированных световых полей для выбранного дифракционного порядка в приближении высоких порядков взаимодействия.

3. Методика расчета двумерного распределения интенсивности светового поля в +1 дифракционном порядке для сходящегося светового пучка в фокальной плоскости входной цилиндрической линзы, а также среднего по времени распределения интенсивности света от импульсного когерентного источника в плоскости изображения.

4. Расчет эффективности дифракции в зависимости от индекса и частоты модуляции, а также границ применимости приближения первого и третьего порядков взаимодействия.

5. Методика расчета контраста и нелинейных искажений в изображении при больших амплитудах входного гармонического сигнала для акустооптической системы формирования изображения строки с импульсным лазером и АОМ из  $\text{TeO}_2$  для различных частот модуляции, длительностей светового импульса, несущих частот ультразвука, длины акустооптического взаимодействия, а также конуса углов падения света на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости рассеяния.

4. Общая схема построения акустооптической системы отображения информации с импульсным лазером на парах меди, а также примеры практической реализации и исследования отдельных узлов и элементов этой системы:

- лазера на парах меди с внутривибраторным акустооптическим управлением его спектральными и временными характеристиками,
- системы из двух лазеров на парах меди с управляемыми спектральными и временными характеристиками и с инъекцией светового пучка в мощный лазер,
- конструкции акустооптических модуляторов и дефлекторов,
- широкополосных электронных устройств управления,



– оптической схемы проекционного устройства отображения информации, позволяющей эффективно совместить изображения на разных длинах волн излучения лазера, а также уменьшить плотность мощности светового излучения в кристалле АОМ.

5. Результаты экспериментального исследования получения синей линии (450 нм) в лазере на титан-сапфире с накачкой от лазера на парах меди и преобразованием излучения во вторую гармонику.

6. Результаты экспериментального исследования выходных характеристик и нелинейных искажений акустооптической проекционной системы отображения телевизионной информации с лазером на парах меди.

### **Апробация работы.**

Результаты исследований и разработок автора докладывались на национальных и международных конференциях, симпозиумах и семинарах в Австралии, США, Канаде, Финляндии и России. В частности, на конференции «Физпром-96» лазерная проекционная система была отмечена как лучшая разработка. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 4-ой Всесоюзной конференции "Оптика лазеров", г. Ленинград, 1984 г.; Всесоюзной научно-техн. конф. "Развитие и совершенствование телевизионной техники", г. Львов, 1984 г.; 2-й Всесоюзной конф. "Формирование оптического изображения и методы его обработки", г. Кишинев, 1985 г.; 6-ой Всесоюзной школе-семинаре по оптической обработке информации, г. Фрунзе, 1986 г.; Всесоюзных семинарах "Лазеры на парах металлов и их применение", г. Новороссийск, 1982, 1985 г.г.; 3-ей Всесоюзной конф. "Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации", г. Таллинн, 1987 г.; 3-ей Всероссийской научн. конф. "Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул", г. Звенигород, 1998 г.; Всероссийских симпозиумах "Лазеры на парах металлов", г. Ростов на Дону, 2000, 2004, 2006, 2008 г.г.; Gordon Conference, USA. Denver, Colorado, 1995 г.; International Conference. "Physprom 96", Moskva (Golizino), 1996 г.; Second International Conference on Optical Information Processing, St.Petersburg, Russia, 1996 г.; XX International Quantum Electronics Conference, Sydney, Australia, 1996 г.; Int. Conf. on Advances in Acousto-Optics, St.Petersburg, Russia, 1997 г.; Int. Conf. on Diffractive Optics, Savonlinna, Finland, 1997 г.; Int. Conf. on LASER`98 MG.9.– Tucson, Arizona. USA, 1998 г.; Int. Conf. on LASER`99, Quebec, Canada, 1999 г.; XI Conference on Laser Optics, St.Petersburg, Russia, 2003 г.; 7<sup>th</sup> Int. Conf. Atomic and molecular pulsed laser, Tomsk,

2005 г.; Photorefractive fiber and crystal devices: Materials, Optical properties, and Applications: XII, San Diego, California, USA, 2006, 2007 г.г..

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры квантовой электроники в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, в лаборатории квантовой радиоэлектроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения, в оптической лаборатории ФИАН им. П.Н. Лебедева.

**Публикации.** Основные научные результаты изложены в 61 научных работах, из которых 19 работ было опубликовано в зарубежных рецензируемых журналах и журналах из списка ВАК. Список основных работ приведен в конце диссертации.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертационной работе результаты были получены автором лично, либо под его непосредственным руководством в период с 1980 по 2011 г. В начале работы постановка задач и выбор теоретических методов исследований осуществлялись совместно с проф. В.Ю. Петрунькиным и проф. И.А. Водоватовым. Работы по созданию экспериментальной базы исследований и проведению первых экспериментов проводились совместно с кандидатами технических наук А.Г. Кузиным и Р.И. Окуневым. Акустооптические модуляторы из парателлурита изготавливались в разные промежутки времени Л.Н. Аснис (ГОИ), А.Г. Кузиным (ЛИАП) и О.В. Шакиным (ФТИ). Разработка электронных устройств для лазеров и систем управления производилась совместно с Ю.Г. Градобоевым. Эксперименты по преобразованию излучения лазера на парах меди в другой диапазон длин волн проводились вместе с доцентами С.В. Кружаловым и В.А. Парфеновым.

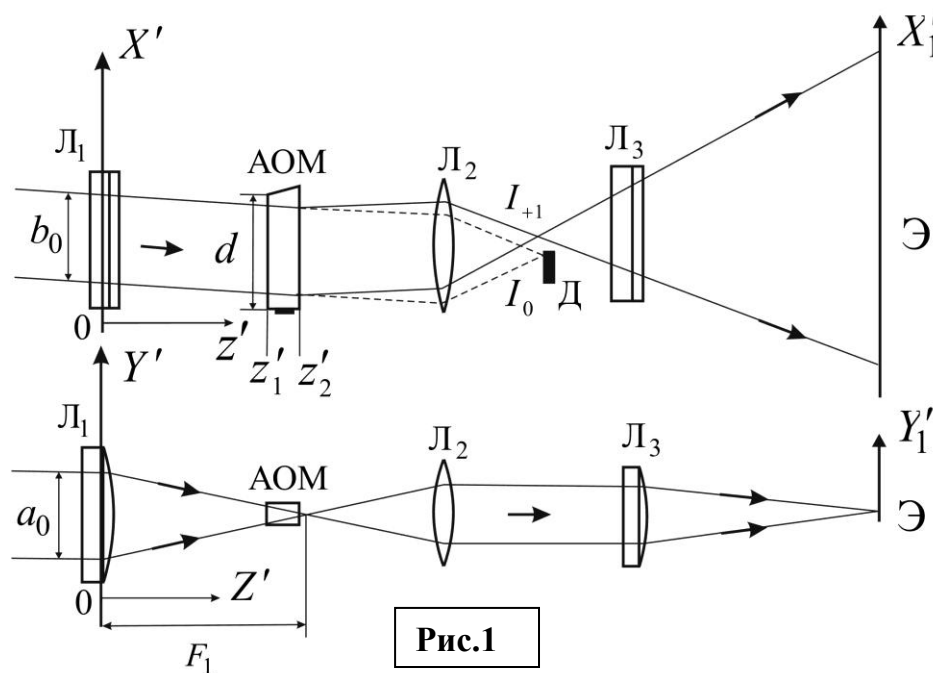
**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, 4-х приложений и списка использованных источников. Общий объем диссертации – 312 страниц, 81 рисунок в основной части и 26 рисунков в приложении, 4 таблицы, библиография содержит 234 наименования.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту, приводится информация о личном вкладе и публикациях автора диссертации, кратко

излагается ее содержание.

В главе 1 дается анализ современного состояния работ в области создания устройств отображения телевизионной информации с использованием лазеров. Особое внимание уделено системам прямого действия, в которых осуществляется формирование изображения на экране в результате модуляции и отклонения световых лазерных пучков. Показано, что широкое использование существующих систем с непрерывными лазерами ограничивается низкой эффективностью используемых непрерывных лазеров, а также сложностью реализации высокоскоростной строчной развертки. С другой стороны, имеющиеся в настоящее время международные успехи в области создания импульсных твердотельных RGB лазеров, а также в области технологии изготовления акустооптических модуляторов на основе высокоэффективных акустооптических кристаллов позволяют надеяться на возможность построения телевизионных систем отображения информации, основанных на импульсной проекции всей строки за один импульс излучения лазера. В главе приводится обзор современного состояния импульсных лазеров и акустооптических устройств отклонения и модуляции лазерного излучения, которые могут быть использованы для реализации данной системы отображения информации. В конце главы предлагается конкретный вариант построения оптической схемы устройства отображения информации с использованием импульсного лазера и акустооптического модулятора на основе кристалла парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), которая взята за основу при теоретическом рассмотрении процесса формирования изображения строки (рис.1) на проекционном экране.



**Рис.1**

Рис. 1. Оптическая схема системы формирования изображения строки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: АОМ– акустооптический модулятор;  $L_1$  – входная цилиндрическая линза;  $L_2, L_3$  – лин-

зы объектива; Э – экран; Д – диафрагма;  $I_0, I_{+1}$  – интенсивности падающего и дифрагированного световых лучей;  $a_0, b_0$  – размеры светового пучка по двум координатам;  $F_1$  – фокусное расстояние  $L_1$ ;  $d$  – размер акустооптического модулятора по оси  $X'$ .

**Глава 2** посвящена теоретическому рассмотрению процесса формирования изображения строки при дифракции света на звуке в акустооптическом модуляторе на кристалле  $\text{TeO}_2$ . Рассматривается однородная анизотропная немагнитная и непроводящая среда, обладающая слабой пространственной дисперсией. Материальное уравнение для такой среды имеет вид [7]:

$\mathbf{D} = (\widehat{\varepsilon}^0 + i\widehat{\gamma} \cdot \mathbf{k})\mathbf{E}$  ;  $D_i = (\varepsilon_{ij}^0 + i\gamma_{ijl} \cdot \kappa_l)E_j$  (1) , где  $\mathbf{D}$  – вектор смещения,  $\mathbf{E}$  – вектор электрического поля,  $\widehat{\varepsilon}^0$  – тензор диэлектрической проницаемости среды,  $\widehat{\gamma}$  – тензор третьего ранга, антисимметричный по первым двум индексам, характеризующий гиротропию среды,  $\mathbf{k}$  – волновой вектор электромагнитного поля. В среде взаимодействия распространяется ультразвуковая волна, которая вызывает деформацию, приводящую к изменению компонент тензора диэлектрической непроницаемости среды на величину

$\Delta\eta_{ij} = P_{ijfp} \cdot \xi_{fp} = \xi \cdot P_{ijfp} \cdot \xi_{fp}^0$  (2) , где  $P_{ijfp}$  и  $\xi_{fp}$  – компоненты тензоров фотоупругости и деформации в выбранной системе координат. В среде взаимодействия вводятся эквивалентные токи

$$\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{\text{экв}} = \begin{cases} \frac{i\omega}{c} \widehat{\varepsilon}^0 \cdot \widehat{\Delta\eta} \cdot \widehat{\varepsilon}^0 \cdot \mathbf{E} & , |z| \leq \frac{L}{2} \\ 0 & , |z| > \frac{L}{2} \end{cases} \quad (3) , \text{ где } L \text{ – ширина звукового пучка, } \widehat{\varepsilon}^0 \text{ –}$$

невозмущенный тензор диэлектрической проницаемости среды в отсутствии гиротропии. Решение уравнений Максвелла в такой среде сводится к решению интегрального

уравнения вида:  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathcal{L}(\mathbf{j}_{\text{экв}}) = \mathbf{E}_i + \mathcal{L}\left(\frac{i\omega}{c} \widehat{\varepsilon}^0 \cdot \widehat{\Delta\eta} \cdot \widehat{\varepsilon}^0 \cdot \mathbf{E}\right)$  (4) , где  $\mathbf{E}_i$  – падающая

световая волна,  $i = 1, 2$ ;  $\mathcal{L}$  – некоторый интегральный оператор. Вывод интегрального уравнения для дифрагированного поля основан на применении леммы Лоренца и разложения искомого поля по плоским волнам в среде взаимодействия. Конкретный вид интегрального уравнения зависит от выбора геометрии акустооптического взаимодействия, от типов взаимодействующих световой и звуковой волн.

Методом последовательных приближений найдено общее выражение для дифрагированного на ультразвуке светового поля, справедливое для анизотропной немагнитной среды, обладающей гиротропными свойствами:

$$\mathbf{E} = \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{E}^{(n)}, \mathbf{E}^{(0)} = \mathbf{E}_i = \mathbf{U}_{d_0} \cdot e^{i(\mathbf{k}_{d_0} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} = \mathbf{U}_{d_0} \cdot e^{i \left[ \frac{2\pi}{\lambda_0} n_d^0 (\cos \theta_0 \cdot z - \sin \theta_0 \cdot x) - \omega t \right]}, \quad d_0=1,2. \quad (5)$$

$$\mathbf{E}^{(n)} = \sum_{d_0} \sum_{d_1} \dots \sum_{d_n} \left( -\frac{i}{2} \right)^n \cdot \int_{k_{d_n}} \mathbf{U}_{k_{d_n}} \cdot e^{i(\mathbf{k}_{d_n} \cdot \mathbf{r} - \omega_n t)} \cdot \int_{k_{d_{n-1}}} \dots \int_{k_{d_1}} \prod_{m=0}^{n-1} \chi_{d_{m+1}d_m}^{(m)} \times \\ \times e^{-i(\Delta k_{d_x}^{m+1} \mp q_x) \nu \cdot t} \cdot F(\Delta k_{d_x}^{m+1} \mp q_x) \int_{-1}^{z'_{m+1}} e^{-i \frac{L}{2} (\Delta k_{d_z}^{m+1} \mp q_z) z'_m} dz'_m dk_{d_{m+1}x}. \quad (6)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\chi_{d_{m+1}d_m}^{(m)} = \frac{U_{k_{d_{m+1}}}^* \cdot \varepsilon_{k_{d_{m+1}}i} \cdot p_{ijfp} \cdot \xi_{fp}^0 \cdot \varepsilon_{jk_{d_m}} \cdot U_{k_{d_m}}}{N_{k_{d_{m+1}}}} \cdot \frac{\omega L}{4\pi}, \quad (7)$$

$$N_{k_d} = N_{k_d, k_d} = \frac{c}{2} n_d \cdot \left[ 2|U_{k_d}|^2 (\mathbf{m}_d \cdot \mathbf{n}) - (\mathbf{m}_d \cdot \mathbf{U}_{k_d})(\mathbf{U}_{k_d}^* \cdot \mathbf{n}) - (\mathbf{m}_d \cdot \mathbf{U}_{k_d}^*)(\mathbf{U}_{k_d} \cdot \mathbf{n}) \right], \quad (8)$$

$\mathbf{U}_{k_{d_{m+1}}}^*$ ,  $\mathbf{U}_{k_{d_m}}$  – комплексные амплитуды электрического поля для волн с волновыми векторами  $\mathbf{k}_{d_{m+1}}$  и  $\mathbf{k}_{d_m}$ ;  $\mathbf{m}_d$  – единичный вектор волновой нормали,  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к границе звукопровода,  $\varepsilon_{mn}$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости; (\*) – знак комплексного сопряжения.

$$F(\Delta k_{d_x}^{m+1} \mp q_x) = \lim_{x_{m+1} \rightarrow \infty} \int_{-x_{m+1}}^{x_{m+1}} A(\mathbf{r}'_m) e^{-i(\Delta k_{d_x}^{m+1} \mp q_x) \cdot x_m} dx_m - \quad (9)$$

– мгновенный Фурье-спектр ультразвукового возмущения  $A(\mathbf{r}'_m)$ ;

$$\Delta k_{d_x}^{m+1} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_d^{m+1} \cdot \sin \theta_{m+1} - n_d^m \cdot \sin \theta_m); \Delta k_{d_z}^{m+1} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_d^{m+1} \cdot \cos \theta_{m+1} - n_d^m \cdot \cos \theta_m), \quad (10)$$

$\mathbf{k}_d = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_d \cdot \mathbf{m}_d$ ,  $n_d$  – показатели преломления среды для двух эллиптически поляризованных волн, распространяющихся в направлении  $\mathbf{m}_d$ ,  $\lambda_0$  – длина волны света.

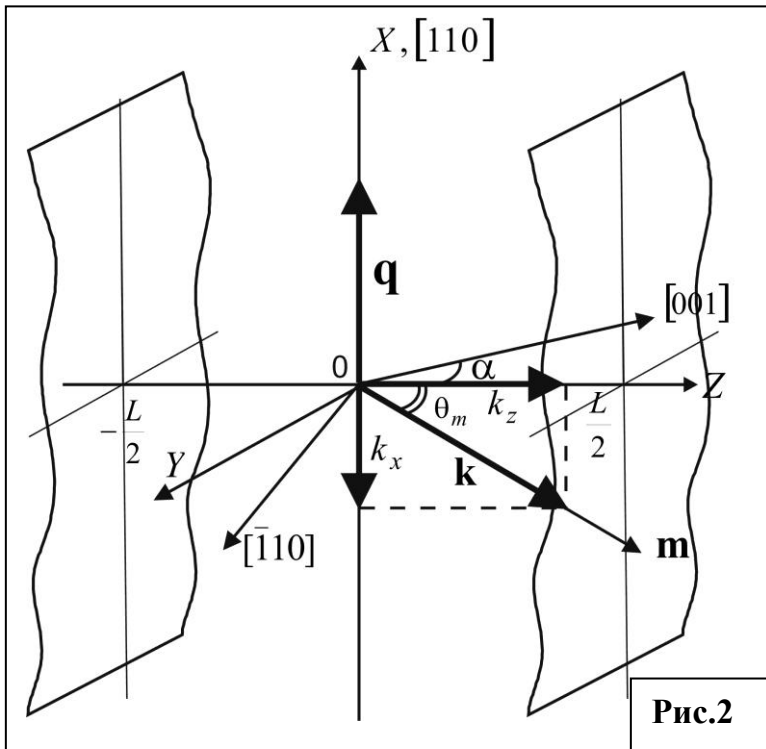
Наибольший вклад в дифрагированное поле вносят спектральные составляющие

ультразвукового возмущения, для которых выполняются условия синхронизма:

$$\Delta k_{d_x}^{m+1} \mp q_x = 0, \Delta k_{d_z}^{m+1} \mp q_z = 0 \quad (11).$$

Исходя из сути данного метода, дифракцию света можно представить как результат последовательных актов рассеяния в различные дифракционные порядки, происходящие в соответствии с типами световой и звуковой волн, причем  $\prod_{m=0}^{n-1} \chi_{d_{m+1}d_m}^m$  определяет ветвь этой диаграммы, вносящей свой вклад в рассматриваемый дифракционный порядок, с соответствующими коэффициентами рассеяния  $\chi_{d_{m+1}d_m}^m$ ;  $n$  – порядок взаимодействия.

На основании общего решения в приближении до пятого порядка взаимодействия включительно рассмотрена задача о дифракции плоской световой волны на ультразвуке в кристалле  $\text{TeO}_2$  для геометрии рассеяния, соответствующей широкополосной



анизотропной дифракции света на медленной сдвиговой упругой волне, распространяющейся в направлении  $[110]$  кристалла вблизи его оптической оси (рис.2).

Для этой геометрии найдены выражения для коэффициентов рассеяния, которые характеризуют анизотропную дифракцию света с изменением показателя преломления и поляризации при преобразовании световых волн с медленной на быструю и

обратно:

$$\chi_{12}^{(m)}(\theta_{m+1}, \theta_m) = \frac{n_o^3 \cdot L}{2 \cdot \lambda_0} \cdot \frac{(p_{11} - p_{12}) \cdot \xi_{12}^0}{(1 + \rho_{m+1}^2) \cdot 2} \cdot (U_{1_1}^* \cdot U_{2_2} + U_{2_1}^* \cdot U_{1_2}) = \chi_0 \cdot K_{12}(\theta_{m+1}, \theta_m), \quad (12)$$

$$\chi_{21}^{(m)}(\theta_{m+1}, \theta_m) = \chi_0 \cdot K_{12}^*(\theta_{m+1}, \theta_m), \quad (13)$$

$$\text{где } \chi_0 = \frac{\pi \cdot A_0 \cdot \xi^0 \cdot n_o^3 \cdot L \cdot (p_{11} - p_{12})}{2 \cdot \lambda_0} \cdot \frac{D^{(2)}}{D^{(1)}} - \text{индекс модуляции,} \quad (14)$$

$$K_{12}(\theta_{m+1}, \theta_m) = \frac{1}{(1 + \rho_{m+1}^2)} \cdot [(1 - \rho_{m+1} \cdot \rho_m) \cdot \cos(\varphi_m - \varphi_{m+1}) + i \cdot (\rho_{m+1} - \rho_m) \cdot \sin(\varphi_m - \varphi_{m+1})] \quad (15)$$

$$\rho_m = \left[ 1 + b^2 \cdot (\theta_m^2 + \alpha^2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - b \cdot (\theta_m^2 + \alpha^2) - \text{эллиптичности световых волн,} \quad (16)$$

$$b = \frac{(n_e^2 - n_o^2)}{2G_{33} \cdot n_o^2 \cdot n_e^2}, \text{ где } n_o, n_e - \text{показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной световых волн, } G_{33} - \text{составляющая псевдотензора гирации в направлении}$$

[001] кристалла  $\text{TeO}_2$ ,  $\xi^0$  – нормированная деформация среды,  $D^{(1)}, D^{(2)}$  – амплитуды векторов электрической индукции для быстрой и медленной световых волн в отсутствии гиротропии.

Получены выражения для дифрагированного светового поля в +1 дифракционном порядке на границе ультразвукового столба при постоянной амплитуде ультразвукового возмущения, а также при его амплитудной модуляции по гармоническому закону. При амплитудной модуляции полагаем, что брэгговские условия дифракции выполняются для падающей световой волны и центральной несущей частоты ультразвука. Для боковых спектральных составляющих эти условия выполняются в пределах углового спектра излучателя упругих волн, который определяется выражением

$$\Upsilon(\beta) = \sin\left(\frac{\pi \cdot f \cdot L}{2 \cdot v} \cdot \beta\right) / \left(\frac{\pi \cdot f \cdot L}{2 \cdot v} \cdot \beta\right), \quad (17)$$

где  $\beta$  – угол отклонения волнового вектора упругой волны от направления  $X$ .

В результате представления светового поля на входной апертуре акустооптического модулятора в виде суперпозиции плоских волн и учета вкладов от рассеяния этих волн в суммарное дифракционное поле получено выражение для средней по времени интенсивности света в сигнале изображения строки при амплитудной модуляции ультразвука гармоническим сигналом. В приближении первого порядка взаимодействия (малой эффективности дифракции) это выражение имеет следующий вид:



$$I(x'_1, y'_1) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{\tau_0^2} 4 \ln 2} I_1(x'_1, y'_1, t) dt = \Gamma_0 \left[ D_0 + m_0 \cdot e^{-\left(\frac{\pi f_0 \tau_0}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2} \cdot \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \times \right. \\ \left. \times \sin\left(\frac{2\pi f_0}{v} x' + \Delta_1\right) + \frac{m_0^2}{2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi^2 f_0 \tau_0}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2} \cdot \sqrt{D_3^2 + D_4^2} \sin\left(\frac{4\pi f_0}{v} x' + \Delta_2\right) \right], \quad (18)$$

$$\Gamma_0 = \frac{c \cdot E_0^2 \cdot \chi_0^2 \cdot \tau_0 \cdot F_1}{4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\ln 2} \cdot \lambda_0 \cdot M'_1 \cdot M'_2 \cdot T}, \quad (19)$$

где  $T$  – период, по которому происходит интегрирование по времени;  $\tau_0$  – длительность светового импульса по уровню 0,5 интенсивности света,  $A_0$  – амплитуда модуляции,  $m_0$  – глубина модуляции,  $E_0$  – напряженность электрического поля падающей световой волны. Первое слагаемое в выражении (18) определяет постоянную составляющую в сигнале изображения, второе – модуляцию с частотой входного сигнала, третье – нелинейные искажения в изображении с удвоенной частотой сигнала. Коэффициент  $\Gamma_0$  характеризует изменение средней интенсивности света в строке на экране за счет преобразования размеров  $M'_1$  и  $M'_2$  светового пучка и увеличения амплитуд светового и звукового полей.

Полученное выражение представляет собой двумерную функцию от координат  $x$  и  $y$ . Сечение этой функции плоскостью ( $Y=0$ ) описывает распределение интенсивности света вдоль строки. Оно используется в дальнейшем для расчета частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) акустооптической системы при малой эффективности дифракции –

$$M f_0 = \frac{I_{\max}(f_0) - I_{\min}(f_0)}{I_{\max}(f_0) + I_{\min}(f_0)}$$

и логарифмической функции передачи контраста  $N(f_0) = \ln \frac{I_{\max}(f_0)}{I_{\min}(f_0)}$ . Анализ полученных выражений осуществлялся на

основании результатов численных расчетов. Из расчетов следует, что теоретическое значение числа градаций яркости на низких модулирующих частотах в зависимости от величины порогового контраста может находиться в пределах  $200 \div 500$ . Увеличение длительности светового импульса приводит к уменьшению контраста в передаче амплитудно-модулированных сигналов на высоких частотах. К увеличению контраста на высоких частотах приводит уменьшение ширины пьезопреобразователя и уменьшение несущей частоты ультразвука, ее приближение к частоте двухфононного

взаимодействия. На рис.3 и 4 представлены результаты расчетов ЧКХ системы в зависимости от длительности светового импульса  $\tau_0$  (рис.3) и длины

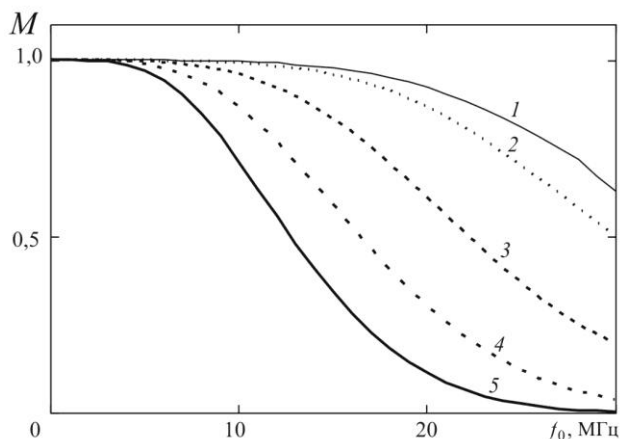


Рис.3.

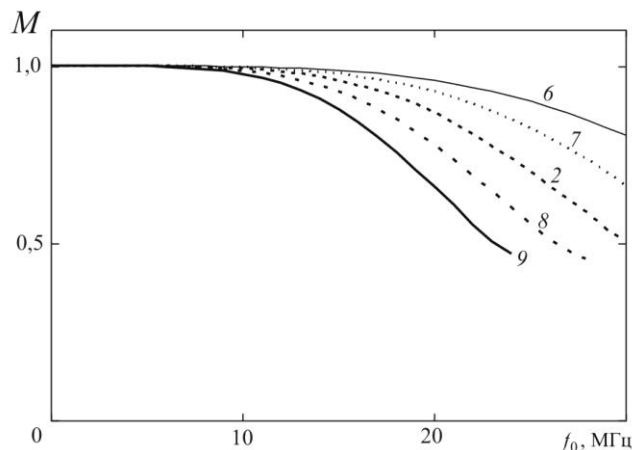


Рис.4.

акустооптического взаимодействия  $L$  (рис.4) при несущей частоте ультразвука  $f = 80$  МГц. Кривые 1 ÷ 5 соответствуют длительностям светового импульса  $\tau_0 = 5$  нс (1), 10 нс (2), 20 нс (3), 30 нс (4), 40 нс (5) при  $L = 4$  мм. Кривые 2, 6 ÷ 9 соответствуют  $L = 4$  мм (2), 2 мм (6), 3 мм (7), 5 мм (8) и 6 мм (9).

Сечение двумерной функции (1) плоскостью ( $X=0$ ) характеризует поперечное распределение интенсивности светового поля в строке. Показано, что на поперечное распределение интенсивности светового поля в строке, а, следовательно, и на предельное число разрешимых элементов системы по кадру и максимальную интенсивность света в сигнале изображения должен оказывать влияние выбор конуса углов падения светового излучения на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости дифракции. Начиная с  $F_1 = 0,2$  м ( $\alpha_{\text{внешн}} \geq 0,05$  рад) происходит заметное уменьшение интенсивности в максимуме поперечного распределения, увеличение его ширины, а также искажение симметрии в форме поперечного распределения интенсивности света (Рис.5 и 6). Эти изменения вызваны искажениями волнового фронта дифрагированного света вследствие различных фазовых задержек и неравной эффективности дифракции при прохождении области взаимодействия с ультразвуком для плоских волн, падающих под различными углами на звуковое поле в плоскости, ортогональной плоскости рассеяния. Акустооптический модулятор из  $\text{TeO}_2$  практически не будет оказывать заметного влияния на распределение интенсивности светового поля в строке по координате  $Y$ , а следовательно, и на число разрешимых элементов системы

по кадру вплоть до углов  $\alpha_{\text{внешн}} \approx 2$  град, что соответствует  $F_1 = 0,3$  м при  $\lambda_0 = 510,6$  нм и световом пучке диаметром 2 см.

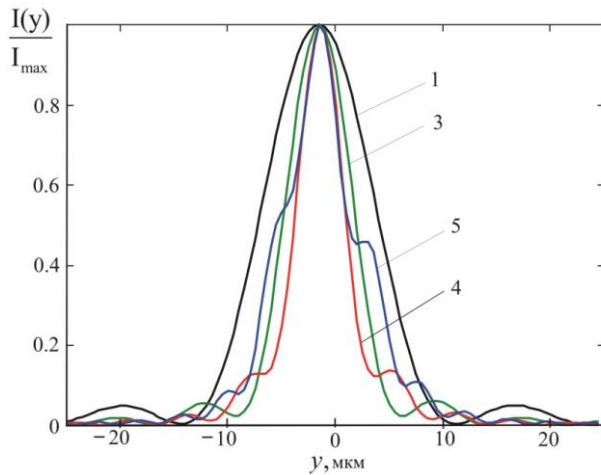


Рис.5

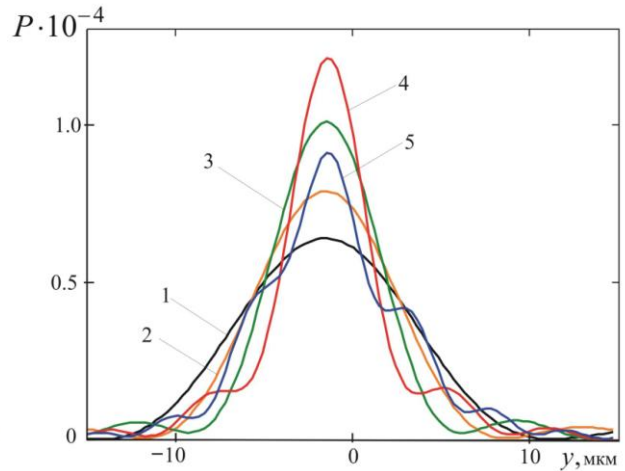


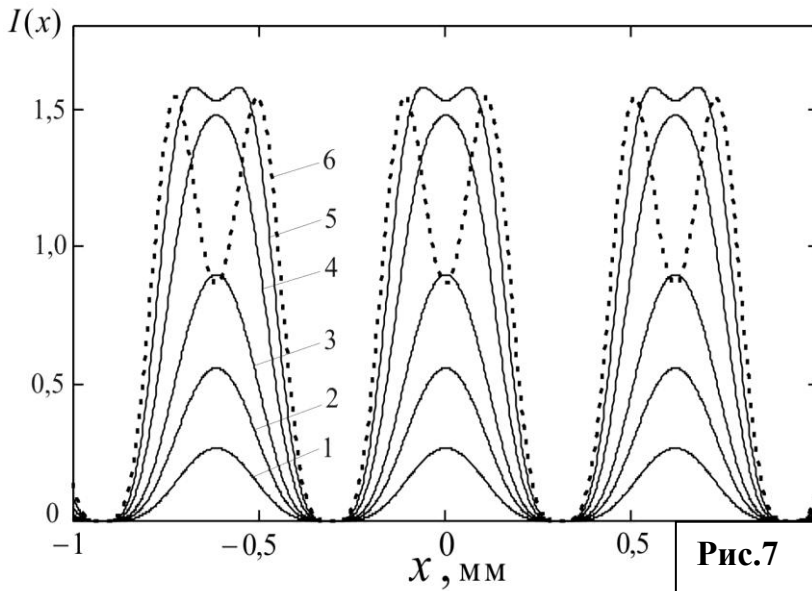
Рис.6

$I(y) / I_{\max}$  – нормированные функции поперечного распределение интенсивности дифрагированного света в фокальной плоскости линзы с различными фокусными расстояниями  $F_1$ , м: 0,5 (1); 0,4 (2); 0,30 (3); 0,2 (4); 0,15 (5) при  $f = 80$  МГц,  $L = 4$  мм,  $\lambda_0 = 510,6$  нм,  $P = I(y) / \Gamma_0 \cdot (1 + m_0)^2$ .

Далее проведено исследование нелинейных искажений в сигнале изображения строки при ее модуляции входным гармоническим сигналом. В приближении третьего порядка взаимодействия получено выражение для средней по времени интенсивности света в сигнале изображения

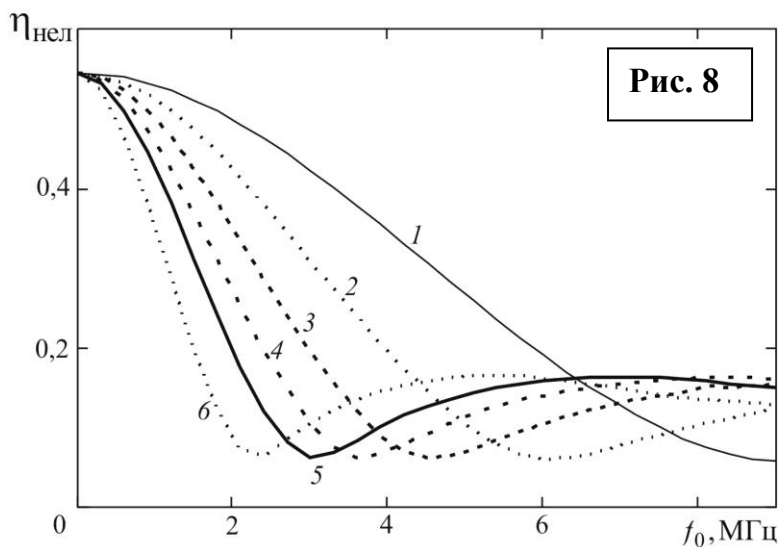
$$I_1(x_1) = \tilde{\Gamma}_0 \chi_0^2 \left\{ C_0 + 2 \sum_{n=1}^6 \left[ C_{n1} \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot x_1}{v}\right) + C_{n2} \sin\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot x_1}{v}\right) \right] e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot \tau_0}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2} \right\}. \quad (20)$$

Из выражения (20) видно, что при учете третьего порядка взаимодействия помимо компонент  $C_{11}$  и  $C_{12}$ , описывающих модуляцию с основной частотой  $f_0$ , в сигнале изображения будут присутствовать составляющие с более высокими гармониками, вплоть до 6-ой гармоники входного сигнала, приводящие к его искажению. На рис.7 показано изменение амплитуды и формы сигнала изображения на частоте модуляции  $f_0 = 1$  МГц ( $f = 80$  МГц,  $\tau_0 = 10$  нс,  $L = 4$  мм) при увеличении индекса модуляции и при различных значениях индекса модуляции  $\chi_0$ : 0,2 (1); 0,3 (2); 0,4 (3); 0,6 (4); 0,8 (5); 1,0 (6).



В результате численных расчетов найдены значения индексов модуляции, начиная с которых нелинейные искажения в изображении резко возрастают. На низких модулирующих частотах ( $f_0 \leq 1$  МГц) при индексах модуляции  $\chi_0 \leq 0,6$  сред-

неквадратичное отклонение интенсивности в сигнале изображения от составляющей с частотой первой гармоники  $\eta_{\text{нел}}$  не превышает 17%. При дальнейшем увеличении индекса модуляции форма гармонических сигналов начинает резко искажаться. Показано, что одним из способов уменьшения этих искажений является увеличение длины акустооптического взаимодействия  $L$ . На рис.8 показана зависимость коэффициента нелинейных искажений от частоты модуляции при фиксированном значении индекса модуляции  $\chi_0 = 1$  и разных длинах  $L$  мм: 2 мм (кривая 1); 3 (2); 4 (3); 5 (4); 6



(5); 8 (6).

Степень искажения изображения при больших индексах модуляции зависит от частоты модуляции, длительности светового импульса и длины акустооптического взаимодействия. При центральной настройке (брэгговские условия взаимодействия выполнены для

центральной спектральной составляющей амплитудно-модулированного сигнала) для малых частот модуляции боковые спектральные составляющие амплитудно модулированного сигнала расположены близко к несущей частоте ультразвука. Для них легче выполняются условия для повторной дифракции, и, следовательно, для появления составляющих в спектре дифрагированного света на кратных частотах модуляции.

При этом форма гармонического сигнала светового изображения искажается, она приближается к прямоугольной. Рост интенсивности в максимуме резко уменьшается, так как энергия светового поля эффективно перекачивается в дифракционные порядки с кратными частотами модуляции. Для более высоких частот  $f_0$  спектральные составляющие в дифрагированном световом поле, соответствующие повторной дифракции, из-за ограничения полосы акустооптического взаимодействия имеют существенно меньшую амплитуду, чем на низких. В них при дифракции перекачивается меньший процент энергии светового поля. Форма сигнала искажается в меньшей степени и наблюдается рост интенсивности света в максимуме сигнала изображения при увеличении амплитуды ультразвукового сигнала.

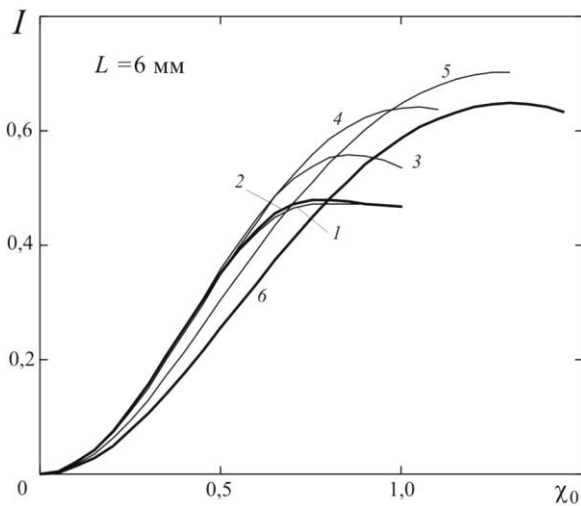


Рис. 9.

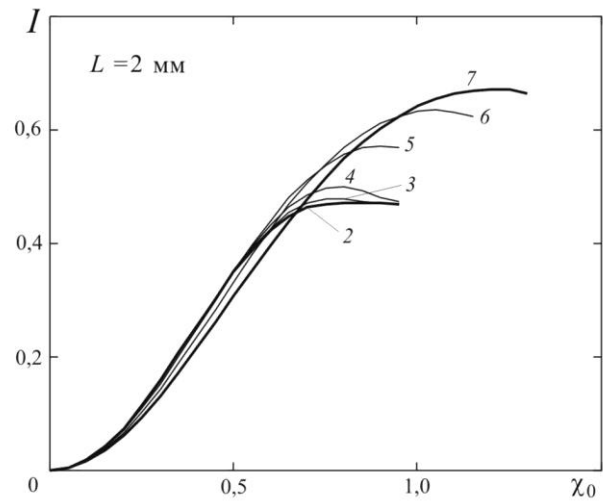
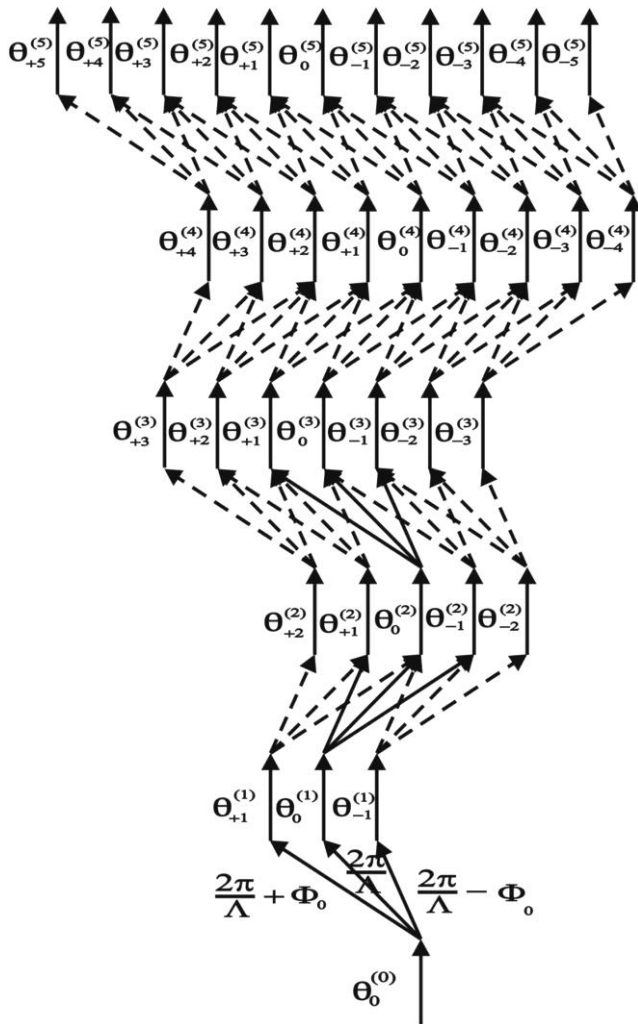


Рис. 10.

На рис.9 и 10 представлены расчетные зависимости  $I(\chi_0) = \frac{I_{\max}^{+1}}{I_{\max}^{+1} + I_{\min}^0}$ , которые определяют эффективность дифракции в максимумах сигнала изображения для гармонического сигнала с частотой  $f_0$  от индекса модуляции в приближении третьего порядка взаимодействия. Кривые 1 ÷ 7 соответствуют частотам модуляции 0,5 МГц (кривая 1), 1 МГц (2), 3 МГц (3), 5 МГц (4), 10 МГц (5), 15 МГц (6), 20 МГц (7).

Сравнение этих кривых с соответствующими зависимостями для малой эффективности дифракции позволяет установить границы применимости приближения малой эффективности дифракции. Оно ограничено сверху уровнем эффективности дифракции 0,1 ÷ 0,17 и индексами модуляции  $\chi_{0гр}$  от 0,2 для  $f_0 = 1$  МГц до 0,35 для  $f_0 = 15$  МГц. Далее произведен расчет средней по времени интенсивности света в

сигнале изображения при его модуляции по гармоническому закону в 0 дифракционном порядке в приближении 4-го порядка взаимодействия, а также в +1 дифракционном порядке в приближении 5-го порядка взаимодействия. Расчет светового поля производился согласно диаграмме рассеяния, представленной на рис.11.



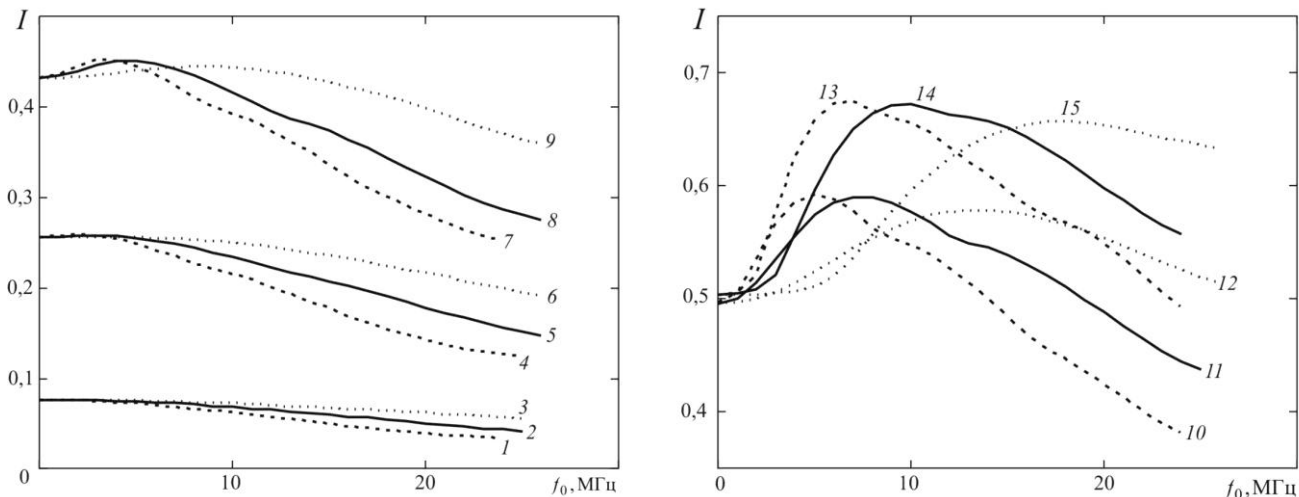
**Рис. 11.** Диаграмма рассеяния для поля в приближении 5-го порядка взаимодействия.

Это позволило рассчитать амплитудные передаточные характеристики системы для этого приближения и определить границы применимости приближения третьего порядка взаимодействия. Приближение 3-го порядка взаимодействия на низких модулирующих частотах ограничено индексом модуляции  $0,6 \div 0,65$  и эффективностью дифракции, приблизительно равной  $0,43 \div 0,46$ . На высоких частотах модуляции  $f_0 = 10 \div 15$  МГц приближение 3-го порядка взаимодействия выполняется до индексов модуляции  $\chi_0 \approx 1$  и эффективности дифракции  $0,6$

$\div 0,7$ .

Произведен расчет амплитудно-частотных характеристик акустооптической системы формирования изображения с импульсным лазером и АОМ из  $\text{TeO}_2$  при различных значениях индекса модуляции, длинах акустооптического взаимодействия и длительностях светового импульса (рис.12). Показано, что для формирования изображения амплитудно-модулированного ультразвукового сигнала с полосой частот до  $5 \div 7$  МГц (стандартный ТВ сигнал) вполне достаточно использовать лазеры с длительностью светового импульса  $\tau_0 \approx 30 \div 40$  нс. Уменьшение длины  $L$  приводит к увеличению эффективности дифракции в высокочастотной области и расширению

полосы частот акустооптического взаимодействия.



**Рис. 12.** Зависимости эффективности дифракции в изображении  $I(\chi_0)$  в приближении пятого порядка взаимодействия от частоты модулирующего сигнала  $f_0$ ; индексов модуляции  $\chi_0$ ; при  $L = 6, 4, 2$  мм:  $\chi_0 = 0,2$  (кривые 1, 2, 3);  $\chi_0 = 0,4$  (4, 5, 6);  $\chi_0 = 0,6$  (7, 8, 9);  $\chi_0 = 0,8$  (кривые 10, 11, 12);  $\chi_0 = 1,0$  (13, 14, 15).

Увеличение же  $L$ , с одной стороны, увеличивает эффективность дифракции в области низких частот, с другой, уменьшает диапазон рабочих частот системы. При больших индексах модуляции эффективности дифракции на низких частотах (0,1 ÷ 1 МГц) выравниваются, что связано с ограничением амплитуды в результате перекачки энергии света в высокие гармоники модулирующего сигнала. Эта эффективность ограничивается приблизительно уровнем 0,5 на частотах модуляции до 1 МГц.

**Глава 3** посвящена практическим вопросам создания отдельных элементов акустооптической системы формирования телевизионного изображения с импульсным методом формирования строки.

В результате проведенных исследований разработана конструкция лазера на парах меди с параметрами выходного излучения, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к источнику света для акустооптической системы отображения и записи телевизионной информации с импульсным методом формирования строки.

Проведено сравнение выходных мощностей и расходимостей излучения лазера в случаях со сферическими и цилиндрическими зеркалами при одном и том же уровне накачки. Измерения показали, что при сохранении расходимости лазерного излучения по одной координате выходная мощность лазерного излучения при использовании



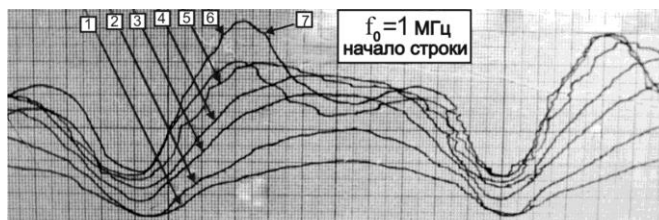
резонатора с цилиндрическими зеркалами увеличивается приблизительно на 20%.

Приведены результаты исследования работы лазера на парах меди с внутррезонаторным акустооптическим управлением его спектральными и временными характеристиками, а также системы генератор–усилитель со связанными резонаторами и с инъекцией светового пучка в мощный лазер, которая позволяет преобразовать практически всю инверсию усилителя в излучение с приемлемой для системы отображения информации расходимостью.

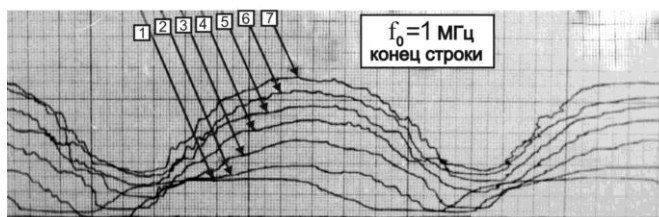
Исследована возможность получения синей линии (450 нм) в лазере на титан-сапфире с накачкой от лазера на парах меди и преобразованием излучения во вторую гармонику. Дифференциальная эффективность преобразования излучения накачки лазера на парах меди в центре линии усиления  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  в длину волны 770 нм составила величину 26,4 %, а в длину волны 900 нм – 24 %. Максимальная выходная мощность достигалась при нагрузке резонатора 40% и для двух комплектов зеркал составила  $P = 1,32$  Вт ( $\lambda = 790$  нм) и  $P = 1,2$  Вт ( $\lambda = 900$  нм). Произведено сравнение эффективностей накачки разными длинами волн лазера на парах меди. Показано, что в рассматриваемом случае двухчастотной накачки происходит взаимная компенсация эффектов, связанных с различием стоксова сдвига и поглощения в активной среде. Это приводит к выравниванию эффективностей накачки на разных длинах волн лазера на парах меди. При преобразовании излучения  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  лазера во вторую гармонику экспериментально была достигнута мощность 400 мВт на длине волны 450 нм при длительности генерации 40 нс и частоте следования импульсов излучения 15,625 кГц, что позволяет рассчитывать на получение в дальнейшем большей средней мощности излучения в синей области при использовании для накачки значительно более мощного лазера на парах меди.

Рассмотрена конструкция и характеристики акустооптических модуляторов и дефлекторов из  $\text{TeO}_2$  с преобразованием упругих мод на отражающей ультразвуком грани кристалла, использованных в экспериментах по формированию телевизионных изображений. Рассмотрена работа и принципы построения электронных устройств управления акустооптической системой отображения информации, а также предложены оптические схемы, позволяющие эффективно совместить изображения на разных длинах волн излучения лазера и уменьшить плотность мощности светового излучения в кристалле АОМ.

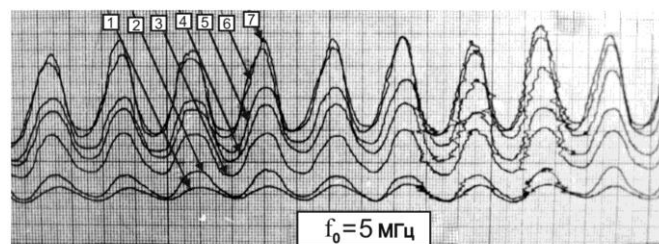
В главе 4 изложены результаты экспериментальных исследований акустооптической системы отображения и записи информации с лазером на парах меди. Исследованы амплитудные передаточные характеристики системы, а также нелинейные искажения, возникающие при формировании изображения строки.



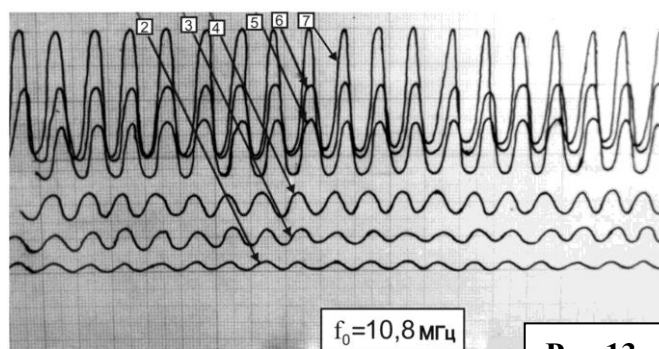
(а)



(б)



(в)



(г)

На рис.13 представлены полученные распределения интенсивности света в плоскости изображения для +1 дифракционного порядка при различных амплитудах  $U_C$  гармонического сигнала на входе модулятора и частотах модуляции 1 МГц (а, б), 5 МГц (в) и 10 МГц (г). Обозначения кривых соответствуют: 1 –  $U_C = 0,05$  В, 2 –  $U_C = 0,1$  В, 3 –  $U_C = 0,2$  В, 4 –  $U_C = 0,3$  В, 5 –  $U_C = 0,4$  В, 6 –  $U_C = 0,5$  В, 7 –  $U_C = 0,7$  В. Распределения на рис. 12(а, в, г) соответствуют ультразвуковым сигналам в начале звукопровода АОМ, а на рис. 4.2 (б) для  $f_0 = 1$  МГц – в конце звукопровода.

На рис.14. приведены экспериментальные зависимости относительной интенсивности света в максимуме сигнала изображения от амплитуды  $U_C$  входного гармонического сигнала с

несущей частотой  $f = 82.5$  МГц и различных частотах модуляции ультразвука: 1 –  $f_0 = 1$  МГц, 2 –  $f_0 = 3$  МГц, 3 –  $f_0 = 5$  МГц, 4 –  $f_0 = 10$  МГц.

С выводами теории согласуются следующие экспериментальные результаты: форма сигнала изображения, закономерности в изменении спектра этого сигнала, изменение контраста в изображении на низких частотах модуляции, изменение контраста при увеличении частоты модуляции, закономерности в изменении ампли-

тудных передаточных характеристик системы.

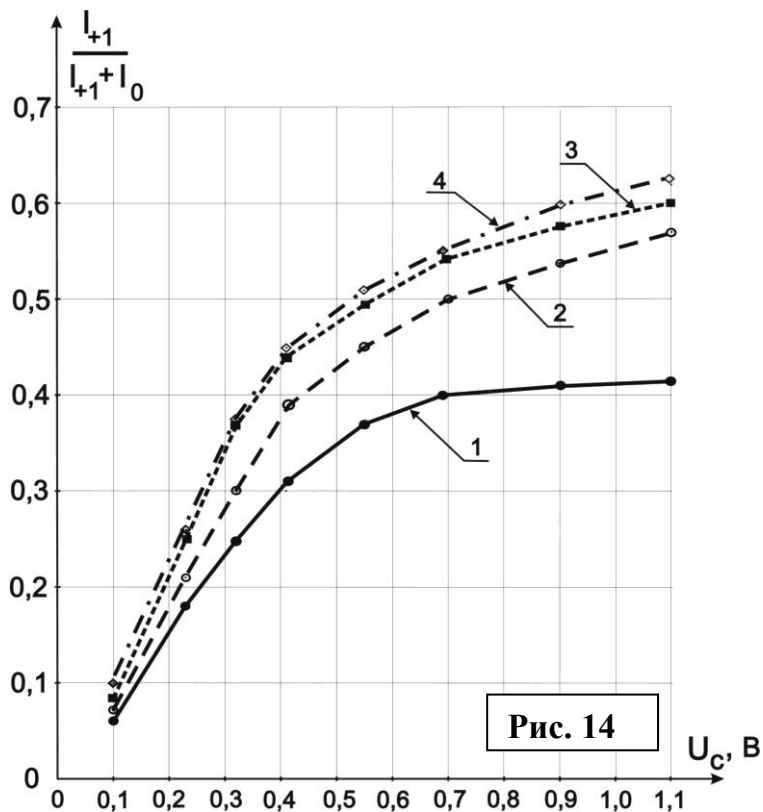
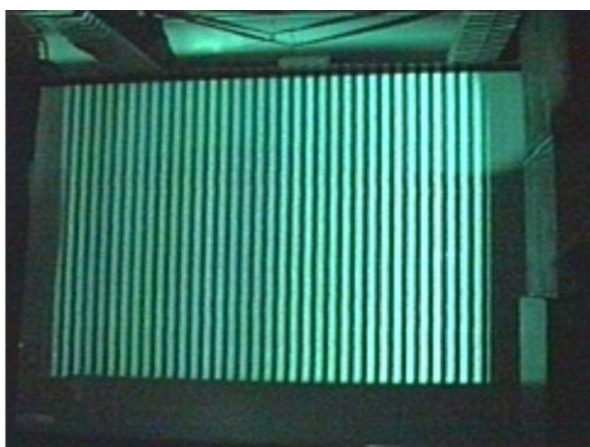


Рис. 14

Произведено экспериментальное исследование работы акустооптической системы отображения ТВ информации на проекционном экране. Произведено измерение и определена особенность настройки таких параметров системы, как число разрешимых элементов по строке и кадру, линейность формируемого раstra, возможность передачи градаций яркости, равномерность распределения светового поля по строке и кадру.

На рис. 15 (а, б) представле-

ны фотографии экрана, при отображении контрольного раstra в виде пачек импульсов длительностью 50 нс (по 8 импульсов в пачке). Как видно из фотографий, отдельные импульсы полностью разрешаются с высоким контрастом по всей длине строки (всего 576 импульсов или 1152 ч/б полос).



(а)

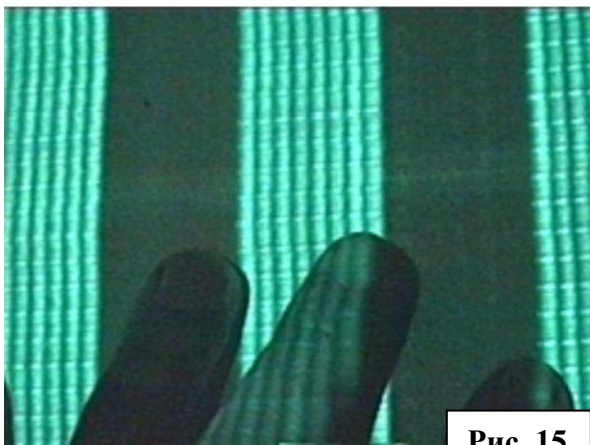
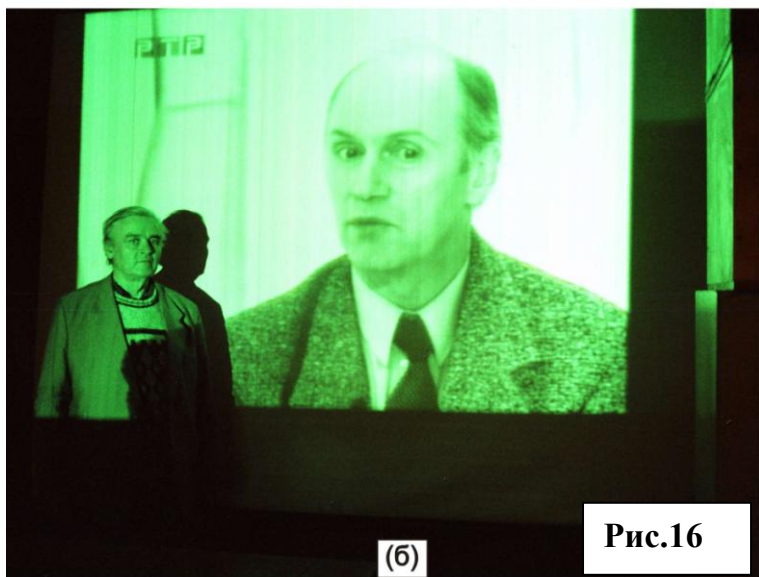


Рис. 15

(б)

Показана принципиальная возможность создания акустооптических систем отображения и записи информации с импульсным лазером на парах меди, работающих в реальном масштабе времени и имеющих число разрешимых элементов в кадре приблизительно 1000×1000 по критерию Рэля.

В результате проведенных исследований показана принципиальная возможность использования разработанной акустооптической системы формирования изображений с импульсным лазером для построчной записи на ПВМС "ПРИЗ" больших массивов информации (до  $1500 \times 1000$  информационных отсчетов) за короткое время (десятки



миллисекунд). Было обнаружено, что основные характеристики ПВМС "ПРИЗ" в режиме импульсной записи (дифракционная эффективность, чувствительность к записи) по порядку величины не отличаются от данных при непрерывной записи. Была обнаружена утомляемость ПВМС "ПРИЗ" при импульсной записи информации, которая может быть исключена дополнительным инфракрасным освещением.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о возможности построения устройств обработки информации с большой пропускной информационной способностью на

основе ПВМС типа "ПРИЗ" и акустооптической системы ввода информации с импульсным лазером. В качестве которого, в настоящее время можно использовать твердотельный импульсный лазер с преобразованием излучения во вторую гармонику.

Формирование изображения малых размеров ( $14 \times 10 \text{ мм}^2$ , размер одного элемента  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ ) при высокой средней мощности световых пучков представляет большой интерес также для технологических целей в задачах обработки материалов и их маркировки с высокой скоростью.

Создан и прошел апробацию в городской среде прототип акустооптической про-

екционной установки отображения телевизионной информации с лазером на парах меди, позволяющий формировать телевизионное изображение размером более  $20 \text{ м}^2$  на расстоянии до 80 м. На рис. 16 (а, б) представлены фотографии телевизионного изображения, снятые с экрана лазерного ТВ проектора.

Предложены варианты создания цветной акустооптической системы отображения телевизионной информации с импульсными лазерами, работающей в стандарте HDTV.

**В заключении** сформулированы **основные результаты исследований**, представленных в диссертационной работе:

1. В результате решения интегрального уравнения для электромагнитного поля, полученного с помощью введения эквивалентных токов и разложения искомого поля по плоским волнам, найдено общее решение для дифрагированного на ультразвуке светового поля, справедливое для анизотропной диэлектрической среды, обладающей гиротропными свойствами.
2. На основании общего решения дифракционной задачи в приближении до пятого порядка взаимодействия включительно рассмотрена задача о дифракции плоской световой волны на ультразвуке для геометрии рассеяния, соответствующей широкополосной анизотропной дифракции света на медленной сдвиговой упругой волне, распространяющейся в направлении  $[110]$  кристалла  $\text{TeO}_2$ , вблизи его оптической оси. Получено выражение для дифрагированного светового поля в +1 дифракционном порядке на границе ультразвукового столба при постоянной амплитуде ультразвукового возмущения, а также при его амплитудной модуляции по гармоническому закону.
3. Для сходящегося светового пучка в фокальной плоскости входной цилиндрической линзы произведен расчет среднего по времени распределения интенсивности света от импульсного когерентного источника в плоскости изображения при амплитудной модуляции ультразвука по гармоническому закону.
4. Произведен расчет частотно-контрастной характеристики акустооптической системы формирования изображения строки с импульсным лазером на парах меди и АОМ из  $\text{TeO}_2$  для различных значений длительности светового импульса, несущих частот ультразвука, длины акустооптического взаимодействия, а также конуса углов падения света на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости рассеяния.
5. Показано, что на поперечное распределение интенсивности светового поля в строке, а, следовательно, и на предельное число разрешимых элементов системы по кадру и

максимальную интенсивность света в сигнале изображения должен оказывать влияние выбор конуса углов падения светового излучения на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости дифракции.

6. Установлены границы применимости приближения малой эффективности дифракции, а также определена величина и характер нелинейных искажений в сигнале изображения при его модуляции по гармоническому закону. В результате численных расчетов найдены значения индексов модуляции, начиная с которых нелинейные искажения в изображении резко возрастают.

7. Произведен расчет средней по времени интенсивности света в сигнале изображения при его модуляции по гармоническому закону в 0 дифракционном порядке в приближении 4-го порядка взаимодействия, а также в +1 дифракционном порядке в приближении 5-го порядка взаимодействия. Это позволило рассчитать амплитудные передаточные характеристики системы, характеризующие эффективность дифракции в зависимости от индекса и частоты модуляции, а также определить границы применимости приближения третьего порядка взаимодействия.

8. В результате проведенных исследований разработана конструкция лазера на парах меди с параметрами выходного излучения, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к источнику света для акустооптической системы отображения и записи телевизионной информации с импульсным методом формирования строки. Проведено сравнение выходных мощностей и расходимостей излучения лазера в случаях со сферическими и цилиндрическими зеркалами при одном и том же уровне накачки. Измерения показали, что при сохранении расходимости лазерного излучения по одной координате выходная мощность лазерного излучения при использовании резонатора с цилиндрическими зеркалами увеличивается приблизительно на 20%.

9. Разработана конструкция лазера на парах меди с внутриврезонаторным акустооптическим управлением его спектральными и временными характеристиками, позволяющая с высокой точностью управлять амплитудой, скважностью выходных импульсов и их длиной волны ( $\lambda_1$  или  $\lambda_2$ ) без изменения режима разогрева активного элемента и направления распространения лазерного излучения.

10. Разработана и исследована система из двух лазеров на парах меди с управляемыми спектральными и временными характеристиками и с инжекцией светового пучка в мощный лазер, которая позволяет преобразовать практически всю инверсию усилите-



ля в излучение с приемлемой для системы отображения информации расходимостью.

11. Исследована возможность получения синей линии (450 нм) в лазере на титан-сапфире с накачкой от лазера на парах меди и преобразованием излучения во вторую гармонику. Произведено сравнение эффективностей накачки титан-сапфирового лазера разными длинами волн лазера на парах меди. Показано, что в рассматриваемом случае двухчастотной накачки происходит взаимная компенсация эффектов, связанных с различием стокового сдвига и поглощения в активной среде. Это приводит к выравниванию эффективностей накачки на разных длинах волн лазера на парах меди.

12. Предложена конструкция широкополосных акустооптических модуляторов и дефлекторов из  $\text{TeO}_2$  с преобразованием типов ультразвуковых колебаний, позволяющая производить коррекцию направления распространения ультразвуковой волны в материале звукопровода на конечной стадии их изготовления после приварки пьезопреобразователя.

13. Предложены и практически реализованы электронные устройства управления акустооптической системой отображения телевизионной информации с импульсным лазером, обеспечивающие надежную работу системы в соответствии с параметрами телевизионной развертки при широкой полосе частот входных модулирующих сигналов, а также позволяющие производить необходимую коррекцию с целью получения изображения высокого качества.

14. Предложены и практически реализованы варианты оптической схемы проекционного устройства отображения информации позволяющие эффективно совместить изображения на разных длинах волн излучения лазера, а также уменьшить плотность мощности светового излучения в кристалле АОМ.

15. Проведено экспериментальное исследование амплитудных передаточных характеристик и нелинейных искажений при формировании изображения строки. При этом с выводами теории согласуются следующие экспериментальные результаты: форма сигнала изображения, закономерности в изменении спектра этого сигнала, изменение контраста в изображении на низких частотах модуляции, изменение контраста при увеличении частоты модуляции, закономерности в изменении амплитудных передаточных характеристик системы.

16. Произведено экспериментальное исследование работы акустооптической системы отображения ТВ информации на проекционном экране. Произведено измерение и



определена особенность настройки таких параметров системы, как число разрешимых элементов по строке и кадру, линейность формируемого раstra, возможность передачи градаций яркости, равномерность распределения светового поля по строке и кадру. Показана принципиальная возможность создания акустооптических систем отображения и записи информации с импульсным лазером на парах меди, работающих в реальном масштабе времени и имеющих число разрешимых элементов в кадре приблизительно  $1000 \times 1000$  по критерию Рэлея.

17. Создан и прошел апробацию в городской среде прототип акустооптической проекционной установки отображения телевизионной информации с лазером на парах меди, позволяющий формировать телевизионное изображение размером  $20 \text{ м}^2$  на расстоянии до 80 м.

18. Предложены варианты создания цветной акустооптической системы отображения телевизионной информации с импульсными лазерами, работающей в стандарте HDTV.

В **приложении А** приведены выражения для средней по времени интенсивности света в пятом и четвертом порядках взаимодействия.

В **приложении Б** представлена конструкция лазера на парах меди (лазерный генератор), разработанная для системы отображения информации на большом экране.

В **приложении В** описана конструкция разработанной автором лазерной системы генератор-усилитель на парах меди для подсветки архитектурных сооружений и формирования векторно-графических изображений, представлены фотографии работающей установки.

### **Цитируемая литература**

1. Григорьянц А.Г. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения / А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян, Н.А. Лябин.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.– 312 с.
2. Goutzoulis A., Pape D., Kulakov S. Design and fabrication of acoustooptic devices.– Marcel Dekker Inc.: N.York, 1994.– 497 p.
3. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А. Теория дифракции света на ультразвуке. Изотропные среды // Изв. Вузов. Радиофизика.– 1983.– Т.26.– № 12.– С. 1570–1578.
4. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А., Ветров К.В. К вопросу о дифракции света на ультразвуке // Обработка радиосигналов акустоэлектронными и акустооптическими устройствами. Сб. тр.– Л.: Наука, 1983.– С. 51–59.
5. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А., Липовский А.А. Дифракция света на ультразвуке

в анизотропных средах // Изв. Вузов. Радиофизика.– 1983.– Т. 26.– №8.– С. 1021–1029.

6. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А. Многочастотная дифракция света на ультразвуке // Изв. Вузов. Радиофизика.– 1984.– Т. 27.– С. 332–340.

7. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов.– М.: Наука, 1979.– 432 с.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

[A1] Антипин М.В., Голод И.С., Горбенко В.М., Косарский Ю.С., Кузин А.Г., Мокрушин Ю.М., Мостепаненко В.М., Шакин О.В. Пути решения задачи записи ТВ изображения на цветную киноплёнку методом кратковременного экспонирования целой строки // Труды ЛИКИ.– Ленинград.– 1980.– С.106–114.

[A2] Шакин О. В., Гусев О. Б., Марков В. А., Мокрушин Ю. М. Акустооптический затвор для лазера на алюмоиттриевом гранате: Отчёт.– Гос. регистр. №У70166.– 1980.

[A3] Авт. свид. № 1127440 (СССР). Акустооптический дефлектор из парателлурита (его варианты) / Кузин А.Г., Мокрушин Ю.М.–1983.

[A4] Кузин А.Г., Мокрушин Ю.М., Николаев В.М., Окунев Р.И. Устройство отображения информации на основе лазера на парах меди / Тез. докл. 4-ой Всесоюзной конф. "Оптика лазеров".– Л.: ГОИ.–1984.–С. 352.

[A5] Кузин А.Г., Мокрушин Ю.М., Окунев Р.И. и др. Оптоэлектронный способ формирования ТВ изображения // Тезисы доклада Всесоюзной конф. "Развитие и совершенствование телевизионной техники".–М.: Радио и связь, 1984.–С. 92.

[A6] Кузин А.Г., Мокрушин Ю.М., Николаев В.М. и др. Акустооптическое устройство отображения и записи информации // Тезисы доклада II Всесоюзной конф. "Формирование оптического изображения и методы его обработки", т 2.–Кишинев.– 1985.–С. 7

[A7] Градобоев Ю.Г., Камшилин А.А., Мокрушин Ю.М., Окунев Р.И. Формирование изображения на ПВМС "ПРИЗ" с помощью акустооптической системы // Тез. докл. 6-ой всесоюзной школы-семинара по оптической обработке информации, т. 2.–Фрунзе.–1986.–С.108–109.

[A8] Мокрушин Ю.М., Окунев Р.И., Пахомов Л.Н. Отображение телевизионной

информации на большом экране при помощи импульсных лазеров на парах меди / Тез. докл. III Всесоюзной конф. Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации.– Таллин.–1987.–Т.3.–С.140–142.

[A9] Мокрушин Ю.М. Акустооптическая система отображения информации с импульсным лазером на парах меди: Автореф. канд.ф.-м.н.–Л.–ЛПИ, 1987.–16 с.

[A10] Градобоев Ю.Г., Камшилин А.А., Мокрушин Ю.М., Окунев Р.И. Особенности импульсной записи информации на ПВМС "ПРИЗ" // Пространственно временные модуляторы света для оптической обработки информации: Сб. статей.– Ленинград.– 1987 .– С.64–73.

[A11] Водоватов И.А., Мокрушин Ю.М., Петрунькин В.Ю. О дифракции света на ультразвуке в гиротропной среде // Акустооптические устройства радиоэлектронных систем: Сб. статей.– Л.: Наука, Ленингр. отд.– 1988.–С. 98–106.

[A12] Ю.Г. Градобоев, Ю.М. Мокрушин, Р.И. Окунев, Л.Н. Пахомов, А.Г. Петраков, А.Л. Степанянц. Магнито-транзисторный источник питания лазера на парах меди // Приборы и техника эксперимента.– 1990.– № 6.– С.118–120.

[A13] Разработка и исследование акустооптической проекционной системы отображения ТВ информации повышенной четкости с импульсным лазером на парах меди: Отчёт о НИР, Гос. Регистр. № 907013 / Ю.М. Мокрушин, Ю.Г. Градобоев, А.Г. Петраков // Гос. Регистр. № 907013.–ЛГТУ, 1990.– 69 с.

[A14] Авт. свид. № 1748232 (СССР). Магнитный генератор импульсов накачки лазера на парах меди // Ю.Г. Градобоев, И. В. Грехов, С.В. Коротков, Ю.М. Мокрушин, А.Г. Петраков, А.Л. Степанянц.–1992.–Бюл. № 26.

[A15] Мокрушин Ю.М., Кружалов С.В., Парфенов В.А., Парфенов Вад.А., Серегин А.Г. Акустооптическая система стабилизации положения пучков излучения лазеров // XII Межреспубл. Симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах: Тез. докл. – Томск, 1993.– С.187.

[A16] Kulakov S.V., Shakin O.V., Mokrushin Yu.M. Acousto-Optical Laser System for Information Display // Gordon Conference.–USA. Denver, Colorado.–1995.

[A17] Патент РФ № 2104617. Лазерная проекционная система отображения телевизионной информации (варианты) // Ю.М. Мокрушин, О.В. Шакин.– Оpubл. в Б. М.– 1995.–№ 28.

[A18] Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В., Мокрушин Ю.М., Степанянц

А.Л., Яковчук Н.С. РВД–генератор субмикросекундного диапазона для импульсных лазеров // Приборы и техника эксперимента.– 1996, № 3.–С.111–114.

[A19] Grekhov I.V., Gradoboev Yu.G., Korotkov S.V., Mokrushin Yu. M., Stepanyants A.L. Generator on the basis of reversely switched dynistors forming pump pulses for a copper vapor laser // Journal of Russian Laser Research. New-York.– 1996.–Vol.17, No.4.– P. 362–364.

[A20] Mokrushin Yu. M., Shakin O.V. Acousto-optical system for imaging TV information by using a copper vapor laser // Journal of Russian Laser Research.– New-York.– 1996.–Vol.17, No.4.– P. 381–393.

[A21] Shakin O.V., Mokrushin Yu. M. Acousto-optical system for imaging TV information by using a copper vapor laser // International Conference. "Physprom 96".– Moskva (Golizino), 22–26 September 1996.– P. 213–214.

[A22] Shakin O.V., Mokrushin Yu. M.. Acousto-Optical CU-Laser System for TV information Display // Abstract of Second International Conference on Optical Information Processing .–St.Petersburg, Russia, June 24–25 1996.– P. 142.

[A23] Kazarian M.A., Mokrushin Yu. M., Prochorow A.M., Shakin O.V. Copper vapor laser with intra-cavity acousto-optic output control // XX International Quantum Electronics Conference. Technical Digest.–Sydney, Australia, 14–19 July 1996.

[A24] Kazarian M.A., Mokrushin Yu. M., Prochorow A.M., Shakin O.V. Copper vapor laser with intra-cavity acousto-optic output control // Physica Scripta.– 1996. –Vol. 49. – P.108–110.

[A25] Kazarian M.A., Mokrushin Yu. M., Prochorow A.M., Shakin O.V. Copper Vapor Laser with Intra-Cavity Acousto-Optic Output Control // EOS Topical Meeting Digest Series: Vol. 15. Advances in Acousto-Optics. – St.Petersburg, Russia, June 24–25 1997. – P.108–110.

[A26] Mokrushin Yu. M., Shakin O.V. Acousto-optical system for imaging TV information by using a copper vapor laser // EOS Topical Meeting Digest Series: Vol. 12. – Diffractiv Optics. – Savonlinna, Finland, 1997. – P.252–253.

[A27] Казарян М. А., Кружалов С. В., Лябин Н. А., Мокрушин Ю. М., Парфенов В. А., Прохоров А. М., Шакин О. В. Перестраиваемый импульсно-периодический конвертор в синей области спектра с накачкой лазером на парах меди // Квантовая электроника.–1998.–Т. 25, № 9.– С. 751–752.

[A28] Казарян М.А., Кружалов С.В., Лябин Н.А., Мокрушин Ю.М., Парфенов В.А., Прохоров А.М., Шакин О.В. Многофотонная цветная лазерная система для разделения изотопов // III Всерос. научн. конф. "Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул": Сб. докл.–Звенигород, Россия, 5–9 октября 1998.–С.44–45.

[A29] Васильев Ю.П., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Прохоров А.М., Шакин О.В. Лазерные оптические системы для проекции изображений // Светотехника.–1998.–№ 5.–С. 7–10.

[A30] Gulragossian Z.G., Kazarian M.A., Kruzhalov S.V., Lyabin N.A., Mokrushin Yu.M., Parfenov V.A., Prokhorow A.M., Shakin O.V. A tunable  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  laser, pumped by a copper vapor laser // Int. Conf. on LASER`98 MG.9.– Tucson, Arizona. USA, Dec.7–11 1998.

[A31] Shakin O. V., Mokrushin Yu. M., Kruzhalov S. V., Parfenov V. A., Kazarian M. A. Acousto-optic tunable laser on  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  with frequency doubling, pumped by a copper vapor laser // Abstr. Third Int. Conf. on Optical Information Processing and Second Int. Conf. for Young Researchers on Acousto-Electronic and Acousto-Optic Information Processing.–Moscow, Russia, May–June 1999.–P. 38–39.

[A32] Gulragossian Z. G., Kazarian M. A., Mokrushin Yu. M., Prokhorov A. M., Shakin O. V. Color laser system // Int. Conf. on LASER`99 THL.5.–Quebec, Canada, Dec. 13–17 1999.

[A33] Казарян М.А., Кружалов С.В., Лябин Н.А., Мокрушин Ю.М., Парфенов В.А., А.М.Прохоров, Шакин О.В. Получение цветного телевизионного изображения на большом экране с использованием импульсных лазеров на парах металлов // Известия АН. Сер. физич.–1999.– Т.63, № 6.– С. 1190–1191.

[A34] Кружалов С.В., Мокрушин Ю.М., Парфенов В.А. Лазер на  $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$  с накачкой излучением лазера на парах меди // Письма в ЖТФ.–1999. – Т.25, вып.18.– С. 12–17.

[A35] Казарян М.А., Кружалов С.В., Мокрушин Ю.М., Парфенов В.А., Таманян А.Г., Шакин О.В. Особенности накачки титан-сапфирового кристалла лазером на парах меди // Симпозиум "ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ": Тез. докл.–Ростов на Дону.–2000.–С. 52.

[A36] Gulragossian Z.G., Kazarian A.M., Kazarian M.A., Kruzhalov S.V., Lyabin

N.A., Mokrushin Yu.M., Parfenov V.A., Prokhorow A.M., Shakin O.V. Color Laser System // Proceedings of the International Conference on LASER`99. STS Press, McLEAN, VA.–2000.–P. 685–686.

[A37] Kazarian M.A., Mokrushin Yu.M., Prokhorow A.M., Shakin O.V. TV system with copper vapour laser // Proceedings of the International Conference on LASER`2000. STS Press, McLEAN, VA.–2001.–P.908–910.

[A38] Gulyaev Yu.V., Kazarian M.A., Mokrushin Yu. M., Prochorow A.M., Shakin O.V. Acoustooptical TV projection system with pulsed lasers // Laser Physics.–2002.–Vol.12, No.8.–P. 6–18.

[A39] Gradoboev Y. G., Kruzhalov S. V., Lyabin N. A., Mokrushin Y. M., Shakin O. V., Shreter Y. G. Acousto-optical controllable ultra-violent laser radiation // XI Conference on Laser Optics.– St.Petersburg, Russia.–2003.–P. 55.

[A40] Gradoboev Y.G., Kruzhalov S.V., Mokrushin Y.M., Shakin O.V., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Ultraviolet acousto-optical controlled laser // VII International Conference for young researchers. Wave Electronics and Its Applications In Information and Telecommunication Systems.– St.Petersburg, Russia.–2004.–P. 38–41.

[A41] Ю.Г.Градобоев, Ю.В.Гуляев, М.А.Казарян, С.В.Кружалов, Н.А.Лябин, Ю.М.Мокрушин, О.В.Шакин. Управление амплитудой, длиной волны излучения и ее скважностью в УФ области спектра с накачкой лазером на парах меди // Симпозиум "ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ": Тез. докл.– Ростов на Дону.–2004.–С. 48.

[A42] Градобоев Ю.Г., Гуляев Ю.В., Казарян М.А., Кружалов С.В., Лябин Н.А., Мокрушин Ю.М., Шакин О.В. Источник УФ излучения на базе лазера на парах меди с акустооптическим управлением спектральными и временными характеристиками // Квантовая электроника.– 2004.–Т. 34, №12.– С.1133–1137.

[A43] Gradoboev Y.G., Kruzhalov S.V., Mokrushin Y.M., Shakin O.V., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Acousto-optical controlled generator-amplifier system on copper vapor lasers // VIII International Conference for young researchers. Wave Electronics and Its Applications In Information and Telecommunication Systems.– St.Petersburg, Russia.–2005.–P. 30–31.

[A44] Gulyaev Yu.V., Kazarian M.A., Lyabin N.A., Mokrushin Yu.M., Shakin O.V., Tamanyan A.G. Precision processing based on copper-vapour laser using optical system "Oscillator-amplifier" // Laser in engineering.– 2005.–Vol.15, No. 5–6.– P. 293–311.

[A45] Kazaryan M.A., Mokrushin Yu.M., Morozova E.A., Shakin O.V. Laser systems with acoustical optical control of output parameters for medical applications // The 7<sup>th</sup> International Conference. Atomic and molecular pulsed laser.–Tomsk, 12–16 September 2005.–Vol. E–23.–P. 67–68.

[A46] Гуляев Ю.В., Градобоев Ю.Г., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Ридигер В.В., Шакин О.В. Лазерная система генератор-усилитель на базе лазера на парах меди среднего уровня выходной мощности для подсветки архитектурных сооружений // Симпозиум "ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ".– Ростов на Дону: Тез. докл.– 2006.– С. 50.

[A47] Гуляев Ю.В., Градобоев Ю.Г., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Ридигер В.В., Шакин О.В. Лазерная система генератор-усилитель на базе лазера на парах меди среднего уровня выходной мощности для подсветки архитектурных сооружений // Межд. научной конф. "Фундаментальные основы инженерных наук", посвященная А.М.Прохорову: Сб. трудов.– Москва, 25–27 октября 2006.– Т.1.– С. 21– 27.

[A48] Kazaryan M.A., Mokrushin Yu.M., Morozova E.A., Shakin O.V. Laser systems with acoustical optical control of output parameters for medical applications // Proc. SPIE.– 2006. – Vol. 6263, 6263OW1–6263OW5.

[A49] Kulakov S. V., Gradoboev Yu. G., Mokrushin Yu. M., Shakin O. V., Kludzin V. V. Acousto-optic crystal devices for beam control of powerful lasers (Invited Paper) // Proc. SPIE.–13–17 August 2006.–Vol. 6314–29; Photorefractive fiber and crystal devices: Materials, Optical properties, and Applications: XII.– San Diego, California, USA, 13–17 August 2006.

[A50] Гуляев Ю.В., Градобоев Ю.Г., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Ридигер В.В., Шакин О.В. Лазерная система для подсветки архитектурных памятников // Строительные материалы, оборудование и технологии 21 века.– 2007.–№1.–С. 51.

[A51] Kulakov S. V., Mokrushin Yu. M., Gradoboyev Yu. G., Shakin O. V., Kludzin V, V. Acousto-optically tunable laser // Proc. SPIE.–Vol. 6698–60: Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications.– San Diego, California, USA, 26–27 August 2007.

[A52] Ю.М.Мокрушин, В.А.Парфенов. Использование лазера на парах меди для реставрации произведений искусства // Оптический журнал.– 2008.– Т. 75, № 7.–С. 88–90.



[A53] Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Парфенов В.А., Шакин О.В.. Использование лазера на парах меди для реставрации произведений искусства // Симпозиума "ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ": Тез. докл.– Ростов на Дону, 22–26 сентября 2008.– С. 40.

[A54] Gulyaev Yu.V., Gradoboev Y.G., Kazaryan M.A., Mokrushin Yu.M., Morozova E.A., Ridiger V.V., Shakin O.V. Laser system for the architectural constructions illumination // The 9<sup>th</sup> International Conference. "Atomic and molecular pulsed laser".– Tomsk, Russia, September 14-18, 2009.– E–11.– P. 61.

[A55] Gradoboev Y.G., Kazaryan M.A., Leontovich A.M., Lyabin N.A., Shakin O.V. Possibilities of cutting the sapphire coated with thin film of gan by second harmonics of copper vapour laser // The 9<sup>th</sup> International Conference. "Atomic and molecular pulsed laser".– Tomsk, Russia, September 14–18, 2009.– E–16.– P. 63.

[A56] Шакин О.В., Белый В.Н., Мокрушин Ю.М. и др. Оптимальные условия акустооптического взаимодействия в кристаллах с гиротропией // Симпозиум "ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ": Тез. докл.– Ростов на Дону, 20–24 сентября 2010.– С. 94.

[A57] Аксенов Е.Т., Баранов А.А., Марков В.А., Мокрушин Ю.М., Петров В.М. Исследование спектров поглощения вещества оптоакустическим методом со спектрально-временным стробированием // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование.– 2011.– № 1. – С.135–140.

[A58] Мокрушин Ю.М. Дифракция света на звуке вблизи оптической оси Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки гиротропного кристалла //.– 2011.– № 2. –С.93–105.

[A59] Мокрушин Ю.М. Формирование изображения строки в акустооптической системе с импульсным источником когерентного света // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.– 2011.– № 3. –С.99–109.

[A60] Мокрушин Ю.М. О влиянии нелинейности акустооптического взаимодействия в модуляторе из  $\text{TeO}_2$  на формирование изображения гармонических сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.– 2011.– № 4.–С. 118–129.

[A61] Шакин О.В., Белый В.Н., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Сачков В.И. Оптимальные условия акустооптического взаимодействия в кристаллах с гиротропией // Краткие сообщения по физике. ФИАН.–2011.–№ 8.–С.21–29.