

На правах рукописи

Аксенов Евгений Тимофеевич

**МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Санкт–Петербург

2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт–Петербургский государственный политехнический университет»

Официальные оппоненты:

доктор физико–математических наук, профессор Гуревич С.Б.;

доктор физико–математических наук, профессор Котов О.И.;

доктор технических наук, профессор Кузичкин А.В.;

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН

Защита состоится « 20 » октября 2005 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.229.01 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « » сентября 2005 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01,

доктор технических наук

Коротков А.С.

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация обобщает результаты теоретико-экспериментальных исследований и методов создания интегрально-оптических функциональных устройств для оптоэлектронных систем обработки информации.

Актуальность темы диссертации определяется тем, что развитие современных информационных технологий в связи со стремительным ростом объемов обрабатываемой информации требует создания и развития новых средств и алгоритмов обработки информации. Несмотря на значительные достижения современной цифровой микроэлектроники существуют задачи, которые не могут быть решены, особенно в режиме реального времени, только средствами цифровой электроники. Так обстоит дело, например, в отношении систем, реализующих те или иные виды интегральных преобразований в реальном времени. В этой области роль аналоговых процессоров сохраняется и сохранится, по всей видимости, в обозримом будущем. Таким образом, сбалансированное сочетание методов и средств цифровой и аналоговой обработки информации – путь развития современных и перспективных информационных систем. В значительной мере такой тенденции развития информационных систем отвечают оптоэлектронные системы передачи, обработки и хранения информации. Оптоэлектронные процессоры сочетают возможности оптики, электроники и цифровой техники.

Наиболее перспективными, с точки зрения проблем обработки, передачи и хранения информации, направлениями оптоэлектроники являются средства оптической вычислительной техники и волоконно-оптические системы связи (ВОСС). Успехи, достигнутые в области создания устройств и систем оптоэлектронной обработки информации, настолько заметны, что перспективность этого направления уже не может оспариваться. Основные преимущества оптических методов обработки информации: высокая степень параллелизма вычислений, малое время выполнения операций над двумерными массивами информации, возможность выполнения за один такт работы оптического процессора таких интегральных преобразований, как преобразование Фурье, корреляции, свертки. Однако, оптические процессоры – аналоговые устройства с относительно ограниченными функциональными возможностями. В связи с этим сочетание оптических и цифровых электронных вычислительных средств при решении тех или иных задач может дать и дает результаты недостижимые каждым из этих средств отдельно.

Не менее значимыми проблемами информационных технологий являются задачи передачи (и сбора) больших объемов информации, в том числе передачи широкополосных и сверхширокополосных сигналов.

Возможности оптоэлектронных систем обработки и передачи информации могут быть реализованы только при наличии соответствующей элементной базы. В этой связи важнейшее значение имеют исследования и разработки в области специальной элементной базы, обеспечивающей преобразование электрических сигналов в оптические (и наоборот) и возможность обработки информации на оптическом уровне. В связи с этим большой научный и практический интерес представляют функциональные элементы и устройства интегральной оптики. Результаты исследований в области интегральной оптики, имеющиеся в настоящее время настолько многообещающи, что даже на существующем уровне их практической реализации открываются новые возможности для решения задач обработки сигналов и техники связи. В настоящее время, например, достаточно широко применяются в ВОСС широкополосные и сверхширокополосные (2.5–40 ГГц) интегральные электрооптические модуляторы света, ведутся разработки устройств с полосой до 100 ГГц.

Современный этап развития средств интегральной оптики характеризуется созданием реальных промышленных функциональных устройств. Однако решение этой задачи оказывается сложным и неоднозначным прежде всего из-за большого разнообразия как функций, выполняемых интегрально-оптическими устройствами, так и возможных конструктивных решений, используемых материалов и применяемых методов изготовления. Определение областей применения и методов создания интегрально-оптических компонентов требует выполнения комплекса работ по выявлению физических свойств и технологических возможностей изготовления базовых волноводных элементов и узлов интегральной оптики. При этом принципиальными оказываются вопросы наибольшей простоты и наименьшей стоимости технологических процессов, обеспечивающих высокую повторяемость характеристик устройств и возможность их массового производства. К настоящему времени имеются заметные результаты, связанные с решением рассматриваемых проблем, однако многие вопросы в этой области еще требуют дальнейшей проработки.

Целью диссертационной работы является развитие нового перспективного направления, связанного с созданием физических основ технологии и методов создания функциональных элементов и устройств интегральной оптики для систем оптоэлектронной обработки, передачи и хранения информации и в рамках этого направления:

- определение концептуальной модели гибридного интегрального акустоопто-электронного спектроанализатора радиосигналов, теоретический анализ его параметров, определение путей оптимизации параметров элементов, входящих в его структуру и разработка методов интеграции их в единое устройство. Проверка адекватности расчетных методик физическому эксперименту;
- на основе теоретического анализа волноводного электрооптического взаимодействия в ниобате лития разработка методов создания ряда функциональных электрооптических элементов и устройств для модуляции, коммутации световых потоков в ВОСС, а также некоторых электрооптических устройств обработки информации. Практическая реализация и экспериментальное исследование этих устройств;
- теоретическое и экспериментальное исследование интегрально-оптических устройств и элементов с периодическими структурами с целью совершенствования методов изготовления периодических структур в оптических волноводах, выявления особенностей каналирования света в таких волноводах и создания лабораторных макетов ряда устройств на их основе;
- разработка новых и совершенствование известных методов создания планарных и полосковых волноводов в подложках из кристалла ниобата лития и стекла, разработка расчетных и экспериментальных методик оценки параметров таких волноводов и выявление их физических свойств.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими основными новыми результатами, полученными при решении поставленной задачи:

1. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований создан прототип гибридного интегрального акустооптического спектроанализатора (ИАОС) (защищен авторским свидетельством).

Разработана методика расчета ИАОС и функциональных элементов, входящих в его структуру, в том числе геодезических линз, свободных от аберраций. Получены соотношения, определяющие эффективность торцевого ввода светового излучения в оптический волновод. Впервые создан и исследован градиентный волноводный элемент связи, позволяющий формировать заданную диаграмму направленности светового излучения, выводимого из оптического волновода.

Теоретически и экспериментально определены пути улучшения характеристик ИАОС, в том числе: показана возможность увеличения скорости вывода данных из

ИАОС, рассмотрены методы увеличения разрешающей способности по частоте созданного прототипа ИАОС.

2. Теоретически и экспериментально обоснованы возможность построения принципиально нового типа оптоэлектронных процессоров, базирующихся на новом математическом методе вейвлет–анализа, оптических (акустооптических) вейвлет–процессоров, позволяющих проводить локальный спектральный анализ сигналов, в том числе определять локальные неоднородности сигналов. Создана и исследована лабораторная модель акустооптоэлектронного вейвлет–процессора на основе объемного акустооптического модулятора. Рассмотрен возможный метод построения интегрального акустооптоэлектронного вейвлет–спектроанализатора.

3. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по определению и физическому обоснованию возможности и особенностей применения интегральных электрооптических устройств для модуляции и коммутации в ВОСС и в системах оптической обработки информации. При этом:

Проведен теоретический анализ волноводного электрооптического взаимодействия, получены удобные для проведения численных расчетов соотношения. Теоретически обоснована и экспериментально исследована модель электрооптического модулятора полного внутреннего отражения (ПВО). Разработан и исследован макет гибридного бистабильного устройства на основе этого модулятора, экспериментально продемонстрированы различные режимы его работы: оптической памяти, оптического транзистора. Разработана оригинальная модель оптического ретранслятора на основе модулятора ПВО (защищена авторским свидетельством). Разработана методика изготовления волноводного интерферометрического модулятора типа Маха–Цендера, выявлены особенности изготовления, дана их физическая интерпретация. С точки зрения практических применений такого модулятора большее внимание уделено макетам устройств, которые могут найти применение в системах оптической обработки информации: был изготовлен и исследован макет фазометра радиосигналов, схема совпадения видеоимпульсов.

Изготовлен и исследован электрооптический модулятор на основе связанных полосковых оптических волноводов.

Изготовлены и исследованы макеты призматических электрооптических дефлекторов для применения в качестве многопозиционных переключателей в ВОСС. Теоретически и экспериментально обоснованы методики, позволяющие увеличить динамический диапазон дефлектора и оптимизировать его абберационные характеристики.

Разработаны и исследованы макеты передающих модулей для ВОЛС на одномодовых и многомодовых волокнах.

4. Разработаны и исследованы интегрально-оптические элементы с периодическими структурами.

Выполнен расчет и экспериментальное исследование дифракции каналируемого излучения на периодических структурах, сформированных в различных средах.

Разработана и реализована методика формирования голографическим способом дифракционных структур и разработана методика динамического контроля их параметров в процессе экспонирования и проявления.

Изготовлены и исследованы лабораторные макеты интегрально-оптических устройств: оптической памяти, разуплотнителя спектральных каналов для ВОЛС; элементов ввода-вывода светового излучения в оптический волновод с аподизацией фронта световой волны; компактного дифракционного интегрально-оптического коллиматора излучения полупроводникового лазера, обеспечивающего распределения интенсивности света по апертуре сколлимированного пучка близкие к гауссовскому, равномерному и экспоненциальному.

5. Разработаны физические модели процессов, проведены расчеты, предложены и реализованы методики формирования оптических волноводов, отвечающих требованиям интегральной оптики. При этом:

Разработаны новые простые и экономичные методики формирования планарных и полосковых волноводов, образованных диффузией ионов из расплава нитрата калия, из расплавов смесей различных нитратов и диффузией ионов из расплава нитрата калия с последующим отжигом в стекле К8.

Модифицированы и упрощены методы формирования оптических волноводов в ниобате лития за счет обратной диффузии окиси лития и прямой диффузии из пленки металлического титана в потоке атмосферного воздуха (защищено авторским свидетельством). Исследованы профили распределения титана в планарных диффузионных волноводах, сформированных в Y- и Z-срезах ниобата лития и определены коэффициенты диффузии в этих направлениях. Измерены коэффициенты боковой диффузии титана в подложках из ниобата лития Y- и Z-срезов. Исследованы методики формирования буферных (подэлектродных) диэлектрических слоев.

Научная значимость диссертационной работы определяется тем, что в рамках проведенного цикла теоретических и экспериментальных исследований и разработок

заложены и развиты основы нового научного направления – методов создания оптоэлектронных устройств интегральной оптики. Предложены и проанализированы на основе единых методов формирования, диагностики и расчета волноводных структур новый тип оптоэлектронных процессоров и функциональных устройств для аналоговой обработки сигналов и управления параметрами светового излучения в ВОСС. Выявленные особенности создания функциональных устройств и процессоров носят общий характер и могут быть применены при создании разнообразных устройств интегральной оптики. Полученные в работе результаты будут стимулировать дальнейшее развитие методов и средств оптоэлектронных информационных технологий.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть непосредственно использованы при разработке интегрально-оптических функциональных устройств для систем оптической обработки информации, волоконно-оптических систем связи и подсистем контроля параметров ВОСС, а также волоконно-оптических датчиков различной конфигурации (локальных или распределенных) и назначения.

Значительная часть результатов, полученных в диссертационной работе, непосредственно использована при выполнении 10 научно-исследовательских работ, проводившихся на кафедре квантовой электроники СПбГПУ совместно с учреждениями РАН (АН СССР) – ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ряда отраслевых институтов и предприятий: п/я А3390 (г. Москва), в/ч 33872 (г. Воронеж), п/я Г-4173 (г. Ленинград), п/я Г-4816 (г. Ленинград), п/я Г-7438 (г. Ленинград) и некоторых других. Автор являлся научным руководителем этих работ.

Публикации. Полный список печатных работ автора 137 наименований. Материалы диссертационной работы опубликованы в 86 печатных трудах, в том числе 5 авторских свидетельствах на изобретение.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах СПбГПУ, НПО «Оптика» (г. Москва), в/ч 33872 (г. Воронеж), п/я А3390 (г. Москва), а также докладывались на следующих конференциях:

- III Всесоюзной школе по оптической обработке информации. Рига. – 1980.
- Международной школе по когерентной оптике и голографии. Прага. – 1980.
- 1-ой Всесоюзной конференции по радиооптике. Фрунзе. – 1981.

- III, IV, V, VI, VIII региональных семинарах «Оптические и оптоэлектронные устройства обработки информации и управление технологическими процессами». Краснодар. – 1981, 1982, 1983, 1984, 1990.
- Всесоюзной конференции по прикладной физике. Использование современных физических методов в неразрушающих исследованиях и контроле. Хабаровск. – 1981.
- III Всесоюзной конференции «Оптика лазеров». Ленинград. – 1982.
- Всесоюзной конференции по голографии и оптической обработке информации. Ереван. – 1982.
- Всесоюзном научно-техническом совещании «Измерительные устройства на диэлектрических волноводах оптического диапазона». Могилев. – 1983.
- XII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. – 1983.
- IV Всесоюзной конференции «Оптика лазеров». Ленинград. – 1984.
- V Всесоюзной школе по оптической обработке информации. Киев. – 1984.
- XVII Всесоюзной конференции «Радиоастрономическая аппаратура». Ереван. – 1985.
- VI Всесоюзной школе-семинаре по оптической обработке сигналов. Фрунзе. – 1986.
- V Всесоюзной конференции «Оптика лазеров». Ленинград. – 1987.
- I-ой Всесоюзной конференции по оптической обработке информации. Ленинград. – 1988.
- Всесоюзной НТК «Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах». Тбилиси. – 1988.
- School-Seminar «Acoustooptics Researches and Developments». Leningrad. – 1990.
- First International Fiber Optical Conference. Leningrad. – 1991.
- IV Всероссийской научно-методической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах». Санкт-Петербург. – 2000.
- 12-й межвузовской НТК «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы подготовки специалистов». Петродворец. – 2001.
- Конференции «Лазеры, измерения, информация». Санкт-Петербург. – 2001.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 268 стр., в том

числе 119 стр. с рисунками. Список литературы включает 255 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложенная концепция создания гибридного интегрального акустооптического спектроанализатора и ее практическая реализация позволяют создавать устройства применимые в реальных системах обработки сложных широкополосных и сверхширокополосных радиосигналов. Разработанный набор методик создания и расчета параметров элементов, входящих в структуру спектроанализатора: элемента ввода светового излучения в оптический волновод, двухмерного градиентного элемента вывода светового излучения из оптического волновода, безаберрационных (с малыми абберациями) волноводных геодезических линз, широкополосных встречно-штыревых пьезопреобразователей – позволяет изготавливать эти элементы с хорошо прогнозируемыми характеристиками и использовать подобные элементы при создании широкого ряда иных интегральных оптоэлектронных устройств.
2. Разработанные и развитые расчетные и экспериментальные методы оптимизации характеристик предложенного прототипа спектроанализатора позволяют: увеличить его быстродействие за счет применения матричного фотоприемника или быстродействующего одиночного фотоприемника; увеличить частотное разрешение спектроанализатора путем реализации схемы с интегрированием по времени, модификации элементов спектроанализатора.
3. Предложенная концепция и экспериментальная реализация акустооптоэлектронного вейвлет–процессора позволяют создавать принципиально новый тип оптоэлектронных процессоров хорошо адаптированных, в частности, для анализа внутренней частотно-временной структуры сложных радиосигналов. При этом развитые в работе методики создания интегрально-оптических элементов позволяют реализовывать гибридный интегральный вариант оптоэлектронного вейвлет–процессора, что может заметно расширить области применения методов и средств интегральной оптики в информационной оптоэлектронике.
4. Разработанные и развитые методики расчета и создания интегральных электрооптических функциональных элементов и устройств позволяют создавать ряд новых функциональных устройств для систем оптической обработки сигналов и волоконно-оптических систем связи. В том числе: гибридные оптоэлектронные бистабильные устройства, оптоэлектронные элементы ретрансляторов для ВОСС, фазометры радиосигналов, передающие модули для одно– и многомодовых волоконно-

оптических линий связи; интегральные электрооптические многопозиционные призмные дефлекторы с компенсированными аберрациями.

5. Предложенные и развитые методы расчета, создания и экспериментального исследования периодических элементов в структурах: оптический волновод-покрывающая пленка (халькогенида или фоторезиста) – позволяют создавать прототипы ряда устройств для оптических систем обработки информации и ВОСС, в том числе: устройства оптической памяти, аподизированные периодические элементы связи, интегрально-оптические устройства спектрального разуплотнения для волоконно-оптических линий связи.
6. Разработанные оригинальные и усовершенствованные методы создания и расчета позволяют изготавливать планарные и полосковые оптические волноводы в подложках из кристалла ниобата лития и стекла с заданными характеристиками и их высокой повторяемостью при существенной простоте и экономичности технологических процессов. Разработанные методики метрики характеристик позволяют достоверно определять характеристики изготавливаемых волноводов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определены цель работы и решаемые в ней задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации предложена концепция, методы создания, расчета и экспериментального исследования гибридного интегрального акустооптоэлектронного спектроанализатора радиосигналов [1]. Структурная схема ИАОС представлена на рис. 1. Здесь: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – подложка из LiNbO_3 с планарным оптическим волноводом; 3, 4 – коллимирующая и интегрирующая геодезические волноводные линзы; 5 – линейка ПЗС фотоприемников; 6 – пьезоэлектрический преобразователь встречно-штыревого типа (ВШП). Предложенная схема ИАОС состоит из ряда элементов, часть из которых сформирована на одной подложке из кристалла ниобата лития, а некоторые элементы являются внешними по отношению к подложке и определенным образом стыкуются с ней. Построение ИАОС в виде гибридного устройства является в настоящее время наиболее доступным и экономичным методом, позволяющим создать каждый элемент интегрально-оптического устройства на оптимальном для него материале, поскольку до сих пор нет еще материала, на базе которого можно построить монолитную схему. В работе в качестве основного материала для построения ИАОС был выбран кристалл ниобата лития. Выполнен комплекс теорети-

ческих и экспериментальных исследований по разработке элементной базы ИАОС: волноводных линз, пьезопреобразователей, элементов стыковки оптического волновода с полупроводниковым лазером и линейкой ПЗС-фотоприемников – с оптимальными характеристиками.

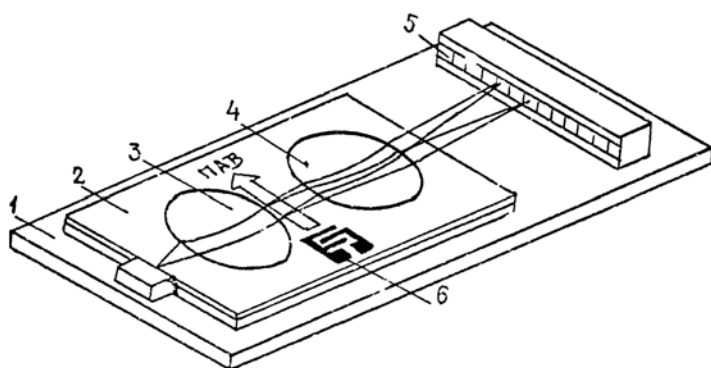


Рис. 1. Структурная схема прототипа гибридного интегрального акустооптического спектроанализатора.

Оптический волновод, в данном случае планарный, является основным для любого интегрально-оптического устройства и, поскольку разработка и создание оптических волноводов в диэлектрике является достаточно обширной проблемой, этот вопрос рассматривается отдельно в главе 4.

Для коллимации и преобразования света в работе, на основе проведенного анализа, были выбраны волноводные геодезические линзы. Проведен анализ aberrаций геодезических линз, показано, что безабберационная апертура сферических геодезических линз составляет ~20% от общей апертуры. Рассмотрены методы увеличения безабберационной апертуры этих линз путем их компенсации aberrаций путем изготовления асферических поверхностей линз. Приведена разработанная методика расчета профилей поверхностей асферических геодезических линз, методика их изготовления и проведено экспериментальное исследование изготовленных линз. На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости относительных продольных aberrаций таких линз от величины смещения светового пучка относительно оптической оси линзы, нормированного на величину радиуса углубления в плоскости подложки X. Разработанные методики позволили изготавливать геодезические линзы с безабберационной апертурой 70–80% т.е. втрое большей, чем в случае сферических линз.

Возбуждение поверхностных акустических волн (ПАВ), т.е. ввод радиосигнала в ИАОС, осуществлялось ВШП. В работе проведен расчет и реализованы два типа ВШП: многосекционные эквидистантные, повернутые относительно друг друга и дисперсионные с меняющимся шагом между электродами. Преобразователи позволяли возбуждать ПАВ в полосе частот до ~500 МГц (рис. 3).

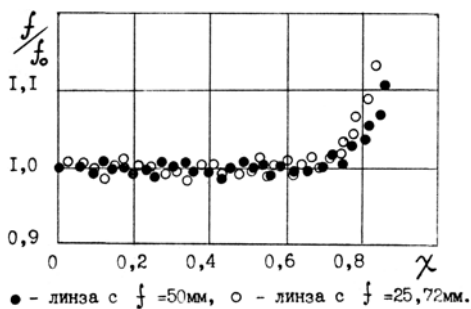


Рис. 2. Зависимость относительных продольных aberrаций асферических линз от величины смещения светового пучка относительно оси линзы.

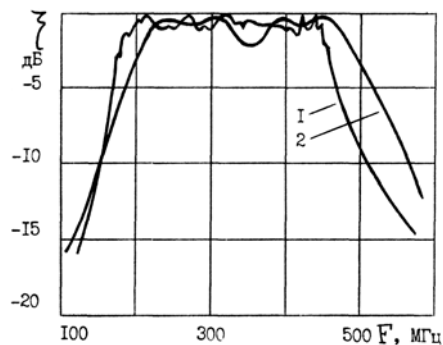


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики брэгговских ячеек с дисперсионным (1) и эквидистантным (2) встречно-штыревыми преобразователями.

Проведен теоретический анализ эффективности ввода излучения полупроводникового лазера в оптический волновод через его торец. Полученные соотношения, в отличие от обычно применяемых, учитывают непостоянство коэффициента отражения света от торца оптического волновода. Исследована эффективность ввода света в волновод в зависимости от взаимного расположения лазера и торца оптического волновода. Вид экспериментальных и расчетных зависимостей эффективности ввода излучения лазера в оптический волновод от расстояния между лазером и торцом волновода представлены на рис. 4. На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости эффективности ввода излучения от поперечного смещения лазера. На основании полученных расчетных и экспериментальных результатов выработаны рекомендации и разработаны методы стыковки ППЛ с оптическим волноводом.

Разработан метод вывода светового излучения из оптического волновода через градиентный элемент связи, позволяющий формировать диаграмму направленности излучения требуемой ширины, для ее согласования с размерами элемента линейки ПЗС фотоприемника (рис. 6). Разработаны рекомендации по практической реализации этого элемента связи.

На основании полученных результатов была осуществлена интеграция элементов ИАОС и изготовлен прототип акустооптоэлектронного процессора спектроанализатора. Надо отметить, что данная разработка была ориентирована на серийно выпускаемые отечественной промышленностью полупроводниковые лазеры и линейки ПЗС-фотоприемников. Были проведены теоретические оценки характеристик ИАОС: полосы рабочих частот, разрешения по частоте, дифракционной эффективности, динамического диапазона. Проведенные оценки показывают, что при выбранной схеме и методах реализации элементов ИАОС можно ожидать абсолютную полосу рабочих

частот равную 300–500 МГц, разрешение по частоте 3–5 МГц, динамический диапазон 30–40 дБ, дифракционную эффективность $>30\%/Вт$. Конструктивно акустоопто-электронный процессор представлял собой модуль с габаритами $115 \times 64 \times 30 \text{ мм}^3$ (рис. 7). На основе этого процессора был реализован прототип ИАОС, содержащий необходимое электронное обрамление и представлявший собой малогабаритный, мобильный прибор рис. 8. Полоса рабочих частот ИАОС 300 МГц (200–500 МГц), разрешение по частоте 3 МГц, дифракционная эффективность $\sim 60\%/Вт$, динамический диапазон $\sim 30 \text{ дБ}$.

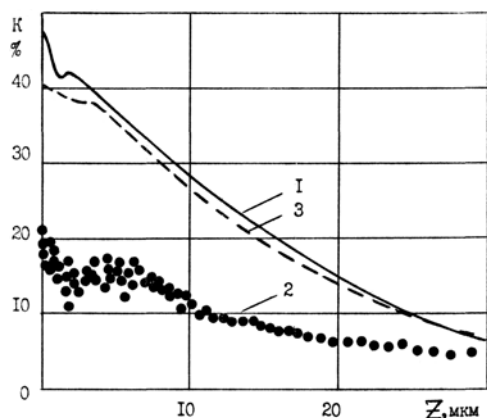


Рис. 4. Зависимость эффективности ввода излучения лазера в оптический волновод от расстояния между лазером и торцом волновода. На рисунке обозначены: 1 – расчетная кривая; 2 – результат эксперимента; 3 – усредненные экспериментальные данные с учетом коэффициента пропускания.

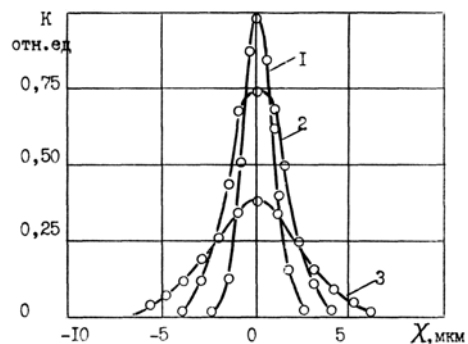


Рис. 5. Зависимость эффективности ввода излучения от поперечного смещения лазера. На рисунке цифрами обозначены: 1 – $Z=0$; 2 – $Z=10$ мкм; 3 – $Z=20$ мкм.

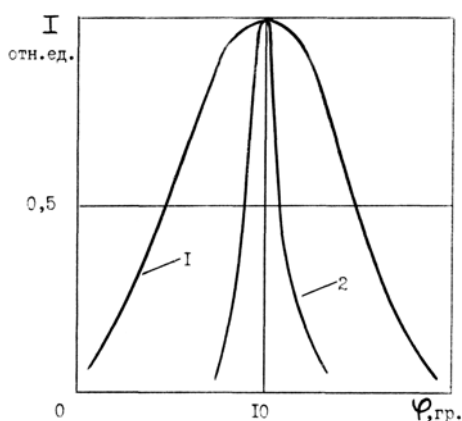


Рис. 6. Диаграммы направленности излучения: 1 – из торца оптического волновода; 2 – из градиентного элемента связи, расходимость диаграммы 1° .

Рассмотрены пути улучшения некоторых характеристик разработанного ИАОС: увеличения скорости вывода данных, увеличения разрешения по частоте. В том числе, теоретически проанализирована и экспериментально исследована схема ИАОС с одиночным быстродействующим фотоприемником. Изготовлен лабораторный макет такого ИАОС, в котором при полосе рабочих частот 80 МГц достигнутая скорость считывания составила $2 \cdot 10^4$ разрешимых положений в секунду, что более чем

на порядок превосходит скорость вывода данных базовой модели ИАОС.



Рис. 7. Внешний вид акустооптоэлектронного процессора ИАОС.



Рис. 8. Прототип интегрального акустооптоэлектронного спектроанализатора.

Расширение областей возможных применений ИАОС связано как с улучшением их характеристик, так и с поиском принципиально новых алгоритмов их функционирования и принципов построения.

Одним из возможных подходов к построению перспективных акустооптоэлектронных процессоров, в том числе интегрально-оптических, является применение нового математического аппарата анализа сигналов – вейвлет–преобразования.

Вейвлет–преобразование состоит в разложении исследуемого сигнала по набору функций вида

$$\psi_{i,j}(t) \equiv \psi_{\alpha_i, \beta_j}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} \psi\left(\frac{t - \beta_j}{\alpha_i}\right), \quad (1)$$

где α_i – параметр масштабирования, а β_j – параметр сдвига. При этом функция $f(t)$ может быть представлена в виде ряда

$$f(t) = \sum_{i,j=-\infty}^{+\infty} c_{i,j} \cdot \psi_{i,j}(t), \quad (2)$$

а коэффициенты разложения определяются соотношением

$$c_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{i,j}^*(t) dt. \quad (3)$$

Вейвлет–преобразование обладает локализованным одновременно в пространстве частот и во времени частотно–временным окном, параметры которого зависят от частоты. На низких частотах оно обладает более высоким разрешением по частоте и более низким – по времени, а на высоких частотах – наоборот: более высоким разрешением по времени и более низким – по частоте. При этом остается постоянной относительная разрешающая способность по частоте и «площадь» частотно–временного окна:

$$\delta\omega/\omega = const, \quad \delta\omega \cdot \delta t = const; \quad (4)$$

На основании проведенного теоретического анализа разработан, изготовлен и исследован лабораторный макет акустооптоэлектронного вейвлет–процессора на базе объемного акустооптического модулятора.

Схема этого варианта вейвлет–процессора представлена на рис. 9.

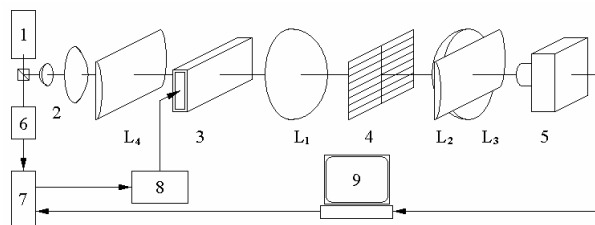


Рис. 9. Схема оптического вейвлет–процессора для обработки реальных сигналов.

Для ввода сигнала используется акустооптический модулятор 3, помещенный во входной плоскости системы. Регистрация распределения светового поля осуществляется ПЗС–камерой. В качестве исследуемого сигнала использовался фазо-

манипулированный сигнал, представляющий собой последовательность двух радиоимпульсов, фазы которых отличаются на π . Длительность импульсов составляет 3.3 мкс, они следуют друг за другом без задержки, несущая частота равна 38.5 МГц.

Для формирования исследуемого сигнала изготовлен специальный генератор 8 и устройство синхронизации 7. Устройство синхронизации, управляемое компьютером 9, обеспечивает формирование заданной задержки между началом сигнала и импульсом излучения лазера 1.

В ходе эксперимента получено время–частотное распределение фазоманипулированного сигнала, представленное на рис. 10А. В области скачка фазы наблюдается значительное ослабление отклика на частоте несущей и появление дополнительных компонент в спектре сигнала. Это позволяет идентифицировать наличие скачка фазы в исследуемом сигнале и локализовывать его во времени. Для оценки работы вейвлет–процессора при наличии помех, на вход подавалась сумма фазоманипулированного сигнала и гармонического сигнала, близкого по частоте. Частота помехи составляла 40.0 МГц. Соответствующее время–частотное распределение представлено на рис. 10В. Видно, что скачок фазы может быть обнаружен и локализован при наличии близкой по частоте интенсивной гармонической помехи.

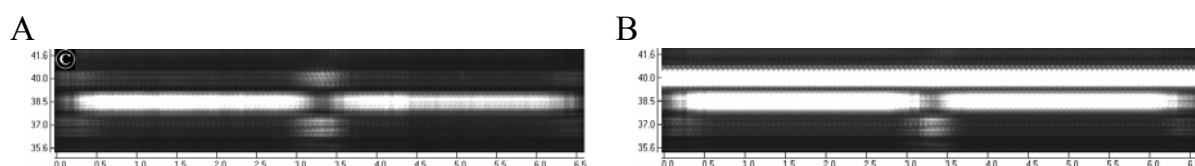


Рис. 10. Вейвлет–преобразование фазоманипулированного сигнала, полученное в ходе эксперимента: А – без помехи; В – в присутствии гармонической помехи.

Таким образом, по результатам эксперимента можно утверждать о пригодности разработанного оптического вейвлет–процессора для анализа внутренней структуры

сигналов.

Перспективной и практически значимой является разработка интегрального акустооптического вейвлет–процессора подобного ИАОС. Решение этой задачи в первую очередь связано с разработкой метода ввода в структуру интегрально-оптического процессора требуемого вейвлет–фильтра. Возможным путем решения этой задачи является формирование фильтра в планарном оптическом волноводе или пленках халькогенидов и фоторезистов, нанесенных на поверхность волновода (глава 3).

Во второй главе рассмотрены особенности электрооптического взаимодействия в оптических волноводах, сформированных в подложках из кристалла ниобата лития. Теоретически проанализирована и экспериментально исследована работа ряда интегральных электрооптических модуляторов и переключателей.

Подробно рассмотрен модулятор на основе нарушенного полного внутреннего отражения (ПВО), особенности его построения на основе планарных и полосковых волноводов. Такие модуляторы привлекают сравнительной простотой конструкции, возможностью реализовать на их основе как собственно модуляторы, так и модуляторы-переключатели типа 2×2 и более сложные. Структура модулятора ПВО на основе полосковых оптических волноводов с простейшей системой электродов представлена на рис. 11. В работе проводилось экспериментальное исследование разработанных лабораторных макетов модуляторов-переключателей ПВО на основе планарных и пересекающихся полосковых многомодовых оптических волноводов. На рис. 12 приведены экспериментальные и расчетные зависимости для модулятора ПВО на основе полосковых оптических волноводов с углом пересечения $\alpha=4^\circ$, зазор между электродами составлял 4 мкм, ширина электродов – 10 мкм, а длина – 2.5 мм. Емкость электродной структуры составляла $C=1.9$ пф (при расчетном значении $C=1.7$ пф), что соответствует полосе рабочих частот ~ 4 ГГц. Соотношение интенсивностей света в перекрестном канале при управляющих напряжениях 0 В и 60 В $I_{0\max}/I_{0\min}=22.5$ дБ. Для прямого канала $I_{\max}/I_{\min}=7$ дБ. Меньшее значение контраста для прямого канала связано с туннельным прохождением света межэлектродного зазора. Равные интенсивности света на выходах модулятора достигались при напряжении на электродах $U=41$ В, а при напряжении 60 В интенсивность света в перекрестном канале составила 80% интенсивности света в прямом канале при нулевом напряжении. Развязка между выходами модулятора составила $I_{\max}/I_{0\min}=15.3$ дБ при напряжении 60 В и $I_{0\max}/I_{\min}=10.1$ дБ при нулевом управляющем напряжении. В практических устройствах угол пересечения

полосковых волноводов должен выбираться в пределах $2^\circ-4^\circ$.

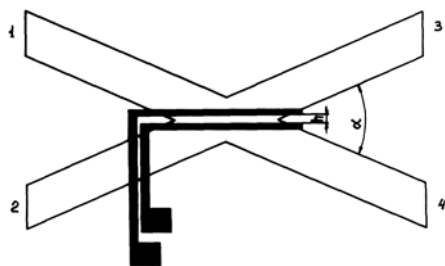


Рис. 11. Структура модулятора ПВО на основе полосковых волноводов.

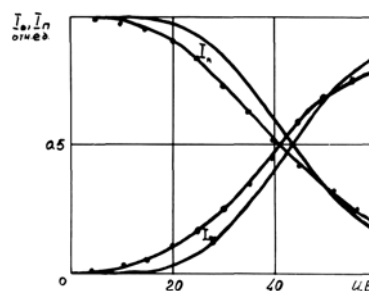


Рис. 12. Экспериментальные и расчетные зависимости интенсивностей отраженного и прошедшего света от управляющего напряжения для модулятора ПВО на основе пересекающихся полосковых волноводов ($\alpha=4^\circ$).

Проведенные расчеты показали, что при использовании многоэлектродных (типа встречно-штыревых) управляющих структур, содержащих 8–10 пар электродов, передаточная характеристика модулятора близка к ступенчатой рис. 13. Это позволяет снизить управляющее напряжение до 5–6 В. Кроме функций модуляторов-переключателей для ВОСС рассмотренные модуляторы ПВО могут быть применены для построения ряда иных функциональных устройств для ВОСС и систем оптической обработки информации.

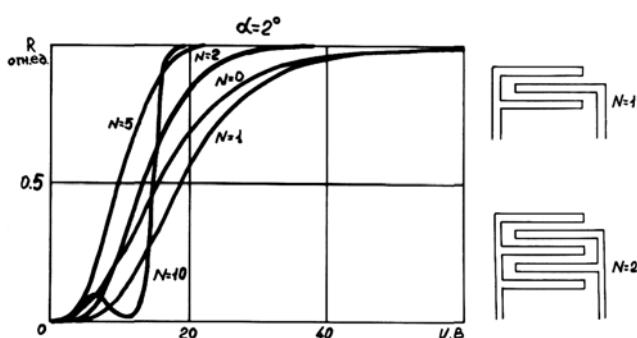


Рис. 13. Расчетные зависимости интенсивности отраженного света на выходе многоэлементного модулятора ПВО от управляющего напряжения ($\theta=89^\circ$).

Разработано и экспериментально исследовано гибридное бистабильное оптическое устройство (БОУ) на основе модулятора ПВО с планарным оптическим волноводом. Для получения бистабильного режима работы в структуру модулятора ПВО была введена внешняя цепь положительной обратной связи по интенсивности отраженного светового пучка.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 14. Амплитудные характеристики устройства рис. 15 представляют собой гистерезисные кривые. Цифры на кривых соответствуют величине напряжения смещения. Явление гистерезиса позволило реализовать различные режимы работы устройства: режим оптической памяти, оптического транзистора и другие.

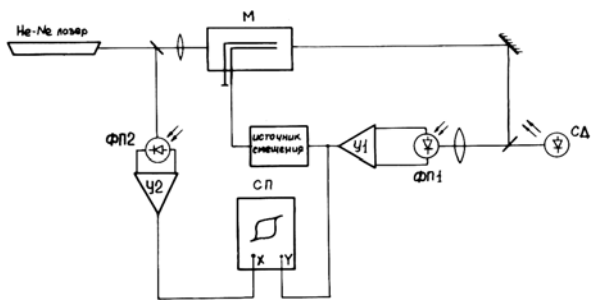


Рис. 14. Структурная схема установки для исследования оптической бистабильности.

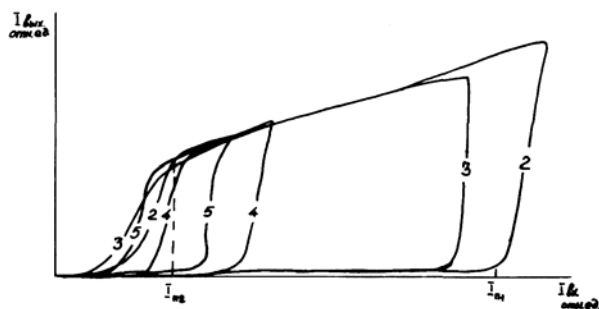


Рис. 15. Амплитудные характеристики БОУ для различных напряжений смещения.

Предложена концепция и исследована лабораторная модель устройства ретрансляции оптических сигналов для применения в волоконно-оптических линиях связи, построенная на основе БОУ (защищена авторским свидетельством). Важной особенностью такого ретранслятора является возможность амплитудной селекции проходящих сигналов с регулируемым порогом срабатывания без введения дополнительных электронных устройств. Кроме того, в таких ретрансляторах лазер работает в непрерывном режиме, что позволяет устранить уширение спектра излучения и снизить шумы в линии.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование особенностей работы модулятора типа интерферометра Маха–Цендера как функционального устройства для ВОСС. На его основе разработан и реализован макет передающего модуля для ВОСС. Разработаны методы создания таких модулей.

Разработаны и реализованы лабораторные макеты фазометра радиосигналов и схемы регистрации временного совпадения видеоимпульсов. При больших сдвигах фазы сигналов точность ее определения составляет $\sim 3^\circ$, а при малых – $\sim 10^\circ$. Выбирая постоянным смещением рабочую точку интерферометра, при раздельном питании плеч интерферометра, можно получить режим, при котором происходит вычитание, поступающих на вход модулятора последовательностей видеоимпульсов при условии их совпадения во времени.

Исследовались особенности создания модуляторов на основе связанных полосковых волноводов, определены пути оптимизации параметров волноводной структуры, позволяющие снизить управляющее напряжение до 1 В. На основе разработанного модулятора реализован макет передающего модуля для одномодовых ВОЛС, разработаны методы изготовления таких модулей.

В работе проведен теоретический анализ призмического интегрального электрооптического дефлектора (ПЭОД), определены пути компенсации искажений фазового

фронта световой волны на выходе дефлектора. Был изготовлен и исследован лабораторный макет интегрального ПЭОД на основе шестиэлементной решетки дефлекторов. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик.

Третья глава посвящена разработке методик формирования периодических структур в пленках светочувствительных материалов, расчету и исследованию особенностей каналирования и дифракции света в оптических волноводах с периодическими структурами, созданию и исследованию лабораторных макетов ряда интегрально-оптических устройств с периодическими структурами для проверки предлагаемых методик.

Светочувствительными материалами в проводившихся исследованиях служили пленки фоторезистов и пленки халькогенида As_2S_3 . Для обеспечения малых оптических потерь для каналирования светового излучения были предложены и использованы слоистые структуры: оптический волновод – покрывающая пленка, с преобладанием доли энергии светового поля, локализованной в оптическом волноводе с малыми потерями. Волноводы, использовавшиеся в работе, формировались в стекле К8 диффузией ионов калия из расплава KNO_3 .

Анализ распределений светового поля по глубине оптического волновода, доли энергии поля, локализованной в пленке, эффективных показателей преломления волноводной моды и модуляции показателя преломления моды по отношению к модуляции показателя преломления пленки в случае пленок различной толщины для слоистых систем оптический волновод – покрывающая пленка позволил выбрать толщину наносимой пленки так, чтобы при малых оптических потерях, вносимых пленкой, относительная модуляция эффективного показателя преломления каналируемой моды была достаточной.

В случае применения пленок As_2S_3 , вносящих большие оптические потери, их толщина выбиралась равной $T=0.02$ мкм. При таких толщинах доля энергии света, заключенная в пленке, не превышает 5%. Это позволяет при значительном уменьшении затухания по сравнению с распространением света в пленочном халькогенидном волноводе (~в 20 раз) достичь значительной модуляции эффективного показателя преломления. Согласно графику, представленному на рис. 16, для известных толщины пленки T ($T=0.02$ мкм) и изменения показателя преломления пленки Δn ($\Delta n=0.01$) может быть определена модуляция эффективного показателя преломления TE_0 -моды, которая в рассматриваемом случае составляет $\Delta N_0=0.002$.

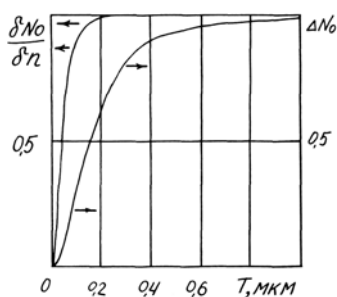


Рис. 16. Изменение модуляции эффективного показателя преломления каналируемой TE_0 -моды по отношению к модуляции показателя преломления пленки $\Delta N_0/\Delta n$ и изменение эффективного показателя преломления каналируемой TE_0 -моды ΔN_0 градиентного стеклянного волновода в зависимости от толщины T пленки.

быстроту определения требуемых режимов формирования и воспроизводимость характеристик. Считывание производилось светом волноводной моды. Экспозиция, соответствующая максимуму Δn в рассматриваемом случае составляет $\Phi=1.5$ Дж/см².

Эффективность дифракции света (считывания) зависит, кроме перечисленных параметров, от длины, в направлении распространения света, периодической структуры L . Для определения L была разработана методика, состоявшая в формировании в пленке As_2S_3 фазовой решетки треугольной формы.

При перемещении вводимого в оптический волновод светового пучка поперек дифракционной структуры регистрировалась мощность света в дифракционном пучке. При $L=7$ мм наблюдалась максимальная эффективность брэгговской дифракции $\eta=60\%$. Эта длина решетки была выбрана для реализации элемента оптической памяти.

На основе полученных расчетных и экспериментальных данных по оптимальным толщине пленок, интегральной экспозиции и длине периодической структуры, обеспечивающих максимальную эффективность считывания, был реализован лабораторный макет интегрально-оптического элемента голографической памяти. Структурная схема макета представлена на рис. 17.

Длина периодической структуры 6, сформированной в халькогенидной пленке 5, составляла $L=7$ мм, период структуры $\Lambda=0.84$ мкм. Информация в виде кода 101 через транспарант переносилась на образец в процессе экспонирования. Распределение интенсивности света в дифрагированном пучке в рассматриваемом случае наблюдалась на экране 9. Фотография такого распределения представлена на рис. 18.

Запись периодических фазовых структур в фоточувствительных пленках осуществлялась голографическим способом интерференционной картиной, полученной при сведении двух сферических световых пучков, периоды интерференционной картины составляли 0.28–2.5 мкм. Особенностью схемы записи является возможность контроля параметров формируемой фазовой структуры (за счет изменения показателей преломления) непосредственно в процессе экспонирования. Такой контроль обеспечивает

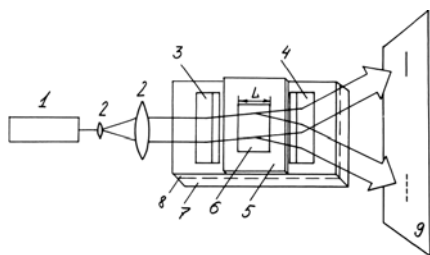


Рис. 17. Структурная схема волноводно-го элемента оптической памяти на основе тонкой пленки As_2S_3 . На рисунке обозначены: 1 – He-Ne лазер; 2 – линзы; 3, 4 – элементы ввода–вывода излучения; 5 – пленка As_2S_3 ; 6 – дифракционная структура с записанной информацией; 7 – подложка; 8 – оптический волновод; 9 – экран.

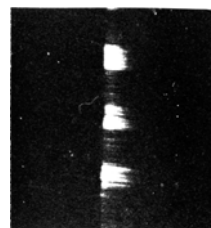


Рис. 18. Фотография дифрагированного пучка со считанной информацией, записанной в фоторезистивной пленке.

Информация, записанная в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников за счет модуляции их показателя преломления, может храниться либо неопределенно долгое время, либо может быть стерта и заменена новой вследствие реверсивности таких материалов. Плотность записи информации составляет 200–300 бит/мм. При введении в структуру устройства фокусирующих и коллимирующих элементов, например, геодезических линз, оно может быть использовано совместно с оптическими волокнами, т.е. введено в структуру ВОСС.

В случае создания интегрально-оптического устройства оптической памяти неревверсивного типа в качестве материала фоточувствительной пленки возможно использование фоторезиста. На основании расчетов и экспериментального исследования по разработанным методикам для создания лабораторного макета этого устройства выбиралась толщина пленки фоторезиста $T=1$ мкм при изменении показателя преломления (максимально достижимом) $\Delta n=0.003$. Длина волны записывающего излучения составляла $\lambda=0.44$ мкм, а период записываемой дифракционной решетки $\Lambda=9$ мкм. Длина решетки в направлении распространения света равнялась $L=3$ мм. Эффективность волноводной дифракции при этом составляла $\eta=60\%$. На основании полученных данных была изготовлена и исследована модель интегрально-оптического элемента долговременной памяти. Структурная схема этого устройства и метод записи информации (бинарной) подобны рассмотренным для случая халькогенидных пленок. Плотность записи информации в фоторезистивном носителе достигает 600–900 бит/мм. Как и в предыдущем случае эти устройства могут быть эффективно состыкованы с оптическими волокнами и интегрально-оптическими модулирующими и отклоняющими устройствами.

Фактором, ограничивающим использование полупроводниковых лазеров, в частности, в системах оптической обработки информации, является значительная угловая ширина диаграммы направленности, составляющая в ряде случаев десятки градусов. Поэтому возникает необходимость введения объемной коллимирующей оптики, что приводит к увеличению габаритов устройств. Для решения этой проблемы разработан и реализован компактный интегрально-оптический коллиматор-расширитель излучения полупроводникового лазера. При изготовлении интегрально-оптического коллиматора использована разработанная методика получения дифракционных решеток вывода излучения с переменным по длине коэффициентом связи, что позволяет обеспечить требуемое распределение интенсивности по апертуре выводимого светового пучка. Реализованы равномерное, гауссовское и экспоненциальное распределения интенсивности света. Размеры сколлимированного светового пучка составляли $1 \times 8 \text{ мм}^2$.

Необходимыми элементами волоконно-оптических линий со спектральным уплотнением сигналов являются разуплотнители спектральных каналов. Дифракционные решетки, сформированные методом электродиффузии, с эффективной ($\sim 30\%$ в первом дифракционном порядке) дифракцией в режиме Рамана–Ната, позволили изготовить макет спектрального разуплотнителя, не требующего точных угловых юстировок. Разуплотнитель представляет собой стеклянную подложку с оптическим волноводом и дифракционной решеткой, расположенной между коллимирующей и интегрирующей волноводными геодезическими линзами. Излучение из жестко состыкованного и склеенного с торцом световода оптического волокна вводилось в оптический волновод, имевший глубину, равную диаметру сердцевины волокна, коллимировалось, дифрагировало на «тонкой» дифракционной решетке, фокусировалось и попадало на входные торцы выходных волоконных световодов. В экспериментах в оптическое волокно на входе устройства вводилось излучение лазера на парах меди, имеющее две спектральные компоненты $\lambda_1=578.2 \text{ нм}$ и $\lambda_2=510.5 \text{ нм}$. Макет спектрального разуплотнителя обеспечивал разделение этих спектральных компонент.

В четвертой главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку и развитие основ технологии и метрики планарных и полосковых волноводов и волноводных структур в подложках из кристалла ниобата лития и стеклах.

Исследовались два метода изготовления волноводов в подложках из ниобата лития: за счет обратной диффузии Li_2O из LiNbO_3 путем отжига в потоке воздуха; за счет

диффузии титана из металлической пленки, нанесенной на поверхность подложки.

Проведенные эксперименты по формированию волноводов обратной диффузией показали, что при этом реализуется сравнительно медленное формирование волноводов, что обеспечивает требуемую повторяемость их характеристик. Так одномодовый волновод формировался в результате полуторачасового отжига образца. Были измерены значения эффективных показателей преломления ТЕ–мод оптических волноводов, изготовленных при различных режимах отжига в потоке воздуха, и по этим данным расчетным путем [2] был восстановлен профиль изменения показателя преломления оптического волновода, рис. 19. При формировании оптических волноводов обратной диффузией возможно изменение только одного показателя преломления кристалла – n_e , что соответствует наличию оптического волновода одного типа – способного каналировать только ТЕ–моды, что является определенным ограничением.

Волноводы, сформированные диффузией титана в ниобат лития могут поддерживать распространение как ТЕ, так и ТМ мод, значение $\Delta n(0)$ для них лежит в пределах 0.001–0.05, а в качестве подложек могут быть использованы пластинки с любой необходимой ориентацией кристаллографических осей. При изготовлении волноводов таким методом можно варьировать два параметра – время диффузии и толщину нанесенной пленки титана, что дает возможность формировать волноводы с наперед заданным эффективным показателем преломления и глубиной проникновения данной моды. В работе предложена [3] и реализована новая методика формирования оптических волноводов с заданными характеристиками диффузией из пленки металлического титана в потоке воздуха, при этом необходимой фазой процесса является полное окисление пленки титана до двуокиси титана к моменту начала диффузии. На рис. 20 представлен восстановленный для одного из исследовавшихся образцов профиль изменения показателя преломления для необыкновенного (ТЕ–мода) луча и соответствующая расчетная кривая.

Результаты относятся к случаю распространения света вдоль оси X в оптическом волноводе, сформированном в подложке ниобата лития Y–среза. Оцененный коэффициент диффузии D составляет $8.7 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$.

Проведенные расчеты и эксперименты показали, что для сравнительно больших глубин (x) локализации волноводов проявляется влияние обратной диффузии Li_2O . Для устранения этого эффекта методика формирования волноводов диффузией титана была модифицирована. При проведении диффузии титана в потоке увлажненного воздуха за счет внедрения в подложку ниобата лития гидроксила OH^- снижалась под-

вижность ионов Li^+ , что привело к подавлению процесса обратной диффузии. Кроме этого, полученные по такой методике волноводы обладают повышенной (~10 раз) лучевой прочностью. Таким образом, разработанная методика позволяет формировать высококачественные волноводы с низкими (<1 дБ/см) оптическими потерями, малой эффективной толщиной и высокой стойкостью к оптическому разрушению.

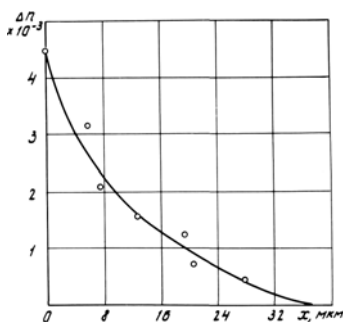


Рис. 19. Рассчитанный профиль изменения показателя преломления для оптического волновода, изготовленного в подложке из ниобата лития Y–среза обратной диффузией. Кружочками отмечены результаты эксперимента.

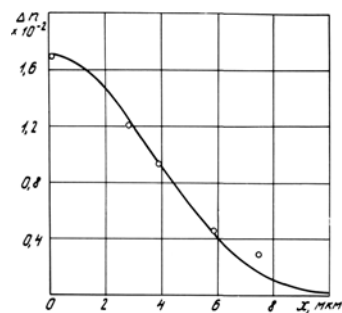


Рис. 20. Рассчитанный профиль изменения показателя преломления для оптического волновода, изготовленного в подложке из ниобата лития Y–среза диффузией из пленки титана. Кружочками отмечены результаты эксперимента.

Область локализации волноводной моды (распределение светового поля в волноводе) является важным параметром, знание которого необходимо при разработке приборов интегральной оптики. Характер распределения светового поля в оптическом волноводе и область его локализации могут быть определены как путем измерений, так и расчетным способом. Для решения этой задачи в работе были проведены исследования по определению концентрационных профилей титана в подложках Y– и Z–срезов ниобата лития и сопоставления их с профилями изменения показателя преломления, восстанавливаемыми на основе измерений модовых спектров оптических волноводов, а также исследования процесса боковой диффузии для тех же срезов ниобата лития. Диффузия проводилась в потоке увлажненного аргона. Значения коэффициентов диффузии, определенные по восстановленному по модовому спектру профилю показателя преломления, составляет: $D_y=5.1 \times 10^{-5}$ мкм²/с; $D_z=1.4 \times 10^{-4}$ мкм²/с. При этом профиль изменения показателя (рис. 19) близок к описываемому функцией Гаусса.

В силу линейности связи между изменением показателя преломления Δn и концентрацией титана можно ожидать, что профиль концентрации титана будет описываться той же функцией, а определение этих профилей даст более точную информацию о распределении световых полей в исследуемых волноводах. Концентрационные про-

фили титана в образцах ниобата лития измерялись методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на ионном микроанализаторе IMS-300.

На рис. 21 приведены концентрационные профили титана для Y- (1) и Z-срезов (2) ниобата лития, время диффузии – 5 часов.

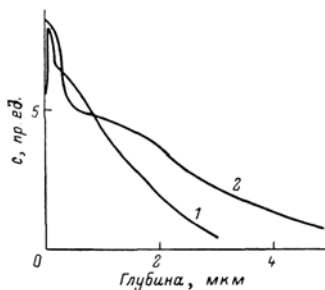


Рис. 21. Концентрационные профили титана для Y- (1) и Z-срезов (2) ниобата лития. Время диффузии – 5 ч.

Профили концентрации титана в Ti:LiNbO_3 волноводах описываются двумя гауссовскими кривыми со значительно отличающимися коэффициентами диффузии. Коэффициенты диффузии для областей свыше 1.5 и 1 мкм соответственно равны: $D_y^{(2)}=5.6 \times 10^{-5}$ мкм²/с; $D_z^{(2)}=1.7 \times 10^{-4}$ мкм²/с, что хорошо согласуется с величинами этих коэффициентов, полученными по результатам восстановления профилей показателей преломления по модовому спектру. Коэффициенты

диффузии в приповерхностном слое равны: $D_y^{(1)}=3.6 \times 10^{-6}$ мкм²/с; $D_z^{(1)}=1.3 \times 10^{-5}$ мкм²/с, что более чем в 10 раз меньше величин для глубоких областей. Возможная причина аномалии состоит в наличие нарушенного слоя, прилегающего к поверхности подложки. Такая аномалия не определяется методом восстановления профиля показателя преломления по модовому спектру.

Для исследования боковой диффузии в подложках ниобата лития применялся дифракционный метод. На поверхности подложек методом фотолитографии изготавливались периодические структуры из параллельных полосок титана с коэффициентом металлизации равным единице. Далее, в течение 5 часов, проводилась высокотемпературная диффузия титана, после чего формировалась фазовая решетка. В результате нескольких последующих диффузионных отжига и соответствующих измерений эффективности дифракции и расчетов определялись требуемые коэффициенты боковой диффузии. При этом было необходимо проводить измерения эффективности дифракции как на «просвет», так и «на отражение», что связано с увеличением толщины

подложки в области диффузии. На рис. 22 представлены зависимости $\ln \left[\frac{\varphi_1(0)}{\varphi_1(t)} \right]$ от времени проведения диффузии для образца LiNbO_3 Z-среза в первом порядке ($i=1$) дифракции. Здесь $\varphi_1(0)$ – значение индекса фазовой модуляции до проведения отжига, $\varphi_1(t)$ – временная зависимость этого индекса. Зависимость (1) соответствует режиму измерений «на отражение», а зависимость (2) – «на проход». На зависимости (1) наблюдаются два линейных участка, соответствующие им коэффициенты боковой диф-

фузии $D_y^{(1)}=4.7 \times 10^{-5}$ мкм²/с; $D_z^{(1)}=6.3 \times 10^{-6}$ мкм²/с. Для подложек LiNbO₃ Y-среза были выполнены аналогичные измерения. Полученные значения коэффициентов диффузии: $D_y^{(1)}=1.0 \times 10^{-5}$ мкм²/с; $D_z^{(1)}=1.3 \times 10^{-6}$ мкм²/с. Определенные по результатам оптических измерений значения коэффициентов диффузии находятся в хорошем соответствии с литературными данными.

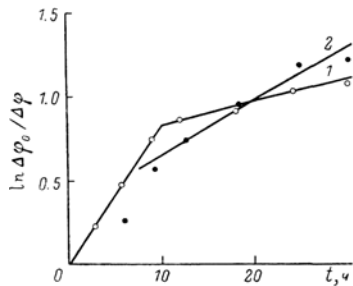


Рис. 22. Зависимости $\ln[\varphi_1(0)/\varphi_1(t)]$ от времени, полученные при измерениях по первым порядкам дифракции в режимах «на отражение» (1) и «на просвет» (2), для образцов LiNbO₃ Z-среза; $i=1$.

Практический интерес представляют оптические волноводы, сформированные в стеклах. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по методам формирования и измерения характеристик оптических волноводов в стеклах марки К8.

Была предложена новая методика формирования оптических волноводов в подложках из стекла К8 диффузией ионов K^+ из расплава нитрата калия KNO₃. При температуре диффузии 350°С происходило формирование диффузионных оптических

волноводов с заданным числом мод и хорошей повторяемостью характеристик при временах диффузии порядка нескольких часов. Измеренное затухание света в таких волноводах не превышало 0.2 дБ/см. Изменение показателя преломления составляло $\Delta n(0)=0.0089$. Восстановленные профили изменения показателя преломления хорошо совпадают с ожидаемыми, описываемыми дополнительной функцией ошибок. Для уменьшения значения $\Delta n(0)$, а также для варьирования таких характеристик, как глубина проникновения и эффективный показатель преломления волноводной моды было предложено проводить дополнительный отжиг оптических волноводов, сформированных диффузией ионов K^+ , в атмосфере. Отжиг проводился при температуре диффузии в отсутствие источника диффузанта. На рис. 23 представлены рассчитанные для различных времен диффузии τ и отжига t профили изменения показателя преломления $\Delta n(x)$ и точки, полученные при восстановлении профилей по экспериментальным данным.

Был предложен и исследован и другой метод варьирования параметров оптических волноводов в стекле К8 при их формировании: диффузией из расплава смесей нитратов. Проводилось формирование оптических волноводов диффузией из расплавов смесей нитратов калия и натрия, калия и лития, серебра и калия, серебра и лития. Возможности формирования оптических волноводов с различными характеристиками

отражены на графиках рис. 24, где приведена совокупность распределений по глубине электрического поля нулевой моды двухмодовых оптических волноводов, сформированных диффузией из расплавов $\text{KNO}_3:\text{AgNO}_3$, $\text{NaNO}_3:\text{AgNO}_3$, $\text{KNO}_3:\text{NaNO}_3$, KNO_3 и диффузией из расплава KNO_3 с последующим отжигом. Распределение по глубине электрических полей мод вычислялись на основе расчетных профилей показателя преломления.

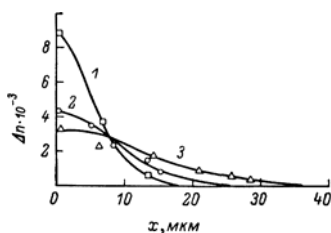


Рис. 23. Рассчитанные профили показателя преломления для оптических волноводов, изготовленных в подложках из стекла К8 методом диффузии из расплава нитрата калия с последующим отжигом, и точки, полученные при восстановлении профилей по экспериментальным данным для $\tau=9$ ч, $t=0$ (1), $\tau=9$ ч, $t=8$ ч (2), $\tau=9$ ч, $t=24$ ч (3).

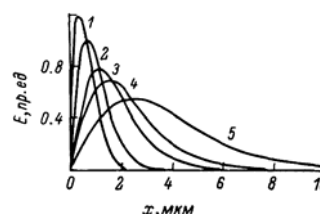


Рис. 24. Рассчитанные распределения электрических полей нулевых ТЕ-мод двухмодовых оптических волноводов, изготовленных в подложках из стекла К8 диффузией из расплавов $\text{AgNO}_3:\text{KNO}_3$ (1), $\text{AgNO}_3:\text{NaNO}_3$ (2), KNO_3 (3), $\text{NaNO}_3:\text{KNO}_3$ (4), из расплава KNO_3 с последующим отжигом (5), $\int E^2 dx = 1$.

Таким образом, проведенные исследования методов формирования диффузионных оптических волноводов в подложках из стекла (К8) демонстрируют возможность технологически простого и экономичного изготовления оптических волноводов с требуемыми параметрами, в том числе с глубиной проникновения волноводной моды 0.3–8 мкм и изменением показателя преломления $\Delta n(0)$ 0.001÷0.1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработана, обоснована и реализована концепция создания гибридного интегрального акустооптического спектроанализатора радиосигналов. Создан прототип интегрального акустооптического спектроанализатора.
2. На основе анализа характеристик функциональных элементов, входящих в структуру спектроанализатора: геодезических линз; элементов ввода-вывода светового излучения в оптический волновод; оптического волновода; широкополосных встречно-штыревых преобразователей – определены и экспериментально подтверждены методы оптимизации их характеристик. Разработаны и реализованы методы интеграции этих элементов в единое устройство – инте-

гральный акустооптический спектроанализатор с заданными характеристиками. Теоретический анализ и экспериментальные исследования позволили определить методы оптимизации некоторых характеристик разработанного спектроанализатора: быстродействия, разрешающей способности по частоте.

3. Теоретически и экспериментально обоснована возможность создания принципиально нового типа оптоэлектронного процессора, базирующегося на новом математическом методе вейвлет–анализа – оптического вейвлет–процессора, позволяющего проводить локальный спектральный анализ сложных сигналов, в том числе определять наличие локальных неоднородностей таких сигналов. Создана и исследована лабораторная модель акустооптоэлектронного вейвлет–процессора на основе объемного акустооптических модулятора. Рассмотрен возможный метод создания интегрального акустооптоэлектронного процессора.
4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению и физическому обоснованию ряда новых возможностей и особенностей применения интегральных электрооптических устройств в волоконно-оптических системах связи и оптической обработки информации.

Теоретически обоснованы методы создания и экспериментально исследованы лабораторные модели интегральных электрооптических модуляторов на основе нарушенного полного внутреннего отражения, типа Маха–Цендера, модуляторов на связанных полосковых волноводах; гибридного бистабильного устройства; оптического ретранслятора; призмного дефлектора с оптимизированными абберационными характеристиками; передающих модулей для волоконно-оптических линий связи на основе одномодовых и многомодовых волокон. Разработаны и исследованы лабораторные модели интегральных электрооптических фазометра радиосигналов и схемы определения совпадения видеоимпульсов.

5. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований методов создания интегрально-оптических элементов и устройств с периодическими структурами.

Разработана и реализована голографическая методика формирования периодических структур в оптических волноводах различной структуры, разработана методика динамического контроля параметров таких структур в процессе формирования. Изготовлены и исследованы лабораторные макеты интегрально-оптических устройств: оптической памяти; разуплотнителя спектральных каналов для ВОЛС; элементов ввода-вывода светового излучения с меняющимися по заданному закону коэффициентами связи; компактного дифракционного

коллиматора оптического излучения;

6. Проведен комплекс теоретических исследований и экспериментальной проверки новых методов создания оптических волноводов вложках из кристалла ниобата лития и стекол. Разработаны новые простые и экономичные методики формирования планарных и полосковых волноводов. В стеклах (в основном, в стекле марки К8) путем диффузии ионов из расплава нитрата калия, из расплава смесей различных нитратов и диффузией ионов из расплава нитрата калия с последующим отжигом. Модифицированы и упрощены методы формирования оптических волноводов в ниобате лития за счет обратной диффузии окиси лития и прямой диффузии из пленки металлического титана в потоке атмосферного воздуха. Исследованы профили распределения титана в планарных диффузионных волноводах и определены коэффициенты диффузии. Измерены коэффициенты боковой диффузии титана в ниобате лития. Разработаны и исследованы методики формирования буферных диэлектрических слоев.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при разработке широкого класса интегрально-оптических устройств для применения в системах оптической передачи, обработки и хранения информации, в динамических голографических системах, для развития методов создания оптических бистабильных устройств и др. Ряд результатов работы использован в поисковых разработках организаций – заказчиков НИР.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о практической целесообразности применения разработанных методов анализа и реализации функциональных устройств и элементов интегральной оптики в оптоэлектронных системах обработки информации разнообразного применения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.с. №1415938 от 08.04.1988 с приоритетом от 28.06.1985 «Интегрально-оптический анализатор спектра радиосигналов». Волков В.А., Аксенов Е.Т., Вырелкин В.П. и др.
2. Аксенов Е.Т., Липовский А.А. К вопросу о расчете профилей показателя преломления градиентных оптических волноводов. – ЖТФ, 1980, Т. 50, Вып. 4, С. 842-844.
3. А.с. № 1102289 от 07.03.1984 г. Способ изготовления интегральных световодов. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В.

4. Аксенов Е.Т., Есепкина Н.А., Липовский А.А., Павленко А.В. Исследование геодезических линз, сформированных в диффузионных оптических волноводах. – Письма в ЖТФ, 1979, Т. 5, Вып. 20, С. 1265-1267.
5. Аксенов Е.Т., Есепкина Н.А., Липовский А.А. и др. Исследование аберраций геодезических линз, сформированных в диффузионных оптических волноводах. – Акустооптические методы и техника обработки информации //Под ред. С.В. Кулакова, Л, изд. ЛЭТИ, 1980 г., С. 93-101.
6. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Петрунькин В.Ю. Исследование рабочей модели гибридно–интегрального акустооптического спектроанализатора. – Обработка сигналов и изображений оптическими методами //Под ред. Ю.В. Егорова, С.В. Кулакова. – Л, 1987 г., С. 31-39.
7. Aksyonov E.T., Kukharev A.V., Lipovskii A.A. “Integrated acousto-optic spectrum analyzer” School-Seminar Acoustooptics: Researches and Developments. Abstracts. – Leningrad, 1990. Pp. 18-19.
8. Аксенов Е.Т., Есепкина Н.А., Липовский А.А. и др. Исследование макета интегрального спектроанализатора, Письма в ЖТФ, 1980, Т. 6, Вып. 19, С. 1211-1214.
9. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Акустооптический конвольвер на основе интегрально-оптических элементов, Письма в ЖТФ, 1981, Т. 7, Вып. 19, С. 1200-1203.
10. А.с. №155181 приоритет от 31.03.1980 Акиньшина Г.Н., Белошицкий А.П., Катков Б.Г., Аксенов Е.Т.
11. А.с. №221196 приоритет от 02.01.1984 Аксенов Е.Т., Белошицкий А.П., Катков Б.Г., Синегубов Н.Н.
12. А.с. положительное решение Р-6064 от 24.03.89 по заявке №3197349/40-22 приоритет от 12.04.88 г. Катков Б.Г., Синегубов Н.Н., Аксенов Е.Т., Кухарев А.В.
13. Аксенов Е.Т., Стариков Г.А. «Вейвлет–анализ в системах оптической обработки информации: возможности и перспективы», Фундаментальные исследования в технических университетах: материалы IV всероссийской научно–методической конференции, С–Пб., изд. СПбГТУ, 2000 г., С. 75-76.
14. Аксенов Е.Т., Стариков Г.А. «Подавление помех в системах оптической обработки шумоподобных сигналов с использованием методов вейвлет–анализа», Фундаментальные исследования в технических университетах: материалы IV всероссийской научно–методической конференции, С–Пб., изд. СПбГТУ, 2000 г., С. 77-78.
15. Петрунькин В.Ю., Аксенов Е.Т., Стариков Г.А. «Возможности и перспективы применения вейвлет–преобразования в оптических процессорах» в тезисах докладов конференции «Лазеры, измерения, информация», С–Пб.: изд. БГТУ, 2001, С. 53-54.

16. Петрунькин В.Ю., Аксенов Е.Т., Стариков Г.А. «Возможности и перспективы анализа сложных сигналов оптическими вейвлет–процессорами», Современные технологии извлечения и обработки информации //Сборник научных трудов, С-Пб.: ОАО «Радиоавионика», 2001, С. 192-198.
17. Petrunkin V. Yu., Aksyonov E.T., George A. Starikov, “Wavelet Transform in Optical Processors: Potentials and Perspectives”, Proc. of the SPIE, 2001, Vol. 4680.
18. В.Ю. Петрунькин, Е.Т. Аксенов, Г.А. Стариков. «Оптический вейвлет–процессор для обработки сложных сигналов», Письма в ЖТФ, 2001, Т. 27, Вып. 22, С. 24-29.
19. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Интегральный акустооптический спектроанализатор. – Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по акустоэлектронике и квантовой акустике, Саратов, 1983, Т. 1, С. 351-352.
20. Аксенов Е.Т., Козлов К.В., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Исследование интегральной акустооптической ячейки с тонкопленочной призмой для ПАВ. – Микроэлектроника, 1982, Т. 11, Вып. 2, С. 177-179.
21. Аксенов Е.Т., Козлов К.В., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Исследование оптических волноводов, формируемых в стеклах диффузией из расплавов нитратов. – ЖТФ, 1982, Т. 52, Вып. 12 С. 2389-2393.
22. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В., Петрунькин В.Ю. К вопросу о торцевом возбуждении оптических волноводов. – ЖТФ, 1983, Т. 53, Вып. 7, С. 1343-1347.
23. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В., Петрунькин В.Ю. Исследование возможности стыковки полупроводникового лазера с планарным оптическим волноводом. – Письма в ЖТФ, 1982, Т. 8, Вып. 13, С. 828-831.
24. Кухарев А.В., Липовский А.А., Аксенов Е.Т., Павленко А.В. Исследование интегральнооптических элементов связи на основе двумерного градиента показателя преломления. – Оптика и спектроскопия, 1985, Т. 59, Вып. 6, С. 1281-1285.
25. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Исследование вывода излучения из «скошенного» края диффузионного световода. – Письма в ЖТФ, 1984, Т. 10, Вып. 8, С. 508-510.
26. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В., Петрунькин В.Ю. О возможности создания интегрального акустооптического спектроанализатора с последовательным опросом. – Тезисы докладов V Всесоюзной школы по оптической обработке информации, Киев, 1984, С. 633-634.
27. Аксенов Е.Т., Грушев И.Б., Кухарев А.В., Петрунькин В.Ю. Интегральный акустооптический процессор с высокой скоростью вывода данных. – Акустооптические устройства и их применение //Под ред. Ю.В. Егорова, С.В. Кулакова. Орджоникидзе, 1999, С. 10-14.

28. А.с. №243445 Аксенов Е.Т., Павленко А.В., Смирнов Л.И.
29. Аксенов Е.Т., Павленко А.В., Кухарев А.В., Липовский А.А., Симин Г.С. Исследование макета передающего модуля для ВОЛС на основе интегрально-оптических модуляторов. – Функциональные оптико-электронные элементы и устройства для аппаратуры средств связи //Труды республик. совещания – Минск, 1984.
30. Aksyonov E.T., Pavlenko A.V., Marachonov V.M. et al. Fiber Optic Communication Line Based on AlGaAs/GaAs Optoelectronic Integrated Circuits. – First Soviet International Fiber Optic Conference, Leningrad, 1984, Pp. 71-73.
31. Аксенов Е.Т., Закгейм А.Л., Павленко А.В. и др. Волоконный канал связи для локальных сетей. – Оптические и оптоэлектронные методы и устройства обработки информации //VIII региональный семинар–совещание – Краснодар, 1990, С. 51.
32. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Интегральный электрооптический модулятор–переключатель на основе индуцированного диэлектрического канала. – Письма в ЖТФ, Т. 8, № 10, С. 536-539.
33. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Гибридное оптическое бистабильное устройство на основе интегрального модулятора с индуцированным диэлектрическим каналом. – ЖТФ, 1983, Т. 53, № 2, С. 301-305.
34. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовский А.А., Павленко А.В. Исследование макета интегрального электрооптического фазометра. – Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции «Оптика лазеров», Л, 1984, С. 214.
35. Аксенов Е.Т., Липовский А.А., Павленко А.В. К вопросу об оптимизации параметров интегральных электрооптических дефлекторов. – Известия АН СССР, серия физическая, 1982, Т. 46, № 10, С. 2041-2044.
36. Аксенов Е.Т., Липовский А.А., Павленко А.В. Исследование абберационных характеристик интегральных электрооптических дефлекторов. – Известия ВУЗов, сер. «Электромеханика», 1982, № 2, С. 252.
37. Аксенов Е.Т., Леонов В.И., Липовская М.Ю. – Письма в ЖТФ, 1985, Т. 11, Вып. 9, С. 546-549.
38. Аксенов Е.Т., Липовская М.Ю. Исследование процессов формирования фоторезистивных периодических структур. – Известия ВУЗов. Приборостроение, 1985, Т. 28, № 9, С. 70-74.
39. Аксенов Е.Т., Липовская М.Ю. Исследование формы гофра фоторезистивных периодических структур для приборов интегральной оптики.– Известия ВУЗов. Приборостроение, 1985, Т. 28, № 10, С. 73-77.
40. Аксенов Е.Т., Липовская М.Ю., Мотков В.А., Липовский А.А. Исследование макета интегрально–оптического спектрального разуплотнителя на основе диффузионных структур. – Письма в ЖТФ, 1985, Т. 11, Вып. 9, С. 546-549.

41. Аксенов Е.Т., Липовская М.Ю., Липовский А.А. О возможности создания интегрально–оптического устройства голографической памяти. – Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции «Оптика лазеров», Л, 1983, С. 232.
42. Аксенов Е.Т., Липовская М.Ю., Липовский А.А. Формирование фоторезистивных дифракционных решеток для интегрально–оптических устройств. – Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания «Измерительные устройства на диэлектрических волноводах оптического диапазона», Минск, 1983, Ч. 1, С. 62-64.
43. Аксенов Е.Т., Есепкина Н.А., Липовский А.А. Исследование планарных оптических волноводов в стекле, образованных диффузией ионов K^+ . – Письма в ЖТФ, 1978, Т. 4, Вып. 2, С. 1389-1392.
44. Аксенов Е.Т., Липовский А.А. Диффузионные оптические волноводы в ниобате лития. – Труды ЛПИ. Квантовая электроника, 1979, В. 366, С. 50-54.
45. Аксенов Е.Т., Есепкина Н.А., Липовский А.А. Диффузионные волноводы в ниобате лития и их применение в устройствах обработки сигналов. – Письма в ЖТФ, 1978, Т. 4, Вып. 21, С. 1318-1321.
46. Аксенов Е.Т., Кухарев А.В., Липовская М.Ю., Липовский А.А. Исследование особенностей диффузии титана при формировании оптических волноводов в подложках из ниобата лития. – ЖТФ, 1987, Т. 57, Вып. 1, С. 146-151.
47. Аксенов Е.Т., Бондаренко В.С., Есепкина Н.А. и др. Диффузионные оптические волноводы. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1980, Вып. 12, С. 178-182.
48. Аксенов Е.Т., Есепкина Н.А., Липовский А.А. и др. Исследование пассивных элементов в планарных оптических волноводах. //Международная школа по когерентной оптике и голографии, Прага, 1980, С. 76-77.
49. Аксенов Е.Т., Липовский А.А., Павленко А.В., Сотникова Г.Ю. Исследование оптических волноводов, сформированных диффузией из расплавов смесей нитратов. – ЖТФ, 1981, Т. 51, Вып. 4, С. 874-876.
50. Аксенов Е.Т., Липовский А.А., Павленко А.В. Формирование маломодовых оптических волноводов увеличенной толщины в стекле. – ЖТФ, 1981, Т. 51, Вып. 1, С. 222-224.
51. Е. Т. Аксенов. Интегральная оптика для систем обработки информации. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2005. – 82 с.