

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

**О.В.Андреева, А.А.Парамонов, А.В.Павлов, С.В.Артемьев,
В.Н.Крылов, Н.В.Ионина, А.С.Златов**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОПТОИНФОРМАТИКЕ



Санкт-Петербург

2008

УДК 535+519.7;681.3.01

Андреева О.В., Парамонов А.А., Павлов А.В., Артемьев С.А., Ионина Н.В., Крылов В.Н., Златов А.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОПТОИНФОРМАТИКЕ. Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 136 с.

В пособии представлены методические материалы к экспериментальному практикуму по дисциплине «Основы оптоинформатики». Даны описания лабораторных работ с кратким изложением теоретического материала, необходимого для подготовки к лабораторным работам.

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика», а также для студентов оптических и информационных специальностей смежных направлений.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оплотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200600 – Фотоника и оптоинформатика.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

- © Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2008
- © Андреева О.В., Парамонов А.А., Павлов А.В., Артемьев С.В., Ионина Н.В., Крылов В.Н., Златов А.С., 2008

Содержание

Предисловие	4
Раздел «Источники и приемники оптического излучения на основе полупроводников»	
Введение	7
<i>Лабораторная работа №1</i> «Исследование основных параметров полупроводникового лазера»	10
<i>Лабораторная работа №2</i> «Полупроводниковые детекторы оптического излучения в устройствах оптоинформатики»	22
<i>Лабораторная работа №3</i> «Оценка расходимости пучка лазерного излучения»	31
<i>Лабораторная работа №4</i> «Сравнение быстродействия р-п и р-і-п диодов, используемых в качестве детекторов излучения»	42
Литература	54
Термины	55
Раздел «Передача информации»	
Введение	58
<i>Лабораторная работа №5</i> «Волоконно-оптический световод как среда передачи информации» ...	62
<i>Лабораторная работа №6</i> «Исследование характеристик светового жгута»	71
Литература	80
Термины	81
Раздел «Хранение информации»	
<i>Лабораторная работа №7</i> «Элементы оптической памяти на основе мультиплексных голограмм»	88
Раздел «Обработка информации»	
<i>Лабораторная работа №8</i> «Использование преобразования Фурье в системах оптической обработки информации»	106
<i>Лабораторная работа №9</i> «Векторно-матричный умножитель – простейший оптический процессор»	115
Раздел «Оптические технологии искусственного интеллекта»	
<i>Лабораторная работа №10</i> «Оптический вентиль нечеткой (многозначной) логики»	125
О кафедре	135

Предисловие

Оптоинформатика – быстро развивающееся научно-техническое направление в России и в мире, связанное с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, устройств и технологий, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации на основе материальных носителей - фотонов. Подготовка бакалавров и магистров для работы в этой перспективной области ведется в СПб ГУ ИТМО в рамках открытого в 2004 г. нового образовательного направления 200600 «Фотоника и оптоинформатика».

Экспериментальный практикум по оптоинформатике создан на кафедре фотоники и оптоинформатики для поддержки лекционного курса по дисциплине «Основы оптоинформатики», которая входит в число основных дисциплин нового образовательного направления. Подготовку и проведение экспериментального практикума осуществляют квалифицированные преподаватели и сотрудники кафедры фотоники и оптоинформатики, усилиями которых создана концепция практикума, сформирован цикл лабораторных работ, разработаны принципы формирования и комплектации экспериментальных стендов, подготовлены методические материалы.

Данное пособие представляет экспериментальный практикум, который включает лабораторные работы по основным разделам оптоинформатики. Материалы каждой лабораторной работы содержат теоретическое введение, где приведены сведения, необходимые для понимания физических процессов, положенных в основу рассматриваемых устройств и систем оптоинформатики, описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы и рекомендации по обработке полученных результатов.

Лабораторные работы №1 и №2 поставлены Андреевой О.В. и Златовым А.С. при участии Парамонова А.А. и Артемьева С.В.

Теоретическое введение к лабораторным работам написано Крыловым В.Н.

Лабораторная работа №3 поставлена Андреевой О.В. и Златовым А.С., в подготовке описания принимал участие Парамонов А.А.

Лабораторная работа №4 поставлена Артемьевым С.В. при участии Крылова В.Н. Описание дано в редакции Артемьева С.В.

Лабораторная работа №5 поставлена Андреевой О.В., Парамоновым А.А. и Артемьевым С.В. Описание дано в редакции Парамонова А.А.

Лабораторная работа №6 поставлена Парамоновым А.А., он же – автор описания.

Лабораторная работа №7 поставлена Андреевой О.В., Парамоновым А.А. и Артемьевым С.В. Авторы описания – Андреева О.В. и Златов А.С.

Лабораторная работа №8 поставлена Андреевой О.В., Иониной Н.В. и Артемьевым С.В. Описание дано в редакции Иониной Н.В.

Лабораторная работа №9 поставлена авторами пособия. Автор идеи – Павлов А.В. Описание дано в редакции Иониной Н.В.

Лабораторная работа №10 поставлена авторами пособия. Автор идеи – Павлов А.В. Описание дано в редакции Павлова А.В.

Список терминов к разделу «Источники и приемники оптического излучения на основе полупроводников» подготовлен Крыловым В.Н., к разделу «Передача информации» - Андреевой О.В.

Авторы благодарят А.П.Кушнарченко за участие в постановке лабораторных работ №1, №2 и №7.

Экспериментальный практикум по оптоинформатике для студентов технических вузов Российской Федерации является оригинальной разработкой кафедры ФиОИ, выполненной под руководством заведующего кафедрой профессора С.А.Козлова. Данный практикум представлен на рынке образовательных услуг РФ коммерческим вариантом, который предназначен для вузов, ведущих подготовку по новому образовательному направлению, а также по смежным направлениям и специализациям.

Источники и приемники оптического излучения на основе полупроводников

Введение к разделу «Источники и приемники оптического излучения на основе полупроводников»

В устройствах оптоинформатики широко используются оптоэлектронные приборы на основе полупроводников. К этим приборам относятся светодиоды и лазеры – как источники света и фотодиоды – как приёмники оптического сигнала.

Полупроводники – это вещества, которые по величине электропроводности занимают промежуточное значение между металлами и диэлектриками. Полупроводники отличаются от металлов не только меньшей величиной электропроводности, но и тем, что их электропроводность возрастает с ростом температуры. Полупроводники обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям и их параметры, в том числе электропроводность, зависят от температуры и давления, от освещённости, а также от содержания примесей. Эта особенность полупроводников даёт возможность управлять их свойствами. Свойства полупроводников хорошо описывает зонная теория твёрдого тела. Энергетические зоны типичных полупроводников приведены на рис.1. Зонная структура полупроводника, не имеющего примесей, представлена на рис.1.а. Такие полупроводники называются собственными полупроводниками или полупроводниками i-типа.



Рис.1. Зонная структура полупроводников. а – собственный полупроводник, б – полупроводник n-типа, в – полупроводник p-типа. F – уровень Ферми.

В образовании электрического тока в собственном полупроводнике участвуют как электроны, переведённые из валентной зоны в зону проводимости, так и образовавшиеся дырки в валентной зоне, которые обуславливают собственную проводимость. Как было отмечено выше, на

электропроводность полупроводников большое влияние оказывают примеси, которые обуславливают примесную проводимость. Атомы примеси замещают в узлах кристаллической решётки некоторое количество атомов основного вещества. Независимо от конкретной природы, примеси бывают двух типов: донорные и акцепторные. Энергетические уровни электронов примеси располагаются внутри запрещённой зоны: донорные ближе к зоне проводимости (рис.1.б), а акцепторные – ближе к валентной зоне (рис.1.в). Основными носителями тока в полупроводнике, имеющем только донорные примеси, будут электроны в зоне проводимости. Такие полупроводники называются полупроводниками n-типа. А при наличии в полупроводнике только акцепторной примеси наиболее вероятным является переход электронов из валентной зоны на уровень акцептора. При этом в валентной зоне образуются дырки, которые и будут являться основными носителями тока в данном полупроводнике. Такие полупроводники называются полупроводниками p-типа. В реальных полупроводниках, добавление в германий сурьмы или мышьяка превращает германий в полупроводник n-типа добавление индия – в полупроводник p-типа. Если в полупроводнике имеется область с двумя типами проводимости, то это приводит к существованию особых условий на границе их раздела - на p-n переходе (рис.2).

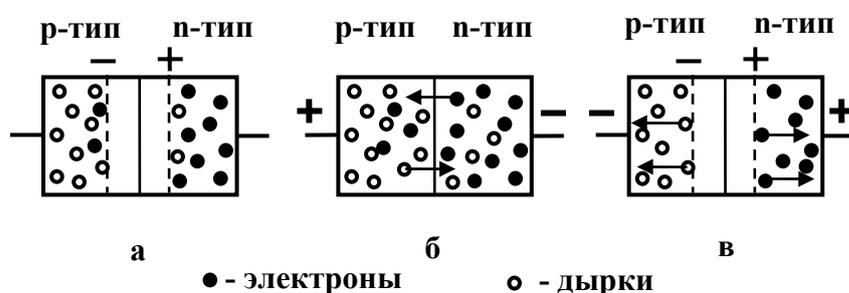


Рис.2. Движение электронов и дырок в области p-n перехода: а – внешнее электрическое поле отсутствует, б – внешнее электрическое поле приложено в прямом направлении, в – внешнее электрическое поле приложено в обратном направлении.

Так как концентрация электронов и дырок по обе стороны p-n перехода различна, то электроны из полупроводника n-типа будут диффундировать в полупроводник p-типа, а дырки из полупроводника p-типа – в полупроводник n-типа. Таким образом, область полупроводника p-типа вблизи границы раздела зарядится отрицательно, а область полупроводника n-типа – положительно. Образовавшееся контактное электрическое поле будет удалять электроны и дырки в глубь

соответствующих полупроводников. Этот тонкий слой (несколько десятков микрон) носит название обеднённого слоя или запирающего слоя (рис.2-а). Если к системе приложить внешнее электрическое поле: плюс к полупроводнику р-типа, а минус к полупроводнику n-типа, то толщина запирающего слоя уменьшается или становится равной нулю. В этом случае через р-n переход потечёт ток (рис.2-б). Такое направление внешнего электрического поля называется прямым. Если направление внешнего электрического поля совпадает с направлением образовавшегося контактного поля, то толщина запирающего слоя значительно увеличивается, и ток через р-n переход не течёт (рис.2-в). Такое направление внешнего электрического поля называется обратным или запирающим.

Полупроводники с р-n переходом используются как источники излучения (лазеры) и как приёмники оптического сигнала (фотодиоды). Лабораторные работы данного раздела посвящены исследованию основных параметров полупроводниковых лазеров и полупроводниковых фотодиодов.

Исследование основных параметров полупроводникового лазера

Цель работы: Изучение принципов работы полупроводникового лазера и измерение его основных параметров.

Объект исследования: Лазерный модуль KLM-650 на основе полупроводникового инжекционного лазера.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с принципом работы и конструктивными особенностями полупроводниковых лазеров.
2. Измерить зависимость интенсивности излучения полупроводникового лазерного модуля от величины тока, протекающего через р-п переход.
3. Исследовать степень поляризации излучения лазерного модуля в зависимости от тока, протекающего через р-п переход.
4. Проанализировать изменение параметров излучения при работе лазерного модуля в режиме светоизлучающего диода и режиме лазерной генерации.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Полупроводниковый лазер – лазер, активной средой которого является полупроводниковый кристалл, а точнее, область р-п перехода.

В полупроводниковой активной среде можно достигнуть большого оптического усиления, что обуславливает возможность использования активных элементов малых размеров (длина резонатора 50 мкм – 1 мм) и обеспечивает компактность таких лазеров. Помимо компактности, полупроводниковые лазеры обладают высоким кпд (до 50%). А большой выбор современных полупроводниковых материалов обеспечивает генерацию в широком спектральном диапазоне (от 0,3 мкм до 30 мкм). Эти качества обеспечили полупроводниковым лазерам широкое применение в различных областях современной деятельности человека.

Для работы лазера любого типа необходимо выполнение следующих основных требований: 1) создание инверсной заселённости на одном из

оптических переходов; 2) превышение усиления над потерями; 3) наличие резонатора для обеспечения положительной обратной связи.

В отличие от лазеров других типов, в полупроводниковых лазерах используются излучательные квантовые переходы между разрешёнными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии. Инверсная населённость создаётся с помощью инжекции через р-п переход неравновесных носителей тока, путём приложения внешнего напряжения в прямом направлении. Дело в том, что распределение электронов по возможным энергетическим уровням в полупроводниках зависит от концентрации примеси и температуры кристалла. При этом для каждой температуры существует вполне определённое распределение электронов по энергетическим состояниям. При изменении температуры через некоторое время устанавливается равновесие электронов и атомов и происходит новое распределение электронов по энергетическим уровням. При этом часть электронов может обладать энергией, достаточной, чтобы перейти в зону проводимости и стать свободными носителями тока. Эти свободные носители, существующие при тепловом равновесии, называются равновесными носителями тока. Если возбуждение электронов происходит не в результате теплового воздействия, а за счёт других процессов, например, путём освещения полупроводника или путём приложения электрического поля, то в течение относительно длительного времени электроны могут обладать температурой, большей, чем температура атомов, что приводит к увеличению электропроводности, и такие электроны (и дырки) называются неравновесными носителями тока. Наряду с генерацией неравновесных носителей существует обратный процесс – рекомбинация электронов и дырок – переход электронов из зоны проводимости в валентную зону, в результате чего происходит исчезновение электронов и дырок. Рекомбинация может сопровождаться излучением фотонов, что и лежит в основе работы полупроводниковых лазеров.

На рис.1. (см. «Введение») представлено положение уровня Ферми в собственном и примесном полупроводниках. Одно из важных свойств уровня Ферми заключается в том, что в системе, состоящей из полупроводников n- и р-типа и если к ним не приложено напряжение, уровни Ферми (F_n и F_p) у них выравниваются (рис.1.а). А если они находятся под разными потенциалами, то уровни Ферми в них сдвигаются на величину разности потенциалов (рис.1.б).

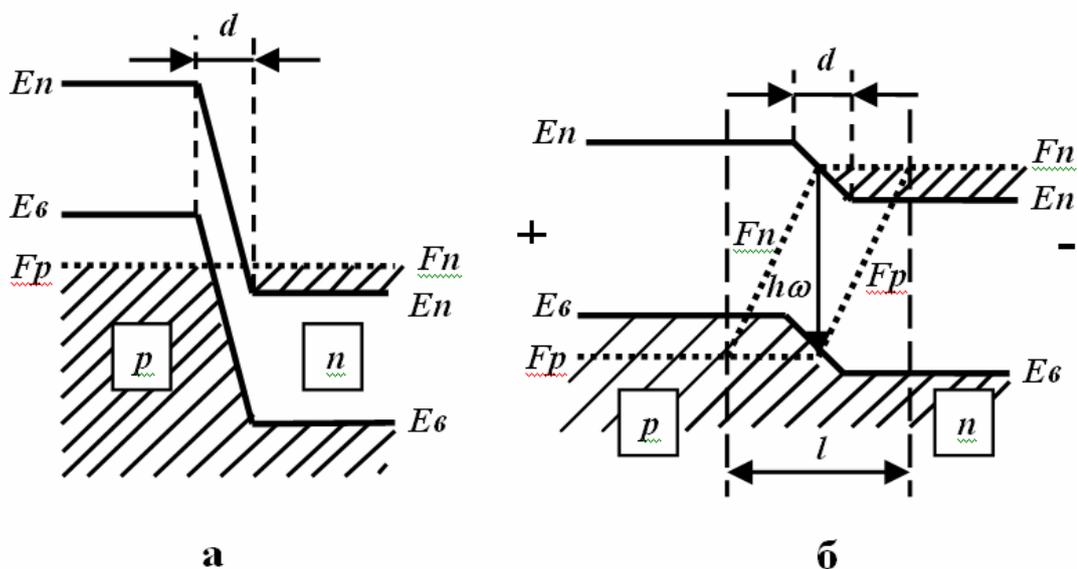


Рис.1. Энергетическая диаграмма инжекционного полупроводникового лазера: p-n переход без приложенного внешнего напряжения (а); p-n переход при приложении внешнего напряжения в прямом направлении (б). d - ширина p-n перехода, l - реальная ширина области, обеспечивающей работу лазера.

В этом случае в зоне p-n перехода создаётся инверсная заселённость и электроны совершают переход из зоны проводимости в валентную зону (рекомбинируют с дырками). При этом испускаются фотоны с энергией $h\omega$. По такому принципу работает светодиод. Если для этих фотонов создать обратную положительную связь в виде оптического резонатора, то в области p-n перехода при больших значениях внешнего приложенного напряжения можно получить лазерную генерацию. При малых значениях внешнего приложенного напряжения процесс образования и рекомбинации неравновесных носителей происходит хаотично и излучение обладает малой мощностью и является некогерентным и немонахроматическим. Это соответствует светодиодному режиму работы полупроводникового излучателя. При увеличении тока выше порогового значения излучение становится когерентным, его спектральная ширина сильно сужается, а интенсивность резко возрастает – начинается лазерный режим работы полупроводникового излучателя. При этом также увеличивается степень линейной поляризации генерируемого излучения.

На рис.2 схематично представлена конструкция полупроводникового лазера и распределение интенсивности выходного излучения. Как правило, в таком лазере резонатор создаётся полировкой двух диаметрально противоположных сторон кристалла, перпендикулярных плоскости p-n перехода. Эти плоскости делаются параллельными и полируются с высокой степенью точности. Выходную поверхность можно

рассматривать как щель, через которое проходит излучение. Угловая расходимость излучения лазера определяется дифракцией излучения на этой щели. При толщине р-n перехода в 20 мкм и ширине – 120 мкм, угловая расходимость соответствует приблизительно 6° в плоскости XZ и 1° – в плоскости YZ.

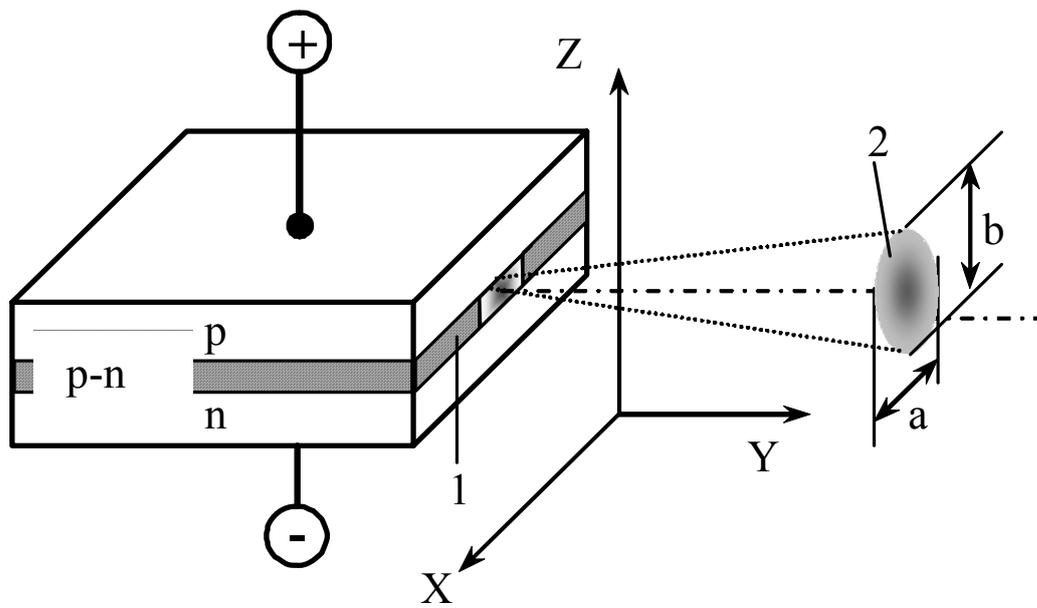


Рис.2. Принципиальная схема лазера на р-n переходе. 1-область р-n перехода (активный слой); 2-сечение лазерного пучка в плоскости XY.

В современных полупроводниковых лазерах широко используются так называемые полупроводниковые гетероструктуры, в разработку которых значительный вклад внес академик РАН Ж. И. Алферов (Нобелевская премия 2000 года). Лазеры на основе гетероструктур обладают лучшими характеристиками, например, большей выходной мощностью и меньшей расходимостью. Пример двойной гетероструктуры приведен на рис.3, а её энергетическая схема – на рис. 4.

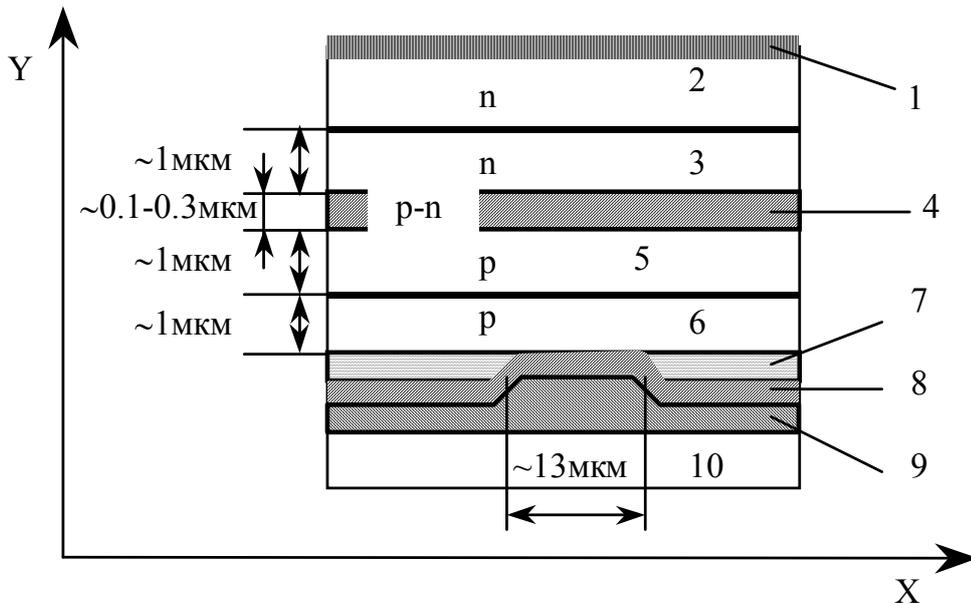


Рис.3. Полупроводниковая двойная гетероструктура. 1-проводящий металлизированный слой для создания электрического контакта; 2-слой GaAs (n); 3-слой $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (n); 4-слой, соответствующий зоне инжекции носителей заряда (p-n-переход); 5-слой $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (p); 6-слой GaAs (p); 7-непроводящий слой оксида металла для ограничения тока через p-n-переход, формирующий зону генерации излучения; 8,9-прилегающие слои для создания электрического контакта; 10-подложка с теплоотводом.

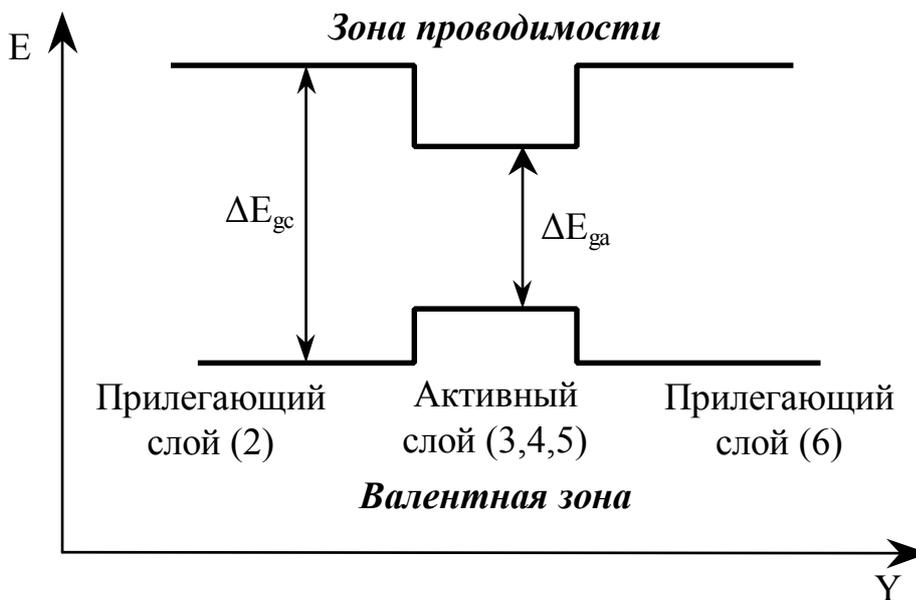


Рис.4. Энергетическая схема двойной гетероструктуры, ось Y и номера слоёв соответствуют рис.3. ΔE_{gc} -ширина запрещенной зоны; ΔE_{gv} -ширина запрещенной зоны p-n-перехода.

В данной лабораторной работе исследуется зависимость интенсивности выходного излучения полупроводникового лазера, а также степень линейной поляризации от величины тока, протекающего через р-п переход.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка, принципиальная блок-схема которой приведена на рис.5, состоит из узла источника излучения с полупроводниковым лазером (ПЛ), узла приемника излучения, включающего приемник излучения (ПИ), поляризационного светофильтра (ПС) и измерительных приборов (мультиметры – M_1 и M_2).

Установка смонтирована на оптическом рельсе. Каждый узел (узел источника излучения и узел приемника излучения) установлен в стойке и закреплен на рейтере. Узлы расположены на оптическом рельсе, который определяет оптическую ось системы. Поляризационный светофильтр может быть отдельным элементом на рельсе (узел ПС - светофильтр в специальной оправе установлен на в отдельном рейтере) или совмещен с узлом приемника излучения (светофильтр смонтирован в форме насадки на входное окно фотоприемника). В качестве измерительных приборов используются мультиметры, с помощью которых в работе производится измерение напряжения (U), тока (I) и сопротивления (R). Измерение интенсивности излучения в данной работе производится в относительных единицах, в качестве которых используются единицы измерения тока (A – ампер).

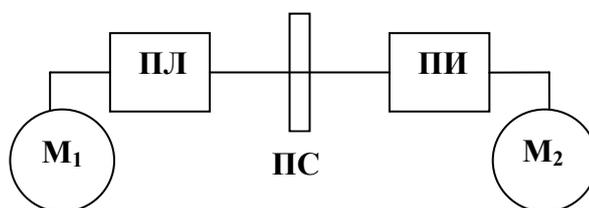


Рис.5. Блок-схема экспериментальной установки. ПЛ - полупроводниковый лазер, ПС – поляризационный светофильтр, ПИ – приемник излучения, M_1 и M_2 - измерительные приборы (мультиметры).

Узел источника излучения, содержит полупроводниковый лазерный модуль (ПЛ), подключенный к источнику электропитания. Принципиальная электрическая схема установки для исследования излучения полупроводникового лазера представлена на рис.6. Лазер включается тумблером Т. Напряжение от источника питания (лабораторная сеть электропитания 4,5 В или батарея аккумуляторов 4,8 В) через сопротивления R_1 и R_{Π} подается на лазерный модуль, при этом через р-п переход протекает ток I_{pn} , регулировка которого осуществляется потенциометром R_{Π} .

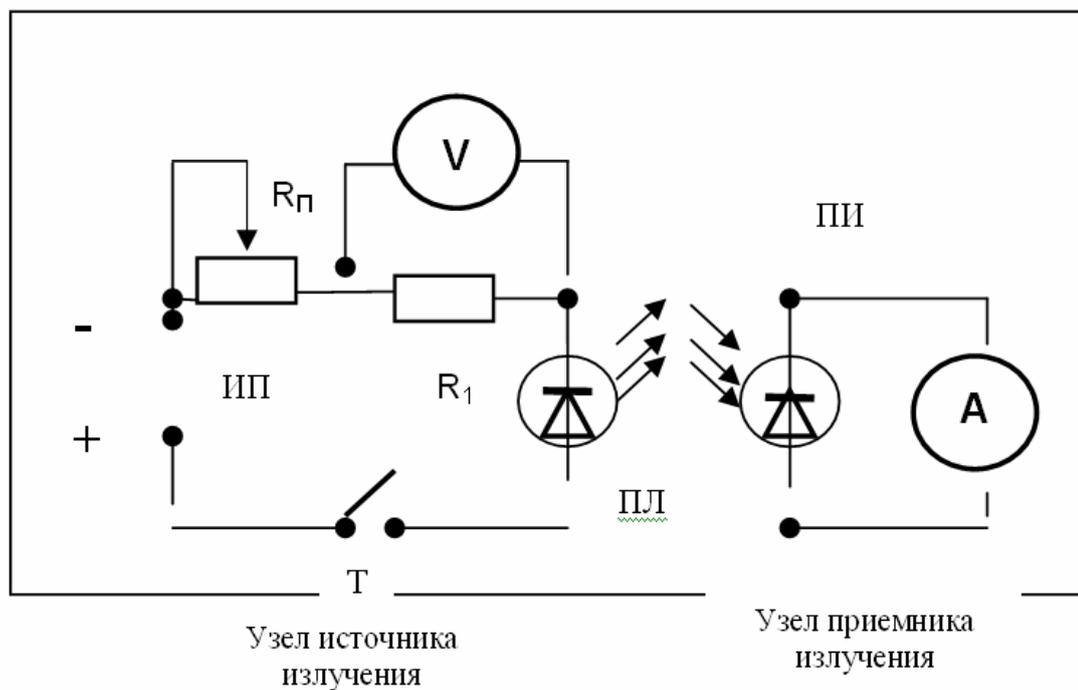


Рис.6.Электрическая схема установки для исследования зависимости интенсивности излучения полупроводникового лазера от величины тока, протекающего через р-п переход. ПЛ – полупроводниковый лазер, ПР – приёмник излучения, ИП – источник питания постоянного тока 4,5 В; R_1 – постоянное сопротивление, R_{Π} - переменное сопротивление, Т – тумблер для включения и выключения питания лазера; V– вольтметр (мультиметр), А – амперметр (мультиметр).

Исследование зависимости интенсивности лазерного излучения от величины тока, протекающего через р-п переход

Величина тока протекающего через р-п переход измеряется косвенным образом: вольтметром V_1 (шкала V на мультиметре M_1) измеряется падение напряжения на сопротивлении R_1 ($U_{\text{ПЛ}}$), который включен последовательно с р-п переходом, а значение I_{pn} вычисляется по закону

Ома. Регулировка I_{pn} производится потенциометром R_{Π} (переменное сопротивление).

Узел приемника излучения снабжен фотодиодом ФД-24К, который работает в фотогальваническом режиме. Под воздействием светового потока, падающего на входное окно фотодиода, возникает фотоэдс, и в замкнутой цепи течет ток, величина которого измеряется мультиметром M_2 по шкале тока (I_{Π}). В данных условиях эксперимента величина I_{Π} прямо пропорциональна интенсивности лазерного излучения (поток излучения). Типичная зависимость интенсивности лазерного излучения от величины тока, протекающего через р-п переход, приведена на рис. 7.

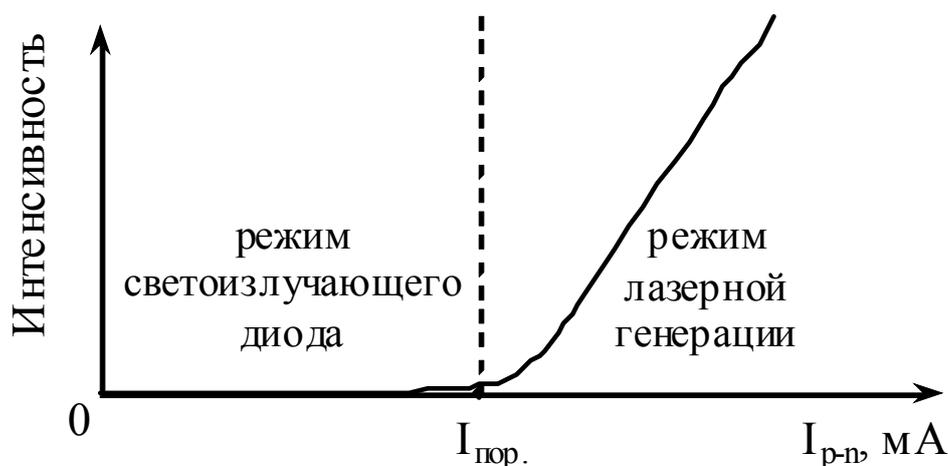


Рис.7. Зависимость интенсивности излучения лазера от тока, протекающего через р-п переход. $I_{\text{пор.}}$ – величина порогового тока.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить лазер, переключив тумблер Т в положение «Вкл».
2. Поставить перед фотоприемником вспомогательный экран (лист белого картона) для наблюдения пятна лазерного излучения.
3. Изменяя сопротивление R_{Π} (ручка регулировки расположена на верхней поверхности блока лазера), проследить, как изменяется форма пятна лазерного излучения и его интенсивность при изменении тока через р-п переход.
4. Включить измерительные приборы M_1 и M_2 и установить необходимые режимы (M_1 на измерение напряжения и M_2 на измерение тока).
5. Отъюстировать оптическую систему таким образом, чтобы лазерный пучок попадал в центр фотоприемника.
6. Изменяя ток через р-п переход потенциометром R_{Π} снять показания прибора M_1 ($U_{\Pi\Pi}$) и показания прибора M_2 ($I_{\text{ФП}}$) для 15-20 точек в

максимально возможном интервале значений. Данные заносить в таблицу 1.

7. Выключить лазер, переключив тумблер Т в положение «Выкл».
8. Измерить значение R_1 , необходимое для проведения расчетов.
9. Данные показать преподавателю

Таблица 1. Экспериментальные данные для построения зависимости интенсивности излучения лазера от тока, протекающего через р-п переход.

№	$U_{ПЛ}, мВ$ (Прибор M_1)	$I_{pn}, мА$	$I_{ПИ}, мкА$ (Прибор M_2)
1			
2			
...			

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать величину тока через р-п переход для каждого значения $U_{ПЛ}$, используя закон Ома

$$I_{pn} = U_{ПЛ} / R_1 \quad (1).$$

Результаты вычислений занести в таблицу 1.

2. Построить график зависимости $I_{ПИ}$ от I_{pn} .
3. Определить величину порогового тока – $I_{пор}$
4. Определить коэффициенты ($k_{св}$ и $k_{лаз}$), характеризующие изменение интенсивности излучения в светодиодном и лазерном режимах работы модуля, используя аппроксимацию каждого режима прямой линией

$$I_{ПИ} = k I_{pn} \quad (2),$$

где k – коэффициент.

5. Сравнить полученные результаты.

Исследование зависимости степени поляризации излучения от величины тока, протекающего через р-п переход

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Одной из важнейших характеристик лазера являются поляризационные свойства его излучения, которые в полупроводниковых источниках излучения тесно связаны с величиной тока, протекающего через р-п переход. Как известно из литературных данных излучение полупроводниковых источников частично поляризовано, и его можно представить (по крайней мере, формально) как совокупность естественного и линейно поляризованного излучения. Таким образом, можно считать, что исследуемое в работе излучение содержит две основные компоненты, одна из которых поляризована линейно, а вторая - неполяризована и не имеет постоянного соотношения фаз с линейно поляризованной компонентой. В этом случае степень поляризации излучения (Р) можно определить, используя следующую формулу:

$$P = I_{\text{лин}} / I_{\text{полн.}} \quad (3),$$

где $I_{\text{лин}}$ - интенсивность линейно поляризованной компоненты излучения, $I_{\text{полн.}}$ - полная интенсивность излучения.

При проведении данного этапа работы необходимо использовать поляризационный светофильтр (ПС), который представляет собой анализатор поляризационных компонент излучения. При повороте ПС вокруг оптической оси происходит изменение интенсивности излучения, прошедшего ПС, которое регистрирует прибор М2. При этом степень поляризации излучения можно определить по формуле

$$P = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / I_{\text{max}} \quad (4),$$

где I_{max} и I_{min} соответствуют максимальному и минимальному значению интенсивности излучения, прошедшего ПС, при повороте ПС вокруг оптической оси. В этом случае $(I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$ определяет интенсивность линейно поляризованной компоненты излучения, I_{min} - интенсивность неполяризованной компоненты (ее интенсивность не изменяется при повороте ПС относительно оптической оси), а I_{max} - полную интенсивность излучения, прошедшего поляризационный светофильтр.

Для получения зависимости степени поляризации излучения исследуемого лазерного модуля от тока через переход необходимо заполнить таблицу 2.

1. Установить поляризационный светофильтр на оптической оси системы
2. Установить максимальное значение интенсивности излучения лазера
3. Измерить $U_{\text{пл}}$, данные занести в таблицу 2.
4. Медленно вращая поляризационный светофильтр, определите величину максимальной интенсивности излучения, прошедшего ПС (I_{max}), и минимальной интенсивности излучения (I_{min}). Данные занести в таблицу 2.
5. Изменяя интенсивность излучения, провести измерения по п.п.2-4 для 8-10 значений тока через р-п переход (I_{pn}) в светодиодном и лазерном режимах работы модуля.
6. Выключить лазер, переключив тумблер Т в положение «Выкл».
7. Измерить значение R_1 , необходимое для проведения расчетов.
8. Данные показать преподавателю

Таблица 2. Экспериментальные данные для получения зависимости степени линейной поляризации (Р) от тока через р-п переход.

№	$U_{\text{пл}}$, мВ (Прибор M_1)	I_{pn} , мА	$I_{\text{пи}}$, мкА (Прибор M_2)		$P=(I_{\text{max}}-I_{\text{min}})/I_{\text{max}}$
			I_{max}	I_{min}	
1					
2					
...					

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитать значения I_{pn} и Р, заполнив таблицу 2.
2. По полученным данным построить график зависимости Р от I_{pn} .
3. Проанализировать полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Беспалов, В.Н. Крылов, В.Н. Михайлов. "Основы оптоинформатики. Раздел I", СПб., СПГУ ИТМО, 2008 г.
2. В. А. Гуртов. «Твердотельная электроника», М., Техносфера, 2005 г.
3. О. Н. Ермаков. «Прикладная оптоэлектроника», М., Техносфера, 2004 г.

4. В. И. Дудкин, Л. Н. Пахомов. «Квантовая электроника. Приборы и их применение», М., Техносфера, 2006 г.
5. Ю.А.Быстров. «Оптоэлектронные приборы и устройства», М., Радио Софт 2001г.
6. Р. Фриман. «Волоконно-оптические системы связи», М., Техносфера, 2004 г.
7. Э. Розенштер, Б. Винтер. «Опто-электроника», М., Техносфера, 2004 г.
8. М. Шур. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М., Мир, 1992 г.
9. З. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М., Мир, 1984 г.
10. О. Звелто. «Принципы лазеров», М., Мир, 1990 г.
11. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. А. М. Прохоров. М., СЭ, 1998г.

Полупроводниковые детекторы оптического излучения в устройствах оптоинформатики

Цель работы: Изучение принципов работы и использования приемников оптического излучения на основе полупроводниковых диодов в устройствах оптоинформатики.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с принципом работы и конструктивными особенностями полупроводниковых фотодиодов на основе p-n перехода.
2. Исследовать характеристики фотодиода в фотогальваническом и фотодиодном режимах работы.
3. Определить диапазон линейности приемника излучения при проведении измерений интенсивности лазерного излучения в различных режимах работы фотодиодов.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Приёмники оптического излучения (фотоприёмники), представляют собой устройства, в которых под действием оптического излучения происходят изменения, позволяющие обнаружить это изменение и измерить его характеристики. Фотоприёмники преобразуют энергию оптического излучения в другие виды энергии (тепловую, электрическую, механическую и т. п.), более удобную для измерений. По принципу действия все фотоприёмники подразделяются на две группы: тепловые, интегрирующие результаты воздействия излучения за длительное время, и более быстродействующие - фотоэлектрические.

Основными параметрами приёмников оптического излучения являются:

1. Энергетическая (световая) характеристика, которая определяет зависимость реакции приёмника от интенсивности падающего излучения (ампер-ваттная, вольт-ваттная, люкс-ваттная).
2. Спектральная характеристика чувствительности, которая определяет зависимость реакции фотоприёмника на воздействие излучения с различной длиной волны.

3. Частотная характеристика, которая определяет зависимость чувствительности фотоприёмника от частоты модуляции и характеризует инерционность приёмника.
4. Пороговая чувствительность, которая определяет минимальный уровень мощности излучения, который может быть обнаружен на фоне собственных шумов.

Приёмники оптического излучения на основе полупроводников с р-п переходом (фотодиоды), используются в устройствах оптоинформатики для преобразования входного оптического сигнала в электрический за счёт того, что в области р-п перехода полупроводника поглощаемый фотон образует пару новых носителей заряда – электрон и дырку. Количество этих пар пропорционально интенсивности падающего света. Электрическое поле, существующее внутри перехода (рис.1а), затягивает эти электроны в п-область а дырки – в р-область. Поэтому при разомкнутой цепи – п-область заряжается отрицательно, а р-область – положительно, т.е. в р-п переходе возникает эдс (фотоэдс). А при замыкании внешней цепи в ней возникает ток. Такой режим использования фотодиода в качестве фотоприёмника (без внешнего электрического поля) называется фотогальваническим.

При подаче на р-п переход обратного напряжения смещения ширину запирающего слоя можно увеличить (рис.1б). Такой режим использования фотодиода в качестве фотоприёмника называется фотодиодным. Фотодиодный режим обладает рядом достоинств по сравнению с фотогальваническим: малой инерционностью, повышенной чувствительностью к длинноволновой части спектра, широким динамическим диапазоном линейности характеристик. Основным недостатком этого режима – наличие шумового тока, протекающего через нагрузку. Поэтому, при необходимости обеспечения низкого уровня шума фотоприёмника в ряде случаев фотогальванический режим может оказаться более выгодным, чем фотодиодный.

Одной из задач данной лабораторной работы является определение диапазона линейности энергетической характеристики исследуемых фотодиодов при двух схемах включения: фотогальванической схеме и схеме фотодиода (рис.1). Следует отметить, что диапазон линейности фотодиодов можно увеличить не только с помощью приложения обратного напряжения смещения, но и с помощью увеличения сопротивления нагрузки R.

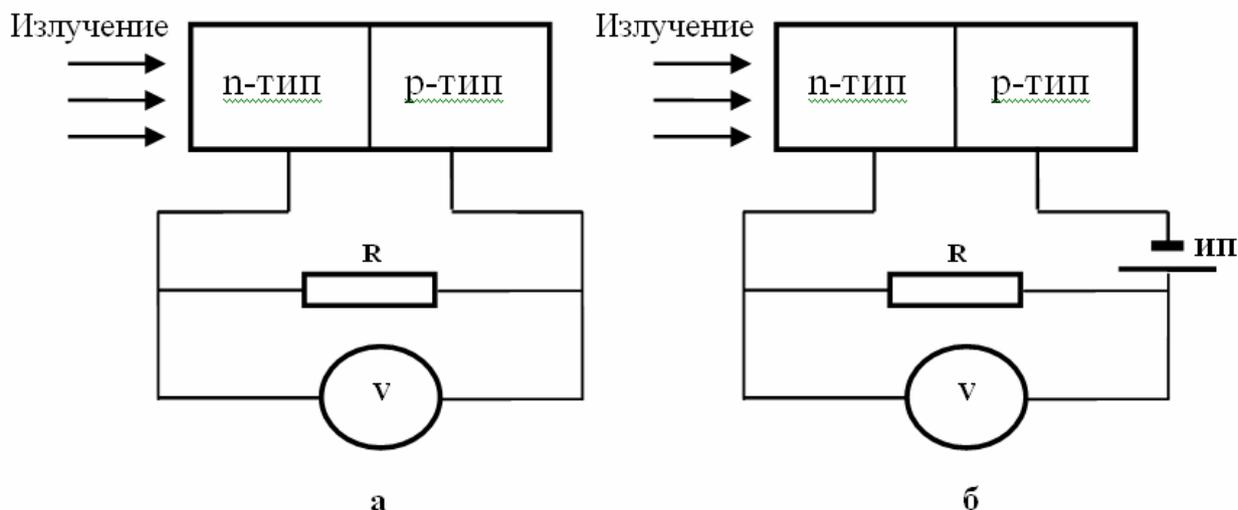


Рис.1.Использование фотодиода в фотогальваническом (а) и фотодиодном (б) режимах. R – сопротивление нагрузки, V – вольтметр, ИП – источник питания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для выполнения данной работы, принципиальная блок-схема которой приведена на рис.2, состоит из узла источника излучения с полупроводниковым лазером (ПЛ); узла приемника излучения (ПИ), включающего исследуемый фотодиод; ослабителя излучения (НС – нейтральный светофильтр) и измерительных приборов (мультиметры - M_1 и M_2).

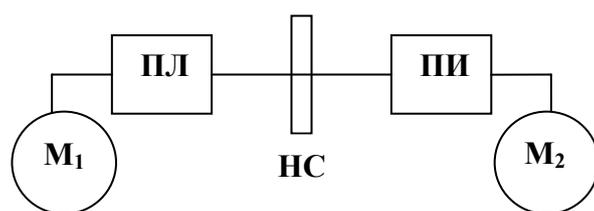


Рис.2.Блок-схема экспериментальной установки. ПЛ - полупроводниковый лазер, НС – нейтральный светофильтр (ослабитель излучения), ПИ – приемник излучения, M_1 и M_2 - измерительные приборы (мультиметры).

Установка смонтирована на оптическом рельсе. Каждый узел (узел источника излучения и узел приемника излучения) установлен в стойке и закреплен на рейтере. Рейтеры установлены на рельсе, который

определяет оптическую ось системы. Узел источника излучения снабжен потенциометром для регулировки интенсивности излучения лазера (см. описание лаб. раб. №1). Ослабитель излучения может быть отдельным элементом на рельсе (нейтральный светофильтр в специальной оправе установлен на рельсе на отдельном рейтере) или совмещен с узлом приемника излучения (нейтральный светофильтр смонтирован в форме насадки на входное окно фотоприемника). В качестве измерительных приборов используются мультиметры, с помощью которых в работе производится измерение напряжения (U) и сопротивления ($R_{пл}$). При исследовании фотодиода в различных режимах работы используется управляющий блок, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис.3. Измерение мощности излучения производится в относительных единицах (V – вольты). Все измерения в данной работе проводятся при использовании источника излучения (полупроводниковый лазерный модуль) в режиме лазерной генерации – $I_{pn} > I_{пор}$ (см. описание лаб. раб. №1).

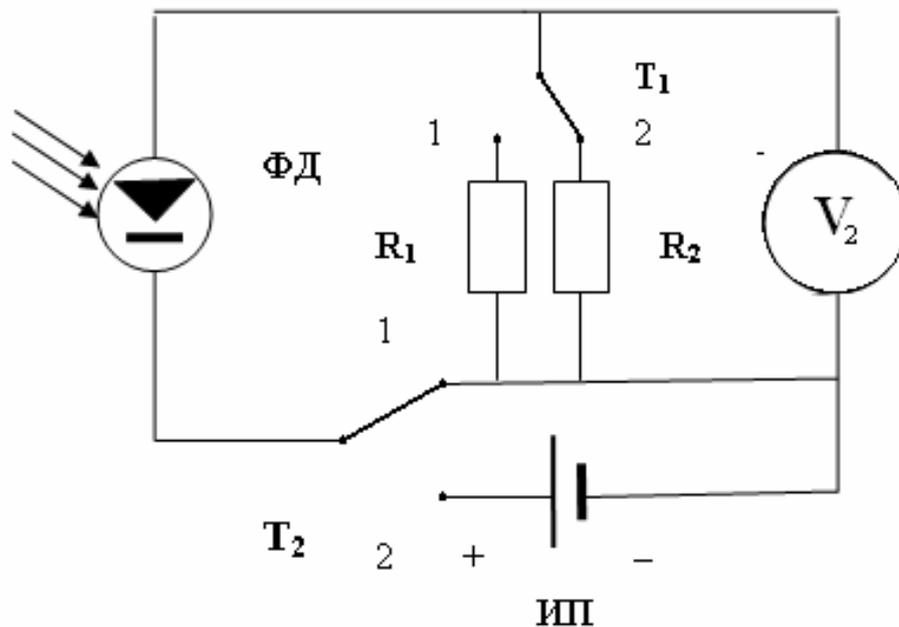


Рис.3. Принципиальная электрическая схема для измерения интенсивности лазерного излучения, используемая при исследовании полупроводникового фотодиода. ФД – фотодиод; V – вольтметр; R₁, R₂ – нагрузочные сопротивления; ИП – источник питания, создающий обратное смещение на p-n переходе (1,5 В); T₁ – тумблер для задания величины нагрузочного сопротивления (имеет два положения 1 и 2 для подключения сопротивления R₁ или R₂); T₂ – тумблер для переключения фотодиода в различные режимы работы (положение 1 – фотогальванический режим; положение 2 – фотодиодный режим).

При измерении интенсивности излучения измеряется падение напряжения на нагрузочном сопротивлении ($R = R_1 R_2$), которое обозначается $U_{\text{ПИ}}$ (единицы измерения – В). Величина $U_{\text{ПИ}}$ определяется мощностью лазерного излучения, падающего на входное окно фотодиода - приемника излучения, и характеристиками измерительной схемы. Важной особенностью практического использования фотодиодов в качестве приемников излучения является необходимость их использования в линейном режиме.

Экспериментальная зависимость $U_{\text{ПИ}}$ от мощности излучения полупроводникового лазера (W) приведена на рис.4а. Как видно из приведенной зависимости, в данных условиях эксперимента значения $U_{\text{ПИ}}$ прямо пропорциональны мощности лазерного излучения в диапазоне значений мощности излучения $W_1 \div W_2$. Следовательно, именно в этом диапазоне значений мощности излучения фотодиод работает в линейном режиме.

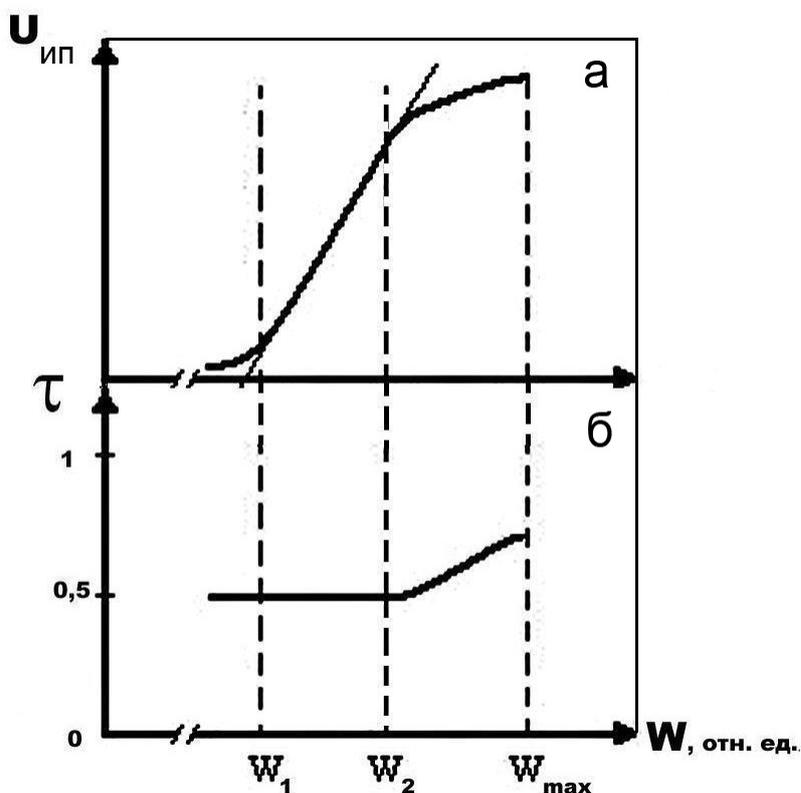


Рис.4. Типичная зависимость величин $U_{\text{ПИ}}$ (а) и τ (б) от мощности лазерного излучения W при работе приемника излучения в фотогальваническом режиме: $W_1 \div W_{\text{max}}$ - интервал значений мощности излучения лазера, в пределах которого производятся измерения; $W_1 = W_{\text{пор}}$ - соответствует мощности излучения при $I_{\text{рп}} = I_{\text{пор}}$; W_{max} соответствует максимальной мощности излучения лазера; $W_1 \div W_2$ - интервал значений мощности излучения лазера, в пределах которого приемник излучения работает в линейном режиме.

Следует помнить, что измерения проводятся при величине тока через р-п переход больше порогового ($I_{pn} \geq I_{пор}$), когда источник излучения работает в режиме лазерной генерации. I_{pn} определяется с помощью показаний измерительного прибора M_1 ($U_{пл}$), подключенного к источнику излучения через нагрузочное сопротивление $R_{пл}$ (см. описание лабораторной работы №1).

В процессе выполнения работы необходимо исследовать зависимость показаний измерительного прибора, подключенного к приемнику излучения, от тока через р-п переход при изменении интенсивности падающего на ПИ излучения и определить линейный диапазон работы исследуемого фотодиода (ФД–24К) в фотогальваническом режиме работы с различной величиной нагрузочного сопротивления и в фотодиодном режиме (с отрицательным смещением) при сопротивлении нагрузки, которое в фотогальваническом режиме работы не позволяет обеспечить линейный режим работы ПИ в используемом интервале изменений мощности лазерного излучения ($W \leq W_{max}$).

Интервал значений мощности излучения лазера, в пределах которого приемник излучения работает в линейном режиме, оценивается путем измерения пропускания светофильтра (НС – нейтральный светофильтр, ослабитель излучения) при различных значениях мощности лазерного излучения от $W_{пор}$ до W_{max} . В линейном режиме работы приемника излучения (интервал значений мощности излучения $W_1 \div W_2$ на рис.4) измеренное значение пропускания светофильтра (τ) не зависит от мощности измеряемого излучения, как это показано на рис.4б.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Исследование приемника излучения в фотогальваническом режиме работы ($U_{см}=0$)

1. Собрать схему эксперимента согласно рис.3 с использованием фотодиода с нагрузочным сопротивлением (без смещения) – тумблер T_2 находится в положении «1».
2. Включить полупроводниковый лазер, переключив тумблер узла источника излучения в положение «Вкл», и отъюстировать оптическую схему.
3. Установить максимальное значение мощности излучения лазера (используя регулировочное сопротивление узла источника излучения). Провести измерения, заполнив строку №1 таблицы 1:
 - Включить измерительный прибор M_1 на измерение напряжения и измерить $U_{пл}$ - данные занести в столбец 2.

- Включить измерительный прибор M_2 на измерение напряжения.
 - Установить тумблер T_1 в положение «1» и измерить $U_{\text{ПИ}}$ - данные занести в столбец 4.
 - Установить светофильтр и измерить $U^*_{\text{ПИ}}$ - данные занести в столбец 5.
 - Установить тумблер T_1 в положение «2» и измерить $U^*_{\text{ПИ}}$ (со светофильтром) - данные занести в столбец 8.
 - Убрать светофильтр и измерить $U_{\text{ПИ}}$ - данные занести в столбец
4. Уменьшить значение энергии излучения лазера на 4–7% и заполнить строчку №2 таблицы 1, проводя измерения аналогично п.3.
- Для получения требуемых зависимостей необходимо провести измерения и заполнить 10–15 строк таблицы 1 при различных значениях энергии лазерного излучения.
5. Включить прибор M_1 на измерение сопротивления и измерить величину $R_{\text{пл}}$, необходимую для расчета $I_{\text{рп}}$.
- Данные показать преподавателю.
6. Провести предварительные расчеты (оценить изменения τ при изменении мощности излучения) и для проведения дальнейших измерений выбрать сопротивление нагрузки, при котором фотодиод работает в нелинейном режиме.

Таблица 1. Исследование приемника излучения в фотогальваническом режиме работы при различном сопротивлении нагрузки.

№	$U_{\text{пл}}$, мВ	$I_{\text{рп}}$, мА	R_1			R_2		
			$U_{\text{ПИ}}$, мВ	$U^*_{\text{ПИ}}$, мВ	$\tau = U^*_{\text{ПИ}} / U_{\text{ПИ}}$	$U_{\text{ПИ}}$, мВ	$U^*_{\text{ПИ}}$, мВ	$\tau = U^*_{\text{ПИ}} / U_{\text{ПИ}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Исследование приемника излучения в фотодиодном режиме работы ($U_{\text{см}} = -1,5 \text{ В}$).

1. Установить тумблер T_1 в положение, соответствующее выбранному значению сопротивления нагрузки.
2. Установить тумблер T_2 в положение «2», соответствующее отрицательному смещению.
3. Установить максимальное значение мощности излучения лазера (используя регулировочное сопротивление узла источника излучения). Провести измерения, заполнив строку №1 таблицы 2:

- Включить измерительный прибор M_1 на измерение напряжения и измерить $U_{пл}$ - данные занести в столбец 2.
 - Включить измерительный прибор M_2 на измерение напряжения и измерить $U_{пи}$ - данные занести в столбец 4.
 - Установить светофильтр и измерить $U^*_{пи}$ - данные занести в столбец 5.
4. Уменьшить значение мощности излучения лазера на 4–7% и заполнить строчку №2 таблицы 2, проведя измерения аналогично п.3.
- Для получения требуемых зависимостей необходимо провести измерения и заполнить 10–15 строк таблицы 2 при различных значениях мощности лазерного излучения.

Таблица 2. Исследование приемника излучения в фотодиодном режиме работы (отрицательное смещение 1,5 В, сопротивление нагрузки, $R = \underline{\hspace{2cm}}$).

№	$U_{пл}$, мВ	$I_{рп}$, мА	$U_{пи}$, мВ	$U^*_{пи}$, мВ	$\tau = U^*_{пи} / U_{пи}$
1	2	3	4	5	6

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Заполнить столбцы 3,6,9 таблиц 1 и 2: рассчитать значения $I_{рп}$ и пропускание светофильтра τ при различных значениях мощности лазерного излучения
2. Построить график зависимости $U_{пи}$ и τ от тока через р-п переход (при $I_{рп} > I_{пор}$) в фотогальваническом режиме работы приемника излучения (без смещения) при использовании различных сопротивлений нагрузки.
3. Построить график зависимости $U_{пи}$ и τ от тока через р-п переход (при $I_{рп} > I_{пор}$) в фотогальваническом режиме (без смещения) и в фотодиодном режиме (с отрицательным смещением 1,5 В) работы приемника излучения с одинаковым сопротивлением нагрузки.
4. Оценить диапазон линейности приемника излучения (фотодетектора) при различных режимах его работы.
5. Проанализировать полученные результаты и сделать вывод о возможности использования данного приемника излучения при различных схемах его подключения к измерительному прибору.

ЛИТЕРАТУРА

12. В.Г. Беспалов, В.Н. Крылов, В.Н. Михайлов. "Основы оптоинформатики. Раздел I", СПб., СПГУ ИТМО, 2008 г.
13. В. А. Гуртов. «Твердотельная электроника», М., Техносфера, 2005 г.
14. О. Н. Ермаков. «Прикладная оптоэлектроника», М., Техносфера, 2004 г.
15. В. И. Дудкин, Л. Н. Пахомов. «Квантовая электроника. Приборы и их применение», М., Техносфера, 2006 г.
16. Ю.А.Быстров. «Оптоэлектронные приборы и устройства», М., Радио Софт 2001г.
17. Р. Фриман. «Волоконно-оптические системы связи», М., Техносфера, 2004 г.
18. Э. Розенштер, Б. Винтер. «Опто-электроника», М., Техносфера, 2004 г.
19. М. Шур. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М., Мир, 1992 г.
20. З. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М., Мир, 1984 г.
21. О. Звелто. «Принципы лазеров», М., Мир, 1990 г.
22. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. А. М. Прохоров. М., СЭ, 1998г.

Оценка расходимости пучка лазерного излучения

Цель работы: Провести оценку расходимости излучения лазера по измерениям профиля лазерного пучка.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с методикой оценки расходимости излучения лазера по измерениям распределения интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения.
2. Ознакомиться с экспериментальной методикой реализации «метода сканирующего ножа», применяемой в данной работе для измерения распределения интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения.
3. Провести измерения распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка на различных расстояниях от выходного окна источника излучения и оценить расходимость излучения исследуемого лазера в режиме лазерной генерации.
4. Провести измерения и сравнить профиль пучка лазерного излучения в режиме лазерной генерации и в режиме светоизлучающего диода (Усложненный вариант лабораторной работы).
5. Провести измерения распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка на различных расстояниях от выходного окна источника излучения и оценить расходимость излучения исследуемого лазера в режиме светоизлучающего диода (Усложненный вариант лабораторной работы).

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Оценка расходимости пучка излучения.

Определение расходимости пучка лазерного излучения производится путем сравнения распределений интенсивности $I(x)$, полученных на разных расстояниях (y_1 и y_2) от выходного окна источника излучения (см. рис.1). Сравнение производится по интервалу значений Δx , внутри которого интенсивность пучка превышает 50% от максимального значения (так называемая «полуширина» распределения интенсивности, или «полуширина пучка»).

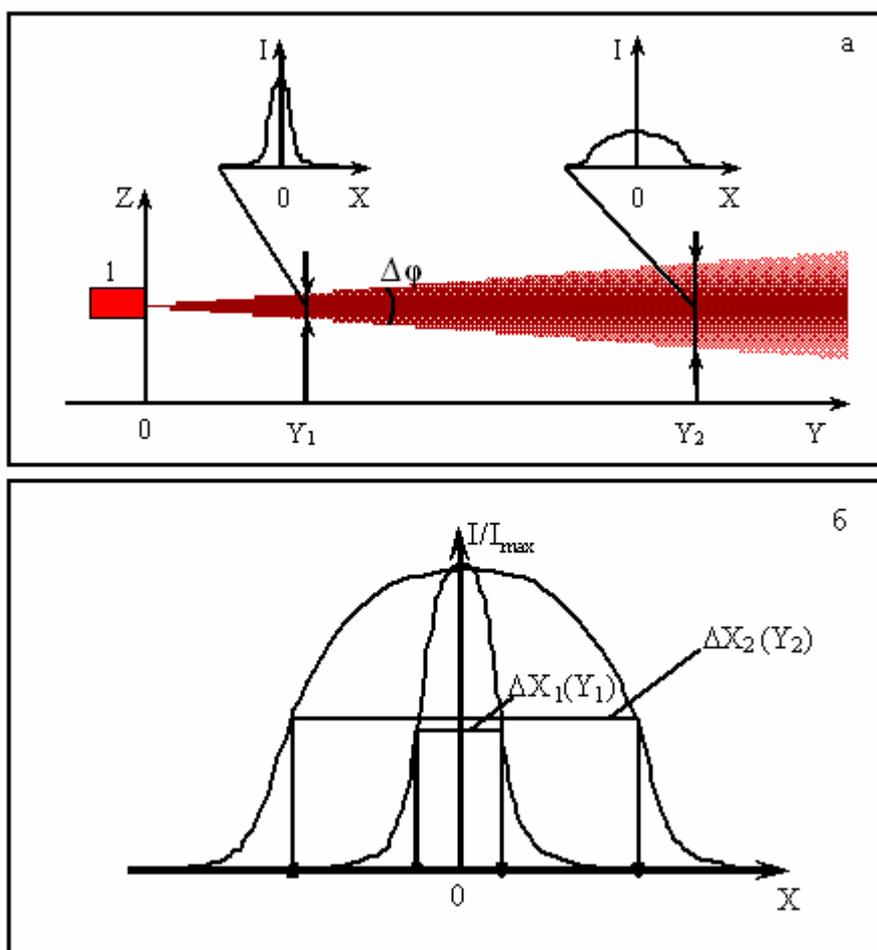


Рис.1.Схема, поясняющая методику оценки расходимости излучения. а – геометрия схемы в плоскости yz: 1 – источник излучения; $\Delta\varphi$ – расходимость пучка излучения в плоскости yz; y_1, y_2 - расстояние от выходного окна источника излучения при проведении измерений профиля пучка излучения. б – распределение интенсивности в сечении пучка излучения по координате x (профиль пучка излучения) на разных расстояниях (y_1 и y_2) от выходного окна источника излучения; Δx_1 – полуширина пучка при y_1 ; Δx_2 – полуширина пучка при y_2 .

Расходимость пучка ($\Delta\psi$) оценивается по следующей формуле

$$\Delta\psi = (\Delta x_2 - \Delta x_1)/(y_2 - y_1) \quad (1).$$

В работе необходимо оценить расходимость пучка излучения при двух режимах работы источника излучения, которые характеризуются различными значениями тока через p-n переход.

Использование метода сканирующего ножа для измерения размера перетяжки каустики гауссова пучка.

При исследовании распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка может быть использован метод сканирования пучка

прямолинейным краем полуплоскости, который получил название «Метод сканирующего ножа» [1,2] .

Рассмотрим применение данного метода для исследования поперечного сечения пучка, распределение интенсивности в котором можно описать функцией Гаусса.

Как правило, данный метод используется для измерения размера перетяжки каустики гауссова пучка и состоит в следующем.

Поперечное распределение интенсивности в одномодовом гауссовом пучке можно описать с помощью соотношения

$$I(r, \omega) = I_0 \cdot e^{\frac{-2r^2}{\omega^2}} \quad (1),$$

где r - радиальная координата (0 – центр пучка), ω - характеристический радиус гауссова пучка (измеряется по уровню $1/e^2$), I_0 – нормировочный коэффициент.

Если такой пучок перекрывать прямолинейным краем полуплоскости (край ножа), как показано на рис.2, то поток I_k оставшейся части пучка

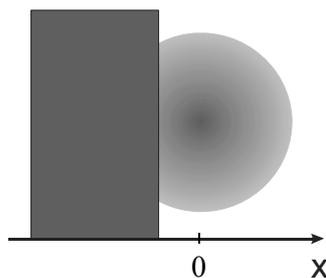


Рис.2.Перекрытие лазерного пучка краем полуплоскости

будет зависеть от положения координаты x края полуплоскости следующим образом

$$I_k(x, \omega) = I_1 \int_x^{\infty} e^{\frac{-2t^2}{\omega^2}} dt \quad (2),$$

где I_1 – нормировочный коэффициент.

Зависимость $I_k(x)$ приведена на рис.3. При исследовании формы пучка и сравнении с функцией Гаусса зависимости, полученной дифференцированием функции $I_k(x)$ по координате x , необходимо определить величину ω . Для этого требуется измерить половину расстояния между точками по оси координат x (поперек пучка), в которых интенсивность достигает величин 0.033 и 0.977 от максимального значения.

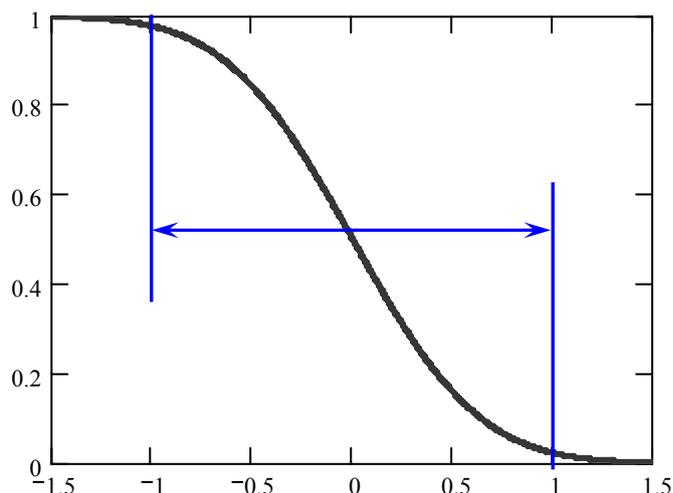


Рис.3. Зависимость потока I_k части гауссова пучка «вне ножа» от координаты x края перекрывающей его полуплоскости (величина 2ω определяется по уровням 0.033 и 0.977 от максимального значения)

Использование метода сканирующего ножа для измерения распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка.

Форма пучка излучения исследуемых лазеров может отличаться от функции Гаусса, но метод сканирующего ножа может быть использован для оценки профиля лазерного пучка по одной из координат, например, по координате x , при условии, что интенсивность лазерного пучка в перпендикулярном направлении (например, по координате z) не изменяется. При выполнении данной работы предполагается именно такая ситуация. Пучок излучения исследуемых лазеров в плоскости xz имеет вид полоски ($\sim 2 \times 5$ мм), вытянутой по координате z , из которой для проведения измерений вдоль оси x вырезается центральная часть (~ 2 мм), что позволяет считать распределение интенсивности исследуемого пучка в направлении z равномерным.

В этом случае распределение интенсивности пучка по координате x может быть получено простым способом - дифференцированием функции $I_k(x)$ по x . На рис.4, для наглядности в качестве примера представлены функции $I_k(x)$ для трех различных математических распределений интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка: прямоугольного, треугольного, гауссова.

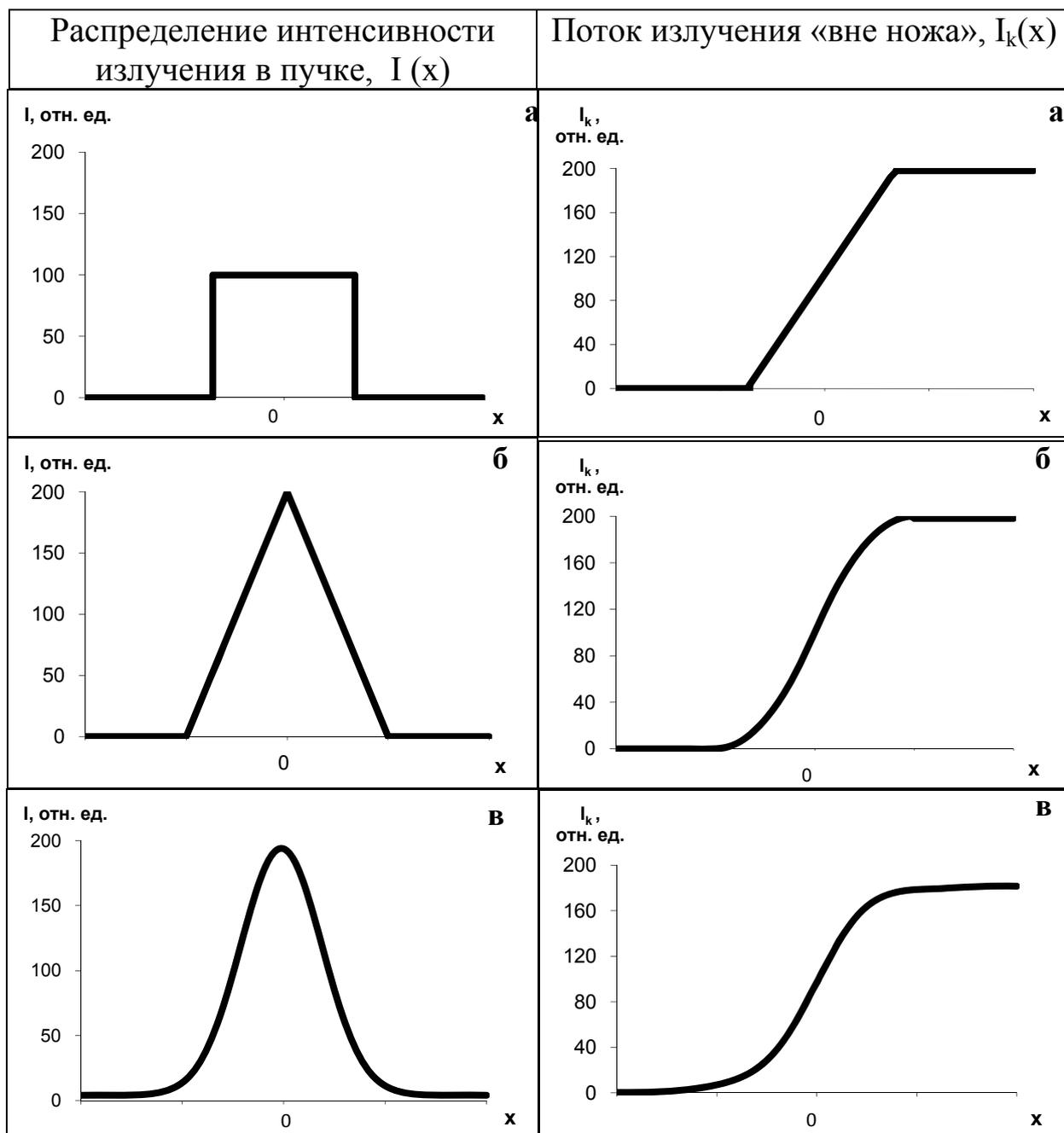


Рис.4. Вид функции $I_k(x)$ (поток излучения «вне ножа») для трех различных математических распределений интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка: прямоугольного (а), треугольного (б), гауссова (в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис.5а приведена принципиальная оптическая схема установки для проведения измерений распределения интенсивности в лазерном пучке «методом сканирующего ножа».

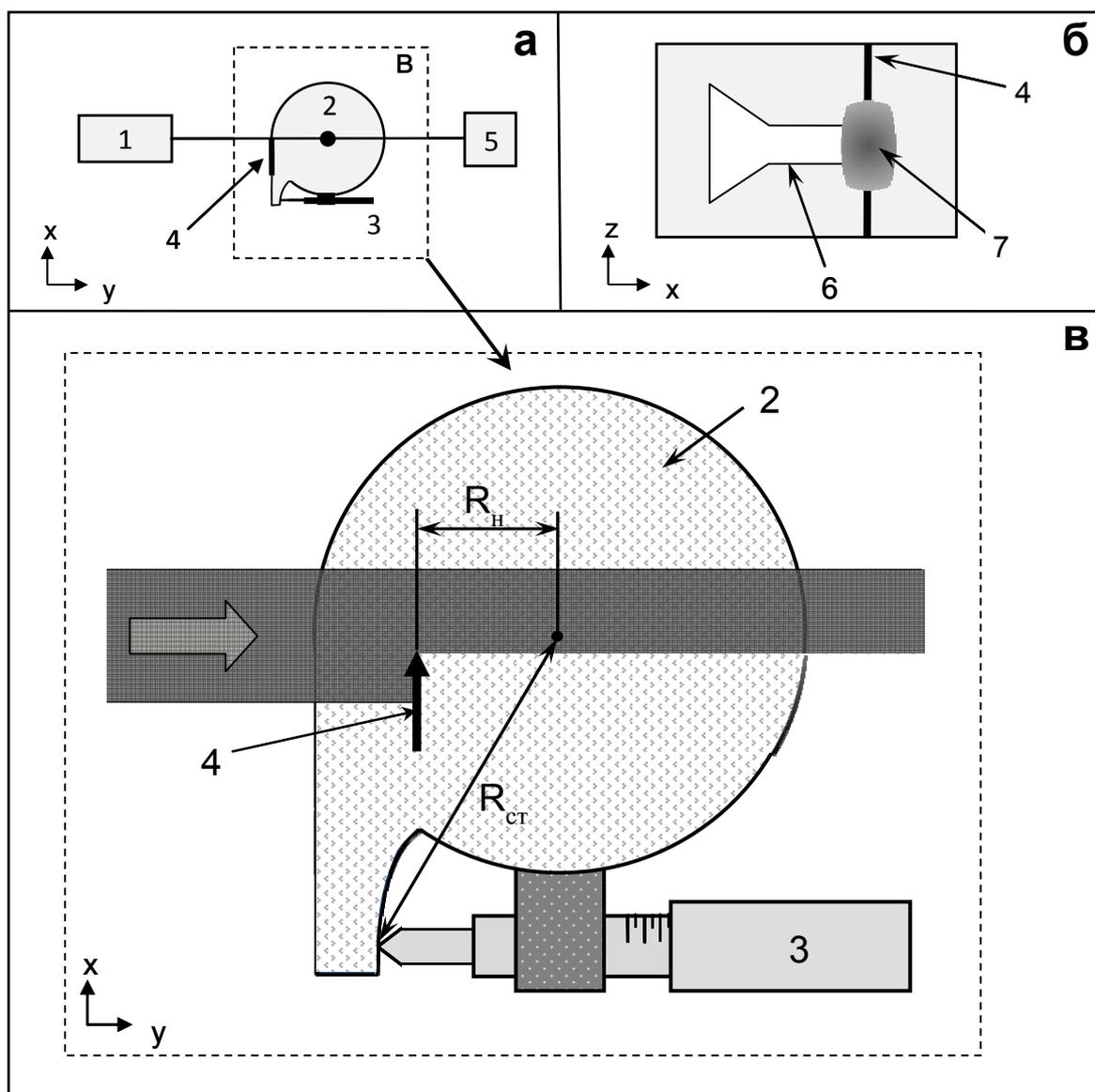


Рис.5. Схема установки для измерения распределения интенсивности в поперечном сечении пучка излучения полупроводникового лазера: а – принципиальная схема установки; б – устройство «ножа и щели»; в – схема поворотного узла. 1 – источник излучения, 2 – поворотный столик, 3 – микрометрический винт, 4 – «нож», 5 – приемник излучения, 6 – диафрагма, 7 – пучок лазерного излучения.

При проведении измерений в поперечное сечение лазерного пучка вводится нож, который может перемещаться вдоль оси x . Нож совмещен со щелевой диафрагмой, которая позволяет выделять участок

исследуемого пучка излучения равномерный в направлении оси z . Устройство «ножа и щели» схематически показано на рис.5б. Схема поворотного узла детально рассмотрена на рис.5в: нож устанавливается на край поворотного столика, а его перемещение по оси x реализуется при небольшом диапазоне углов поворота. (Движение ножа происходит по окружности радиуса порядка 40мм и длине дуги порядка 2мм, так что траекторию движения можно с большой точностью аппроксимировать прямой линией).

При повороте столика (путем осторожного и медленного вращения микровинта) нож, двигаясь по координате x , последовательно перекрывает исследуемый пучок. Положение ножа определяется по данным барабана микрометрического винта (L_{MB}), а его смещение по величине перемещения микровинта. Если L_{MB} - перемещение микровинта, L_H – перемещение ножа, то L_H определяется по формуле:

$$L_H = L_{MB} \cdot R_H / R_{CT} \quad (3).$$

Как видно, установка ножа на поворотном столике позволяет увеличить точность измерения перемещений ножа (L_H) в R_{CT} / R_H раз по сравнению с точностью измерения перемещений (L_{MB}), осуществляемых непосредственно головкой барабана микрометрического винта. Таким образом, данное устройство позволяет двигать лезвие ножа с большой точностью, недостижимой при использовании стандартных механических устройств, осуществляющих сдвиг по прямой линии: при повороте барабана микрометрического винта на одно деление, равное сдвигу на 0.01мм, столик, имеющий радиус вращения 100 мм, поворачивается на угол 0,1 мрад. Линейный сдвиг ножа перпендикулярно оптической оси происходит при этом на расстояние (L_H), которое зависит от R_H - положения ножа относительно оси вращения столика. Устройство ножа устанавливается во время занятия и R_H измеряется перед началом проведения эксперимента.

Измерение потока излучения производится с помощью приемника излучения (элемент 5 на рис.5), представляющего собой фотодиод ФД-24, соединенный с измерительным прибором (мультиметром). Фотодиод работает в фотогальваническом режиме и поток излучения прямо пропорционален току приемника излучения (фототоку).

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. Установить рабочий режим работы источника излучения.
2. Установить приемник излучения на оптической оси так, чтобы пучок излучения полностью попадал во входное окно приемника. Включить измерительный прибор (мультиметр) на измерение тока.
3. Установить узел поворотного столика в необходимое положение на оптической оси и установить нож для проведения измерений в соответствии со схемой, изображенной на рис.4а; проверить юстировку оптической схемы – пучок излучения должен полностью попадать на входное окно приемника излучения; измерить расстояние R_n . Лазерный пучок должен проходить через ось вращения поворотного столика.
4. Оценить диапазон изменения значений барабана МВ, требуемый для получения зависимости $I_k(x)$, и определить сдвиг барабана МВ между двумя измерениями при получении данной зависимости, которая должна содержать необходимое количество экспериментальных точек. Важно! - Количество точек, взятых для построения функции, существенно влияет на точность определения производной от этой функции.
5. Провести измерения значений I_k , изменяя положение барабана микрометрического винта (МВ). Использовать таблицу для записи экспериментальных данных: столбцы 2 и 5. Начинать измерения удобнее, когда нож полностью перекрывает исследуемую часть лазерного пучка, т. к. в этом случае производная от получаемой функции будет иметь положительные значения.
6. Показать данные преподавателю.

Таблица 1. Запись и обработка результатов эксперимента при измерении профиля пучка излучения.

№ п/п	Положение барабана МВ, мм	Смещение ножа, L_n , мм	Положение ножа на оси x, мм	Поток излучения вне ножа, I_k , мкА
1	2	3	4	5
1				
2				
...				

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. Рассчитать смещение ножа (L_H) при проведении измерений – заполнить столбец 3 таблицы, используя формулу (3) в предположении, что при первом измерении $L_{MB} = 0$.
2. Построить зависимость I_k от L_H . – см. рис.6а.
3. Продифференцировать полученную зависимость и получить функцию $I(L_H)$ – см. рис.6б. Полученная зависимость представляет собой искомое распределение интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения. Дифференцирование проводить численно с помощью компьютера или графически*. (Таблица 2 для записи данных в этом случае может быть сделана в произвольной форме, удобной для проведения вычислений и сопоставления результатов расчета функции I с положением ножа на оси x – данными столбца 4 таблицы 1.)
4. Рассчитать положение ножа на оси x при проведении измерений, предполагая, что $x = 0$ при максимальном значении функции $I(L_H)$, и заполнить столбец 4 таблицы 1.
5. Построить зависимость $I(x)$ (см. рис.6в), которая графически представляет собой искомое распределение интенсивности в системе координат, где оптическая ось совпадает с координатой y .

* Вычислить производную от функции можно с помощью программы ORIGIN, установленной на компьютерах кафедры и в компьютерном классе кафедры, – проконсультироваться с преподавателем.

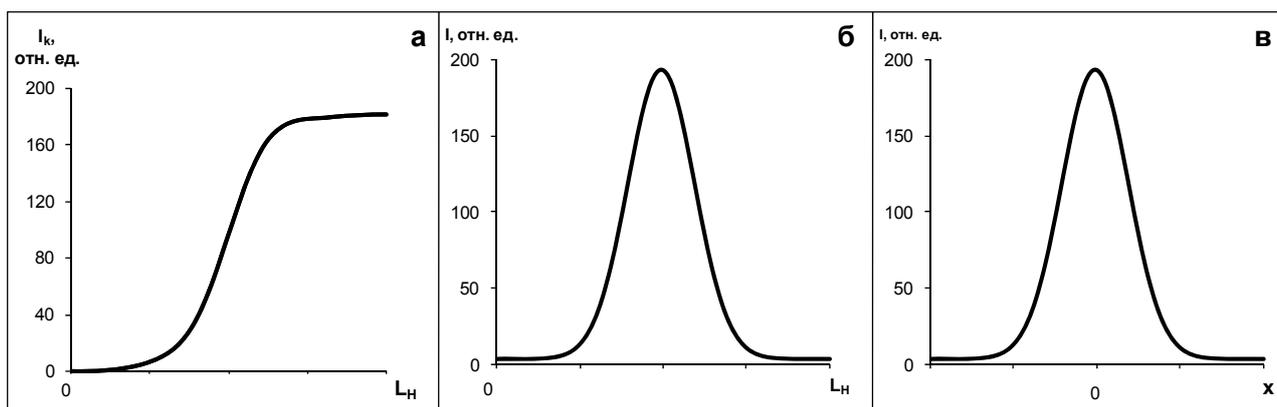


Рис.6.а – зависимость потока излучения вне ножа (I_k) от смещения ножа (L_H); **б** – зависимость интенсивности излучения в лазерном пучке (I) от положения ножа (L_H); **в** – распределение интенсивности излучения в лазерном пучке по координате x при условии, что оптическая ось совпадает с осью y и имеет координаты $[0, y, 0]$.

ОЦЕНКА РАСХОДИМОСТИ ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Провести измерения профиля пучка излучения на различных расстояниях от выходного окна лазера (y_1, y_2, y_3 , и т.д.) – уточнить значения у преподавателя.
2. Построить зависимость $I(x)$ (см. рис.6в) в каждом случае.
3. Оценить расходимость пучка излучения по полуширине измеренного распределения интенсивности, как это показано на рис.2 и рис.8.

Примеры обработки экспериментальных данных, полученных при выполнении данной работы, показаны на рис.7 и рис.8.

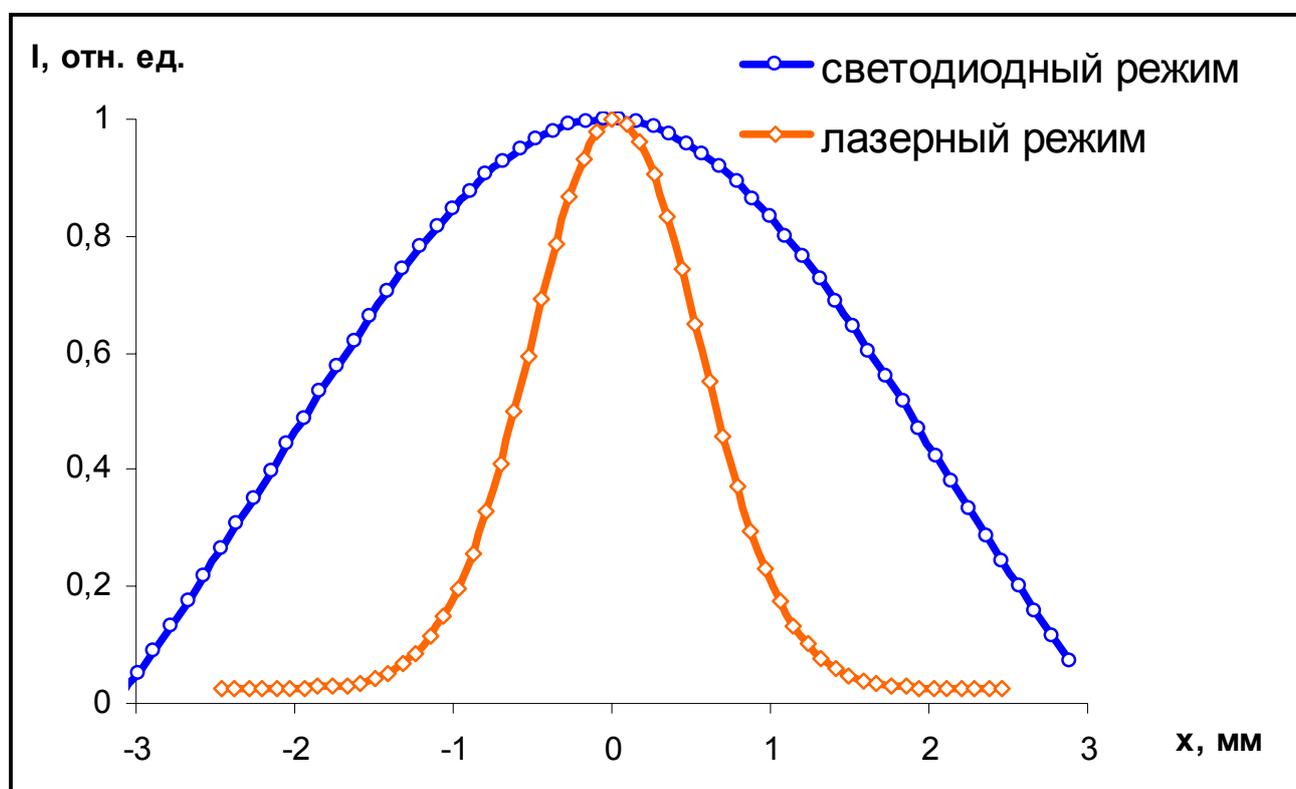


Рис.7. Профиль пучка излучения при работе полупроводникового источника излучения в режиме светоизлучающего диода и в режиме лазерной генерации.

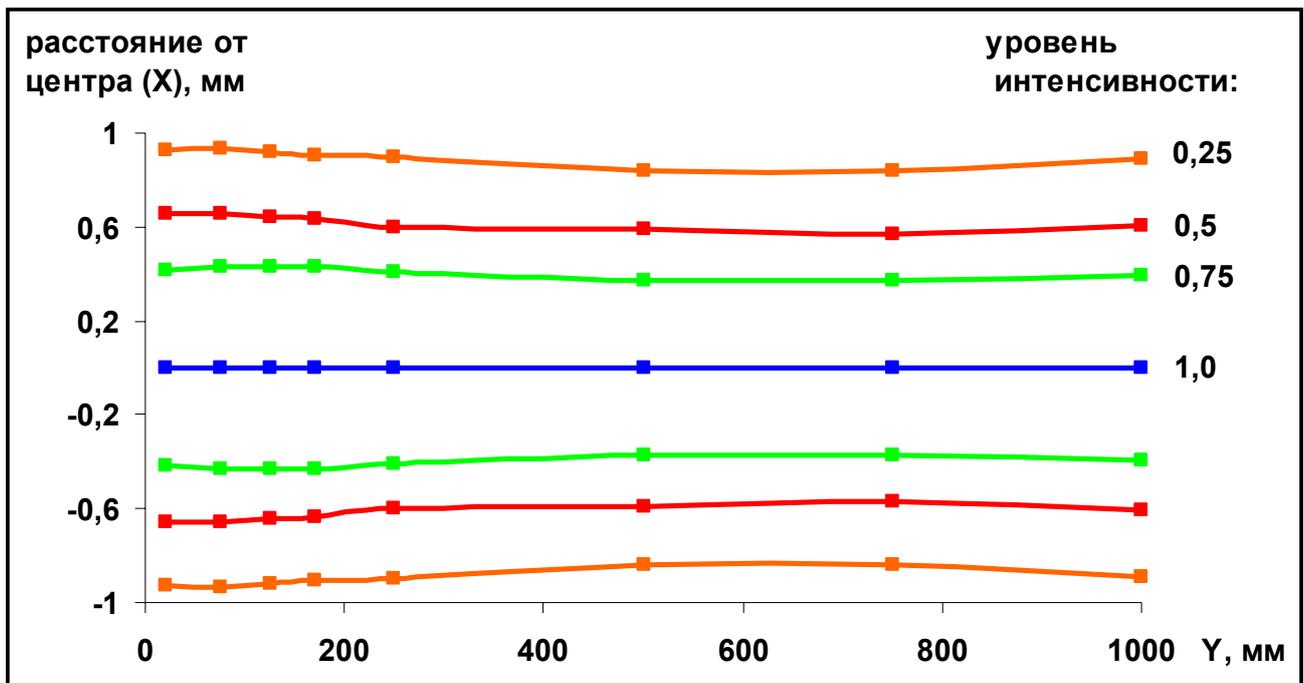


Рис.8. Данные для проведения оценки расходимости пучка излучения по измерениям профиля пучка на различных расстояниях от выходного окна источника излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y.Suzaki, A.Tachibana. Measurement of the μm sized radius of Gaussian laser beam using the scanning knife-edge//Applied Optics, v.14, No.12, p.2809-2810 (1975).
2. G.Brost, P.Horn, A.Abtahi. Convenient spatial profiling of pulsed laser beams// Applied Optics, v.24, No.1, p.38-40 (1985).

Сравнение быстродействия р-п и р-і-п диодов, используемых в качестве детекторов излучения

Цель работы: Изучение принципов работы и особенностей использования в устройствах оптоинформатики приемников оптического излучения на основе р-п и р-і-п диодов.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с принципом работы и конструктивным исполнением полупроводниковых фотодиодов на основе р-п и р-і-п структуры.
2. Сравнить быстродействие р-п и р-і-п диодов путем определения относительной длительности фронта импульса на выходе фотоприемника при увеличении частоты модуляции.
3. Сравнить быстродействие р-п диода в фотогальваническом и фотодиодном режимах работы.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Приемники излучения на основе р-п и р-і-п структур

В устройствах оптоинформатики в качестве приемников оптического излучения широко используются полупроводниковые фотодиоды на основе р-п перехода.

Однако, при все возрастающих скоростях передачи информации, быстродействие р-п диодов оказывается недостаточным и накладывает ограничение на их применение.

Быстродействие фотоприемника характеризует постоянная времени, которая отражает реакцию фотоприемника на короткий световой импульс и равна времени от момента возникновения фототока до момента его возвращения к нулю.

На постоянную времени р-п диода влияют время диффузии неосновных носителей до р-п перехода и постоянная времени р-п перехода. Время диффузии неосновных носителей до р-п перехода приблизительно выражается соотношением

$$t_{\text{диф}} \approx w^2 / D \quad (1),$$

где w – глубина расположения р-п перехода от светочувствительной поверхности фотодиода, D – коэффициент диффузии носителей заряда, связанный с подвижностью носителей заряда μ соотношением Эйнштейна :

$$D = (kT/q)\mu \quad (2),$$

где k - постоянная Больцмана, T - температура, K° , q – квантовый выход.

Постоянная времени р-п перехода зависит от его емкости, называемой барьерной и определяемой выражением

$$C_{\text{бар}} = \epsilon\epsilon_0 S/\delta \quad (3),$$

где ϵ и ϵ_0 – диэлектрические постоянные полупроводника и вакуума, соответственно, S – площадь р-п перехода, δ – толщина обедненного слоя.

У современных р-п диодов постоянная времени достаточно мала и они могут детектировать сигналы с частотами до десятков МГц, однако такой полосы пропускания недостаточно для современных высокочастотных устройств приема и обработки информации.

Для уменьшения постоянной времени р-п диода была создана р-і-п структура. В такой структуре между р- и п-слоями, образованными полупроводниками с примесной проводимостью, помещен слой беспримесного полупроводника – полупроводник і-типа (с собственной проводимостью) толщиной в несколько десятков или сотен микрон, что значительно увеличивает рабочий объем фотодиода, а значит и его чувствительность. Но основное преимущество р-і-п диода заключается в возможности детектирования оптических сигналов, модулируемых частотами гигагерцового диапазона, что особенно важно для высокочастотных устройств приема и обработки информации.

Высокое быстродействие р-і-п диодов объясняется меньшей, по сравнению с р-п диодами, емкостью р-п перехода. Фотодиод можно представить как плоский конденсатор, емкость которого прямо пропорциональна электрическому заряду и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками ($C \sim Q/L$). Так как ширина і-слоя у р-і-п диодов в 10-100 раз больше, чем ширина обедненного слоя у р-п диодов, то и их емкость значительно меньше емкости р-п диодов. Время заряда/разряда такого конденсатора прямо пропорционально емкости ($t \sim C$), что и обеспечивает возможность детектирования более высокочастотного сигнала. Лучшие образцы р-і-п диодов могут работать в области частот до единиц ГГц, в то время как р-п диоды – только до десятков МГц. Использование фотодиодов на частотах выше допустимых, приводит к искажению формы принимаемых оптических импульсов, увеличению их длительности, а также и к пропуску отдельных импульсов, то есть к потере передаваемой информации.

Принцип конструктивного исполнения p-n и p-i-n диодов представлен на рис.1. Чаще всего p-i-n диоды на длину волны 0,85 мкм изготавливают из кремния (Si), а на большие длины волн (1,2 - 1,6 мкм) - из германия (Ge) или (InGaAs).

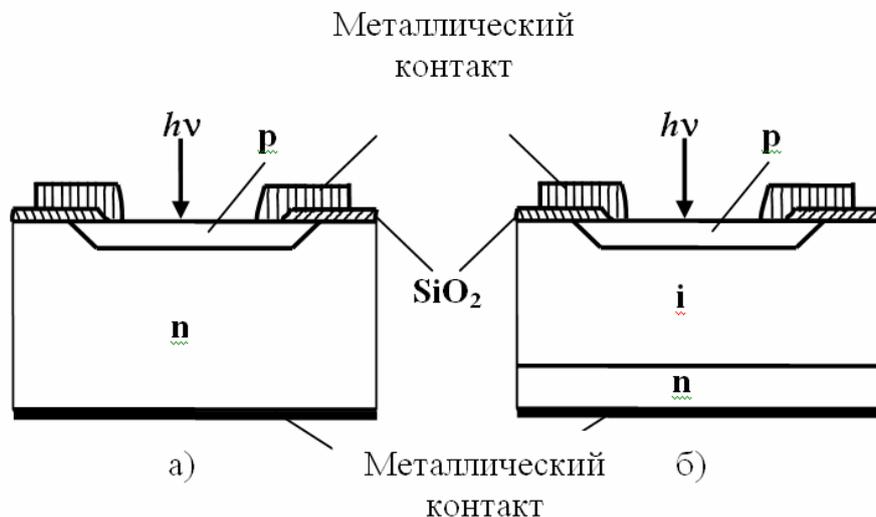


Рис.1. Конструкция фотодиода на основе p-n структуры (а) и фотодиода на основе p-i-n структуры (б).

Фотогальванический и фотодиодный режим работы фотодиодов

Фотодиод способен работать в схемах с внешним источником смещения и без него. Режим работы с внешним источником смещения называется фотодиодным, а без внешнего источника – фотогальваническим режимом. На рис.2 представлены схемы включения фотодиода в фотогальваническом и фотодиодном режимах.

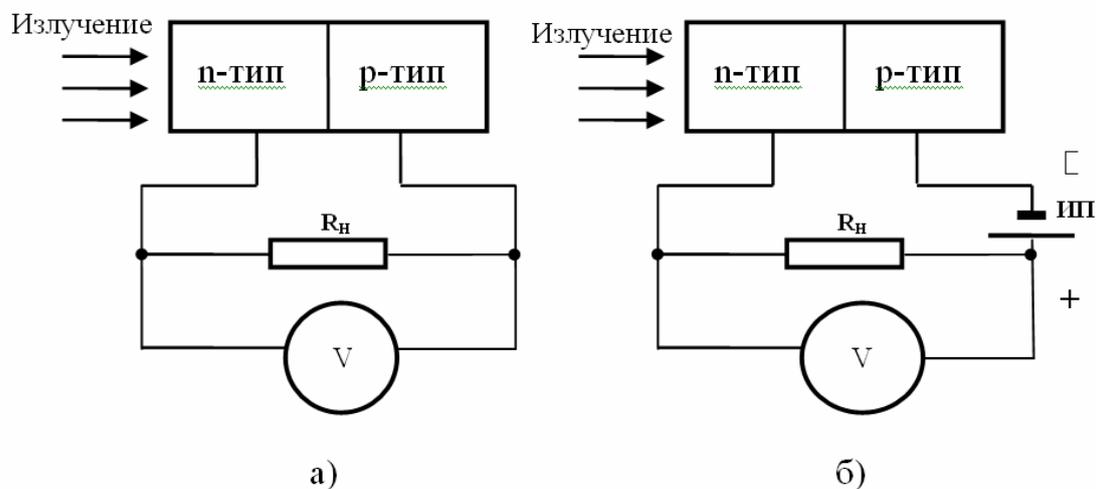


Рис.2. Схемы включения фотодиода: (а) - фотогальванический режим, (б) - фотодиодный режим. R_н – сопротивление нагрузки, V – вольтметр, ИП – источник питания.

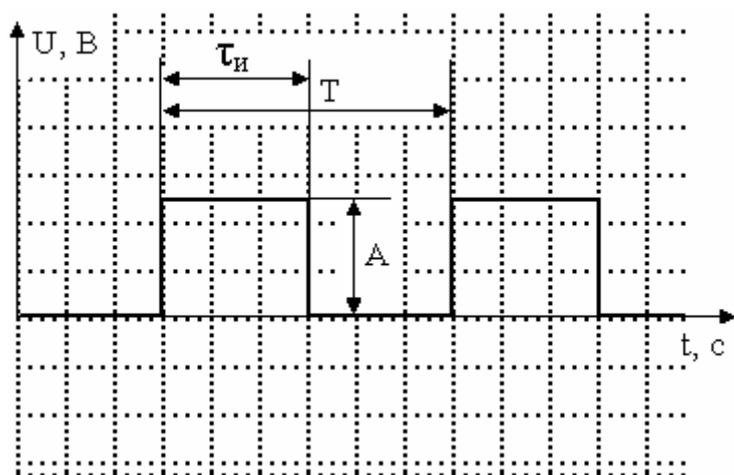
Под действием света вблизи р-п перехода образуются пары электрон-дырка. В области р-п перехода существует диффузионное поле, силы этого поля производят разделение неравновесных носителей, образованных поглощенными квантами света. В фотогальваническом режиме (без внешнего источника питания) происходит накопление дырок в р- области и электронов в п- области. Это накопление неравновесных носителей не может продолжаться беспрестанно, так как одновременно с возрастанием концентрации дырок в р- области и электронов в п- области происходит понижение потенциального барьера на величину фотоЭДС и возникает диффузия основных носителей через р-п переход. Наступает динамическое равновесие. При подключении к внешним выводам фотодиода сопротивления нагрузки R_n , через него будет протекать электрический ток.

При подаче на р-п переход обратного напряжения смещения ширину запирающего слоя можно увеличить. Такой режим использования фотодиода в качестве фотоприемника называется фотодиодным. Фотодиодный режим обладает рядом достоинств по сравнению с фотогальваническим: малой инерционностью, повышенной чувствительностью к длинноволновой части спектра, широким динамическим диапазоном линейности характеристик. Основным недостатком этого режима – наличие шумового тока, протекающего через нагрузку.

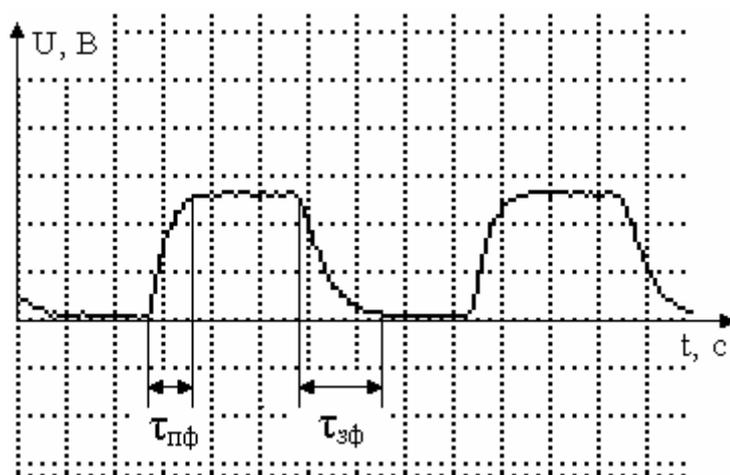
Оценка частотных характеристик приемника излучения (ПИ) на основе полупроводникового кремниевого р-п диода, работающего в фотогальваническом и фотодиодном режиме, и ПИ на основе р-і-п диода, работающего в фотогальваническом режиме, проводится на основе сравнения отклика фотодиода на излучение полупроводникового лазера, модулированное по амплитуде последовательностью прямоугольных импульсов.

При детектировании фотодиодом лазерного излучения, модулированного сигналом прямоугольной формы, наглядно проявляются частотные характеристики фотодиода, т.к. такой сигнал представляет собой суперпозицию гармонических составляющих, включая высокочастотные, и степень искажения фотодиодом переднего и заднего фронтов принимаемых импульсов характеризует его частотные свойства.

На рис. 3 представлены осциллограммы последовательности модулирующих импульсов (а) и импульсов на выходе фотодиода (б).



а)



б)

Рис.3. Осциллограммы последовательности модулирующих импульсов (а) и импульсов на выходе фотодиода (б). T – период следования импульсов ($T = 1/ F_M$), A – амплитуда импульса, $\tau_{и}$ – длительность импульса ($\tau_{и} = 0,5T$), $\tau_{пф}$ – длительность переднего фронта импульса, $\tau_{зф}$ – длительность заднего фронта импульса. (Длительность импульса принято измерять на уровне $0,1A$, или $0,5A$, или $0,9A$.)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для выполнения работы, блок - схема которой представлена на рис.4, состоит из источника излучения (ИИ) с полупроводниковым лазерным модулем (ПЛ), излучение которого модулируется генератором сигналов (ГС); узла приемника излучения (ПИ), включающего исследуемый фотодиод (ФД); измерительного прибора (осциллограф) и компьютера.

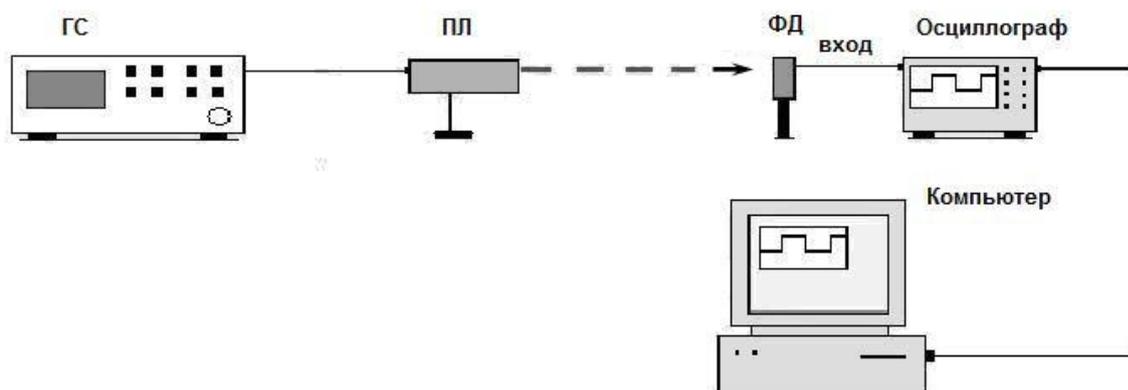


Рис.4.Блок – схема экспериментальной установки для исследования приемников излучения на основе фотодиодов. ГС – генератор сигнала специальной формы, ПЛ – полупроводниковый лазерный модуль, ФД – исследуемый фотодиод.

В качестве источника модулирующих сигналов используется цифровой генератор сигналов специальной формы, генерирующий последовательность импульсов прямоугольной формы в виде меандра ($\tau_n = 0,5T$), диапазон частот модуляции $F_M = 1 \text{ Гц} \div 500 \text{ КГц}$. Питается ГС от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

В качестве источника излучения используется полупроводниковый лазерный модуль (ПЛ) с TTL схемой управления излучением, которая осуществляет модуляцию излучения по амплитуде за счет модуляции тока инжекции. Длина волны излучения $650 \pm 5 \text{ нм}$, мощность излучения 3 мВт, предельная частота модуляции $F_M = 500 \text{ кГц}$. ПЛ питается от сети постоянного тока напряжением 4,5 В.

Фотоприемник с исследуемым кремниевым р-п диодом может работать в фотогальваническом и в фотодиодном режимах. Тумблер «Т» служит для переключения фотодиода из фотогальванического режима (положение «1») в фотодиодный режим работы (положение «2»), при котором напряжение смещения $U_{см} = 3 \text{ В}$.

На рис.5 приведена принципиальная электрическая схема приемника излучения с р-п диодом. В качестве нагрузки используется резистор $R_n = 1,5 \text{ кОм}$.

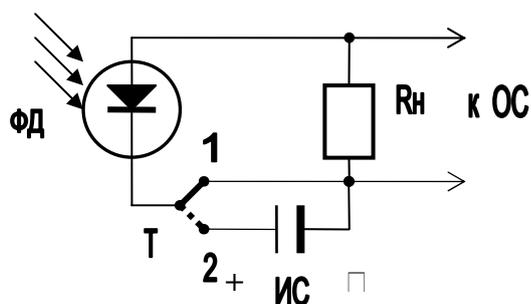


Рис.5. Принципиальная электрическая схема для исследования частотных характеристик приемника излучения при различных режимах работы p-n диода. ФД – фотодиод, ОС – осциллограф, R_н – сопротивление нагрузки, ИС – источник смещения, Т – тумблер для переключения режимов работы: положение «1» - фотогальванический режим, положение «2» - фотодиодный режим.

Приемник излучения с p-i-n диодом работает только в фотогальваническом режиме, в качестве нагрузки используется резистор R_н = 1,5 кОм.

Для регистрации импульсов, используется цифровой осциллограф APS230, на вход которого подается сигнал с исследуемого фотодиода. С помощью программы «APS230 Screen Capture V1.0», можно передавать осциллограммы на компьютер для дальнейшей обработки и хранения. Питается осциллограф от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Для дальнейшей обработки и хранения результатов, используется персональный компьютер, на котором установлена программа «APS230 Screen Capture V1.0» и который соединен с осциллографом через порт USB2.

При включении питания, источник излучения (ПЛ) генерирует непрерывное лазерное излучение на длине волны $\lambda = 650 \pm 5$ нм, которое попадает на входное окно исследуемого приемника излучения (ФД). Напряжение, пропорциональное интенсивности излучения ПЛ, с сопротивления нагрузки ФД подается на вход осциллографа, на экране которого отклонение луча развертки от первоначального положения пропорционально величине напряжения сигнала на выходе фотодиода.

При включении ГС, модулирующее напряжение, имеющее форму меандра, подается на TTL вход управления излучением ПЛ (разъем на корпусе блока ИИ), который переходит в квазиимпульсный режим работы. Изменяя частоту следования модулирующих импульсов от 1 до 100 кГц, на экране осциллографа можно наблюдать на выходе ФД отклонение формы импульса от прямоугольной, в первую очередь за счет увеличения длительности заднего фронта ($\tau_{зф}$) импульса.

За граничную частоту сигнала, который детектируется приемником излучения без искажений, принимается такая частота сигнала, при которой длительность заднего фронта импульса на выходе приемника излучения не превышает половины длительности импульса ($\tau_{зф} \leq 0,5\tau_{и}$).

В процессе выполнения лабораторной работы устанавливаются на стенд приемники излучения с фотодиодами разного типа и, изменяя частоту следования модулирующих импульсов, определяют граничную частоту для каждого приемника излучения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Исследование частотных характеристик р-п диода при различных режимах работы

а) Фотогальванический режим

1. Собрать установку для выполнения лабораторной работы согласно блок-схеме на рис.4. Фотоприемник подключить к входу «1» осциллографа.
2. Включить ПЛ и отрегулировать положение луча.
3. Установить ПИ с р-п диодом на оптическую ось с ПЛ, включить тумблер Т в положение «1».
4. Включить генератор сигналов специальной формы ГС, установить частоту следования модулирующих импульсов $F_m=1$ кГц, амплитуду импульсов $U_m=2$ В.
5. Включить осциллограф, нажать на панели управления осциллографа клавишу «**Autorange**» (функция авто-установки). Осциллограф автоматически настроит чувствительность и скорость развертки. С помощью клавиш «**▲, ▼**» установить точное значение чувствительности входа, удобное для наблюдения сигнала на экране осциллографа, например $U_{вх} = \langle 0,1V/div \rangle$ (0,1В/деление), клавишами «**◀, ▶**» установить точное значение скорости развертки, удобное для наблюдения сигнала на экране осциллографа, например $V_p = \langle 50 \mu s/div \rangle$ (50 мкс/деление).
6. Включить компьютер и создать три папки для записи результатов измерений:
 - Папка №1 – «р-п диод, фотогальванический режим»;
 - Папка №2 – «р-п диод, фотодиодный режим»;
 - Папка №3 – «р-і-п диод, фотогальванический режим».

Для дальнейшей обработки и хранения осциллограмм, осциллограф соединить с компьютером, нажав на панели управления осциллографа клавишу «Connect».

7. Для отправки осциллограммы с экрана осциллографа на компьютер, нажать на осциллографе клавишу «Hold/Run» (фиксирование осциллограммы), а затем клавишу «Send».
 - а. Изображение, полученное на экране монитора, сохранить в отдельную папку, нажав на клавишу «Save Image». Имя осциллограммы должно соответствовать частоте следования импульса (например: «10 кГц.bmp») (*название папки должно соответствовать исследуемому фотодиоду и режиму его включения*).
8. По полученной осциллограмме определить длительность (в делениях шкалы) заднего фронта импульса ($\tau_{зф}$), затем пересчитать ее во временное значение по формуле (5):

$$\tau_{зф} = \tau_{зф}[\text{деление}] \cdot V_p \quad (5)$$

результат занести в таблицу 1.

9. Для каждой частоты модуляции F_m , кГц, рассчитать длительность модулирующего импульса $\tau_{и}$ по формуле (6):

$$\tau_{и} = 0,5T_M = 0,5(1/F_m) \quad (6)$$

Результат занести в таблицу 1.

10. Повторить п.п. 4 – 9 для частот 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 и 100 кГц, увеличивая на осциллографе скорость развертки.
11. Результат занести в таблицу 1.

Таблица 1. Данные для определения длительности заднего фронта импульса на выходе приемника излучения с р-п диодом при изменении частоты следования модулирующих импульсов.

F_m , кГц	1	5	10	15	20	40	60	80	100
$\tau_{зф}$									
$\tau_{и}$									
Δ , %									

б) Фотодиодный режим

Для перевода р-п диода в фотодиодный режим работы переключить тумблер Т приемника излучения в положение «2» и выполнить п.п.4 - 9. для частот 1 – 100 кГц.

Результат занести в таблицу 2.

Таблица 2. Данные для определения длительности заднего фронта импульса на выходе приемника излучения с р-п диодом при изменении частоты следования модулирующих импульсов.

F_m , кГц	1	5	10	15	20	40	60	80	100
$\tau_{зф}$									
τ_n									
Δ , %									

Исследование частотных характеристик р-і-п диода

1. Установить ПИ с р-і-п диодом на оптическую ось с ПЛ, отрегулировать положение луча и выполнить п.п.4 - 9 для частот 1 – 100 кГц.
Результат занести в таблицу 3.
2. Выключить осциллограф, генератор сигналов, полупроводниковый лазерный модуль и компьютер.
3. Данные показать преподавателю.

Таблица 3. Данные для определения длительности заднего фронта импульса на выходе приемника излучения с р-і-п диодом при изменении частоты следования модулирующих импульсов.

F_m , кГц	1	5	10	15	20	40	60	80	100
$\tau_{зф}$									
τ_n									
Δ , %									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблиц 1, 2, 3, для каждой частоты модуляции F_m определить отношение длительности заднего фронта импульса к длительности импульса (Δ , %) по формуле

$$\Delta = (\tau_{зф} / \tau_{и}) \cdot 100 \quad (7).$$

Результаты занести в таблицы 1, 2, 3.

3. На основании данных таблиц 1, 2, 3 построить графики зависимости Δ от F_m .

4. По полученным графикам сравнить быстродействие р-п диода при включении его в фотогальванический и фотодиодном режиме работы. Сравнить быстродействие р-і-п- и р-п диодов. Сделать выводы.

Типичный вид зависимости Δ от F_m для различных схем включения р-п фотодиода и для р-і-п фотодиода представлен на рис.6.

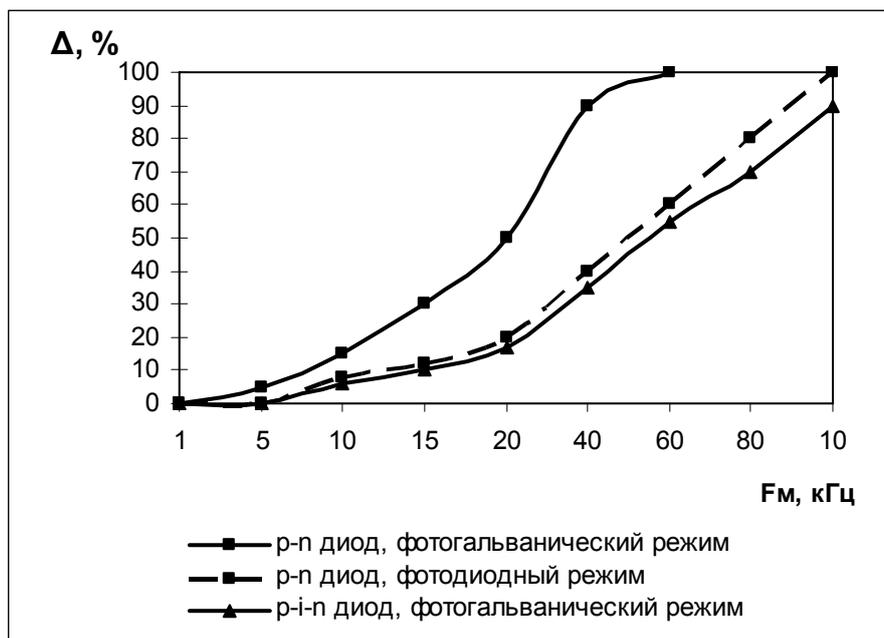


Рис.6. Типичный вид зависимости Δ от F_m для приемников излучения на основе р-п и р-і-п диодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П., Пал Б.П. «Волоконная оптика и приборостроение», Издательство «Машиностроение», 1987, с.226-232.
2. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. «Оптика и связь», Издательство Москва «Мир», 1984, с.333-339.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. «Полупроводниковые приборы», Издательство «Лань», 2006, с. 384-385.
4. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шишков А.Д. «Полупроводниковые приборы», Издательство «Высшая школа», 1973, с. 273-275.
5. Фриман Р. «Волоконно-оптические системы связи», Москва, Издательство «Техносфера» с. 121-130.

Литература к разделу «Источники и приемники оптического излучения на основе полупроводников»

1. В. Г. Беспалов, В. Н. Крылов, В. Н. Михайлов. «Основы оптоинформатики. Раздел I», СПб: СПбГУ ИТМО, 2008 г.
2. В. А. Гуртов. «Твердотельная электроника», М., Техносфера, 2005 г.
3. О. Н. Ермаков. «Прикладная оптоэлектроника», М., Техносфера, 2004 г.
4. В. И. Дудкин, Л. Н. Пахомов. «Квантовая электроника. Приборы и их применение», М., Техносфера, 2006 г.
5. Ю. А. Быстров. «Оптоэлектронные приборы и устройства», М., Радио Софт 2001г.
6. Р. Фриман. «Волоконно-оптические системы связи», М., Техносфера, 2004 г.
7. Э. Розенштер, Б. Винтер. «Оптоэлектроника», М., Техносфера, 2004 г.
8. М. Шур. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М., Мир, 1992 г.
9. П. Ю, М. Кардона. «Основы физики полупроводников», М., ФИЗМАТЛИТ, 2002 г.
10. О. Звелто. «Принципы лазеров», М., Мир, 1990 г.
11. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. А. М. Прохоров. М., СЭ, 1998г.
12. М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Оробинский, Б. П. Пал. «Волоконная оптика и приборостроение», Машиностроение, 1987, с.226-232.
13. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М., «Оптика и связь», М., Мир, 1984, с.333-339.
14. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. «Полупроводниковые приборы», Лань, 2006, с. 384-385.
15. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шишков А.Д. «Полупроводниковые приборы», Высшая школа, 1973, с. 273-275.

Термины к разделу «Источники и приемники оптического излучения на основе полупроводников»

Активная среда (активное вещество) – вещество, в котором осуществлена инверсия населённости, в результате чего может быть получено усиление электромагнитных волн, в отличие от обычной “пассивной” среды, поглощающей электромагнитные волны.

Акцептор – примесный атом в полупроводнике, который может захватить электрон из валентной зоны, что эквивалентно появлению в ней дырки.

Валентная зона полупроводника – энергетическая область разрешённых электронных состояний, полностью заполненная при абсолютном нуле температуры.

Гетероструктура – полупроводниковая структура из разных кристаллов, в отличие от гомогенной полупроводниковой структуры, образованной монокристаллом.

Донор – примесный атом в полупроводнике, ионизация которого (в результате теплового движения или внешнего воздействия) приводит к появлению электрона в зоне проводимости.

Запрещённая зона полупроводника – область значений энергии, которые не могут иметь электроны в идеальном кристалле, т. е. энергетическая щель между валентной зоной и зоной проводимости.

Зона проводимости полупроводника – энергетическая область разрешённых электронных состояний, частично заполненная или пустая (при абсолютном нуле температуры).

Зонная теория твёрдых тел – квантовая теория энергетического спектра электронов в кристалле, согласно которой этот спектр состоит из чередующихся зон (полос) разрешённых и запрещённых энергии.

Когерентность – согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких колебаний. Колебания называются когерентными, если разность их фаз остаётся постоянной во времени.

Когерентность света – взаимная согласованность протекания во времени световых колебаний в разных точках пространства и (или) времени, характеризующая их способность к интерференции.

Монохроматическое излучение – электромагнитное излучение одной определённой и строго постоянной частоты.

Обратное смещение - приложение внешнего электрического поля к р–п переходу, когда плюс прикладывается к n-области, а минус – к р-области.

Полупроводники – вещества, удельная электропроводность которых меньше удельной электропроводности металлов, но больше удельной электропроводности диэлектриков.

Полупроводники n-типа (электронные) – полупроводники, содержащие примеси донорного типа.

Полупроводники p-типа (дырочные) – полупроводники, содержащие примеси акцепторного типа.

Полупроводниковый лазер – лазер, активной средой которого является полупроводниковый кристалл.

Примесная проводимость полупроводника – электропроводность, обусловленная электронами и дырками примесных атомов.

Прямое смещение – приложение внешнего электрического поля к р–п переходу, когда плюс прикладывается к р-области, а минус – к n-области.

Собственная проводимость полупроводника – электропроводность, обусловленная собственными электронами и дырками атомов данного вещества.

Собственные полупроводники (полупроводники i- типа) – беспримесные полупроводники.

Уровень Ферми - последний заполненный энергетический уровень при $T=0$. В собственном полупроводнике он располагается посередине запрещённой зоны, в полупроводнике n-типа - ближе к зоне проводимости, а в полупроводнике p-типа – ближе к валентной зоне.

Фотодиод – полупроводниковый фотоэлектрический селективный приёмник оптического излучения, обладающий односторонней фотопроводимостью.

Электронно-дырочный переход (р–п переход) – область полупроводника, в которой имеет место пространственное изменение типа проводимости от электронной (n-типа) к дырочной (p-типа).

Передача информации

Введение к разделу «Передача информации»

Для передачи световой информации широко используются устройства, получившие название световодов. Из этого многообразия устройств выделяются два типа: одножильный световод, называемый оптическим волокном (оптоволоком), представляющий собой тонкую сердцевину (от нескольких микрон до сотен микрон) и окружающую ее оболочку и многожильные световоды, представляющие собой "спеченое" в один жгут множество одножильных световодов - волокон или пучков световодов. Световые жгуты могут содержать десятки тысяч волокон.

Одножильные световоды используются для передачи кодированной информации в средствах связи. Многожильные - для передачи изображения из труднодоступных мест, для преобразования формы светового пятна, для исправления кривизны поля и дисторсии изображения в широкоугольных объективах, для зашифровки передаваемого изображения.

Работа световодов основана на явлении полного внутреннего отражения, которое возникает, если излучение из оптически более плотной среды с показателем преломления n_1 попадает в оптически менее плотную с показателем преломления $n_2 < n_1$ (см. рис.1в).

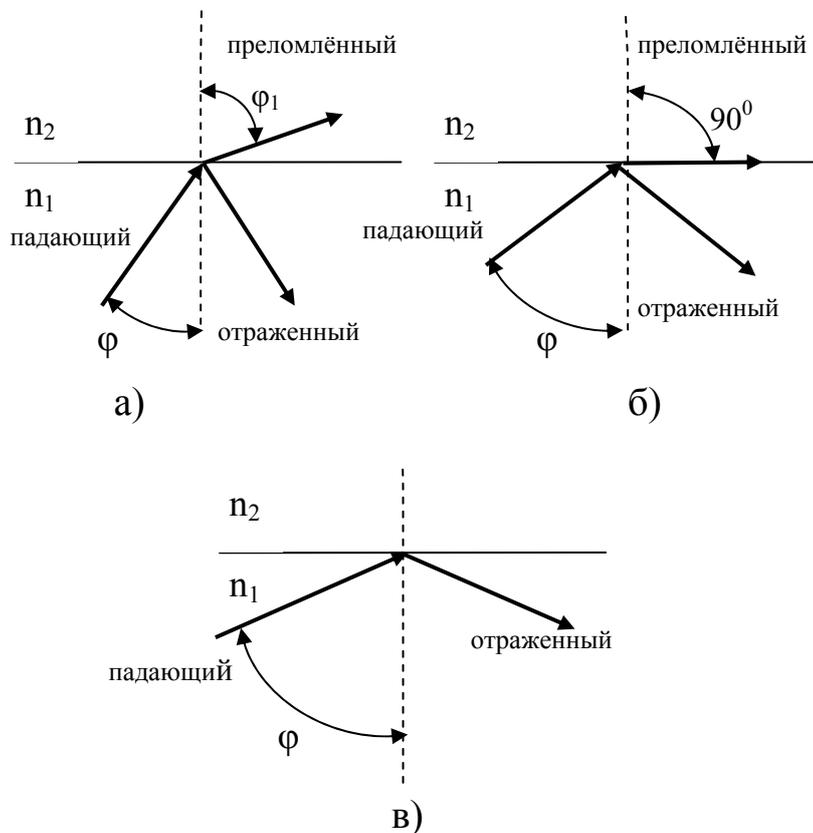


Рис.1. Варианты прохождения света через границу двух сред. ($n_1 > n_2$)

При падении света на границу двух сред, часть света проходит во вторую среду, отклоняясь от нормали к границе сред на угол φ_1 ($\text{Sin}\varphi_1 = (n_1 \cdot \text{Sin}\varphi) / n_2$), а часть отражается от границы под углом, равным углу падения φ (см. рис.1а). Если угол падения φ увеличивать, то наступит ситуация, при которой преломлённый свет будет распространяться вдоль границы ($\varphi_1 = 90^\circ$). В этом случае свет во вторую среду выходить не будет (см. рис.1б). Соответствующий угол падения называется предельным (критическим) и определяется из выражения $\text{Sin}\varphi_{\text{кр}} = n_2 / n_1$. Для сред стекло-воздух этот угол составляет порядка $34^\circ - 44^\circ$. Для волоконно-оптических систем разница в показателях преломления сердцевины и оболочки составляет порядка 0,01, что приводит к критическим углам большим 80° . При дальнейшем увеличении угла падения φ весь падающий свет будет отражаться от границы и оставаться в первой среде (см. рис.1в). На этом свойстве полного внутреннего отражения света основана работа всех волоконно-оптических систем.

На рис.2 показан ход лучей в оптическом волокне, состоящем из сердцевины и оболочки, с нарушением полного внутреннего отражения (луч I) и без нарушения (луч II). Показатели преломления сердцевины и оболочки - n_c и $n_{об}$ соответственно, причем $n_c > n_{об}$. (Преломлением лучей на торцах волокна в данном рассмотрении пренебрегаем.)

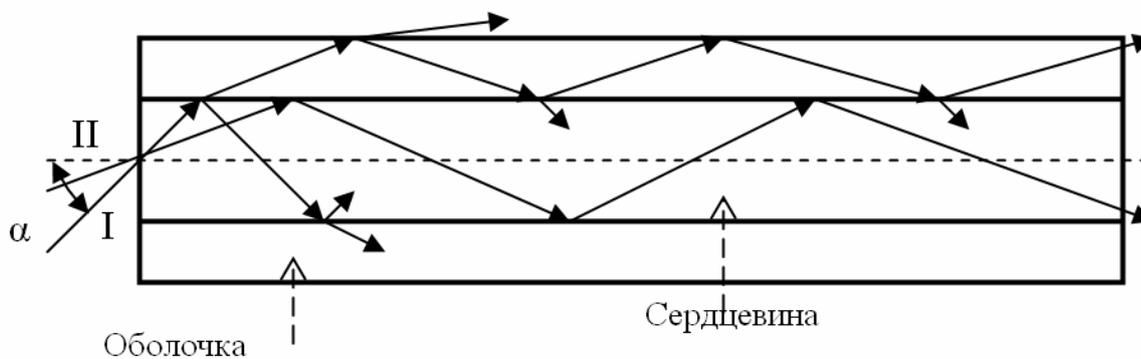


Рис.2. Ход лучей в оптическом волокне: луч I не испытывает полного внутреннего отражения; луч II испытывает полное внутреннее отражение.

При нарушении полного внутреннего отражения на границе сердцевина – оболочка (луч I на рис.2), свет из сердцевины входит в оболочку, часть его может покинуть волокно, часть снова войти в сердцевину, т.е. свет распространится по всему объему волокна, уменьшая при этом энергию сигнала на выходе волокна. Если нет нарушения полного внутреннего

отражения (луч II на рис.2), весь свет при его распространении к выходному торцу волокна остается в сердцевине.

В световом жгуте каждое волокно работает самостоятельно, как одножильное волокно.

В практическом применении светового жгута и волокна существуют определенные отличия. Жгут используется для передачи информации на малые расстояния (несколько метров), волокно - при передаче информации на очень большие (тысячи километров). Это обстоятельство предъявляет более высокие требования к характеристикам одножильного волокна, по сравнению со жгутом.

Одним из главных параметров, характеризующих работу световодов, являются потери света. Они определяются по формуле

$$\delta = - 10 \lg \tau \quad (1),$$

где τ - коэффициент пропускания светового потока световодом.

Для волокна пропускание определяется для участка длиной в один км. Единица измерения пропускания для жгута - децибел (дБ), для волокна - децибел на км (дБ/км).

Потери обусловлены технологией изготовления волокна (рассеянием света на микронеоднородностях стекла, используемого для изготовления волокна, поглощением света примесями в составе стекла), технологией монтажа (потери на изгибах, френелевские потери, потери на стыках волокна). Для жгута существенный вклад в потери вносит укладка волокон в процессе его изготовления. Для работы оптоволокон на большие расстояния используется свет с длиной волны 1,55 мкм, при которой суммарное действие рассеяния и поглощения света в волокне минимально. На практике сейчас используется волокно с потерями порядка 0,2 дБ/км и разработано - до 0,02 дБ/км.

При достаточно больших углах падения луча света на входной торец световода (угол α на рис.2) нарушается полное внутреннее отражение на границе сердцевина - оболочка. Максимальное значение угла α , при котором лучи света остаются в сердцевине (сохраняется полное внутреннее отражение), называется номинальным (критическим) апертурным углом $\alpha_{кр}$. Величина $NA = n_0 \sin \alpha_{кр}$, где n_0 - показатель преломления среды, из которой свет входит в световод, называется номинальной числовой апертурой. Эта величина характеризует эффективность ввода световой энергии в световод, т.е. чем больше критический угол (соответственно NA), тем больше энергии можно ввести в сердцевину световода и которая останется в ней за счет выполнения условия полного внутреннего отражения. Значения числовой апертуры важно учитывать при стыковке различных волокон. Если эти значения имеют разную величину, то на стыках возникают потери света.

Для волоконно-оптических систем важна скорость передачи данных. Т.к. передача ведется в импульсном режиме, то важно, чтобы импульс сохранил свою форму, а главное, свою длительность до выхода из волокна. С ростом длительности импульса надо увеличивать расстояние между ними, а это приводит к падению скорости передачи. Импульс обладает определенным частотным спектром, и чем полнее волокно передает частоты этого спектра, тем в большей мере импульс сохраняет свои параметры. Стекло, из которого изготавливается волокно, обладает материальной дисперсией (хроматической дисперсией), т.е. имеет разный показатель преломления для разных длин волн или, другими словами, разную скорость света для разных длин волн. Это явление приводит к тому, что разные составляющие спектра импульса приходят к выходу волокна в разное время, чем меняют форму импульса и увеличивают его длительность. К такому же эффекту приводит межмодовая дисперсия.

Если в сердцевину волокна вводится под некоторым углом плоская волна, то в сердцевине из-за переотражений от границы сердцевина-оболочка образуется суперпозиция (сумма) волн. В результате сложения волн они могут погасить друг друга, т.е. волна, вошедшая в волокно под определенным углом, не будет в нем распространяться. На выходе волокна будет темно. Таким образом, в волокне могут распространяться только определенные волны, которые носят название собственных мод. Порядок моды увеличивается с увеличением угла входа в волокно. Каждая мода (волна) входит в волокно под своим углом и падает на границу сердцевина-оболочка также под своим углом. Чем меньше этот угол, тем больший путь проходит волна в волокне. Наименьший путь пройдет волна, идущая вдоль оси волокна. Таким образом, введенный в волокно импульс света распространяется по волокну в виде набора мод (волн), которые проходят разные расстояния и приходят на выход в разные моменты времени. Форма импульса искажается и его длительность возрастает. Это явление называется межмодовой дисперсией. Для оценки способности волокна передавать импульс, введена характеристика – полоса пропускания. Эта характеристика из-за зависимости от длины волокна носит относительный характер и измеряется в МГц · км. Длительность импульса и ширина его спектра связаны друг с другом обратнопропорциональной зависимостью: чем уже импульс, тем шире его спектр. Если волокно не пропустит весь спектр импульса, его длительность на выходе увеличится. Поэтому, введя для волокна параметр – полосу частот, можно с его помощью оценить скорость передачи импульсной информации.

Раздел экспериментального практикума «Передача информации» включает две лабораторные работы, посвященные исследованию параметров одножильного волокна и светового жгута.

Волоконно-оптический световод как среда передачи информации

Цель работы: Знакомство с моделью волоконно-оптической системы передачи, основными ее элементами и основными характеристиками волоконно-оптической линии связи на примере многомодового одножильного волокна.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с основными элементами и принципами работы волоконно-оптических систем передачи информации.
2. Определить геометрические параметры исследуемого оптоволокна.
3. Исследовать влияние макроизгиба оптоволокна на величину потерь при прохождении излучения по волоконно-оптической линии связи.
4. Определить минимальный радиус макроизгиба оптоволокна, допустимый при заданной величине потерь в линии связи.

В данной лабораторной работе исследуется работа оптического волокна, и все дальнейшее описание будет посвящено ему.

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) играют определяющую роль в современной связи и демонстрируют высокий уровень внедрения оптических технологий в цифровые сети связи. Оптическое волокно и волоконная оптическая техника – основа ВОСП, первое – как среда для оптической цифровой передачи, вторая – как набор средств, дающих возможность осуществления такой передачи.

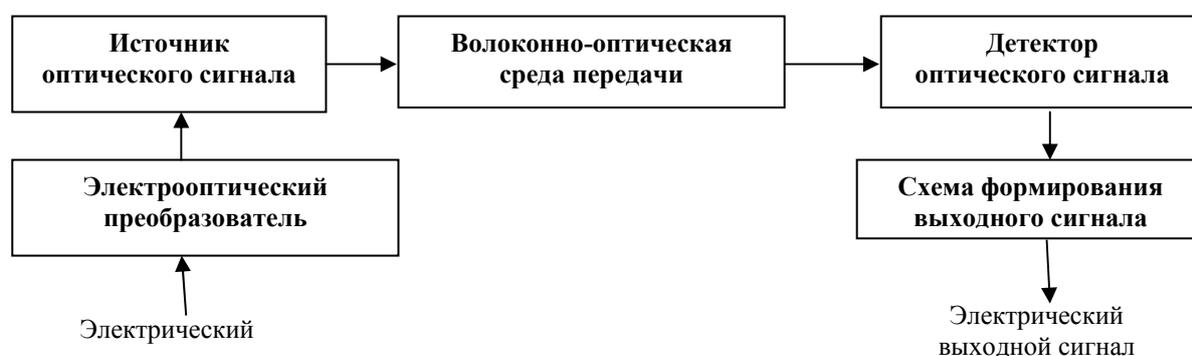


Рис.1. Модель волоконно-оптической системы передачи.

При рассмотрении упрощенной модели волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), представленной на рис.1, можно выделить три основных элемента, обуславливающие ее функционирование: источник сигнала (излучения), волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) и детектор излучения.

Основой волоконно-оптических линий связи является оптическое волокно (ОВ). Типичная конструкция оптического волокна представлена на рис.2. ОВ состоит из сердцевины с показателем преломления n_c , окружающей ее оболочки с показателем преломления $n_{об}$ и дополнительного внешнего покрытия, которое представляет собой защитную оболочку ОВ (буфер). Буфер защищает оптоволокно и оболочку от повреждений при прокладке и монтаже волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и от прямого контакта с окружающей средой.

При выполнении условия $n_c > n_{об}$ такая структура ведет себя как волновод за счет полного внутреннего отражения лучей на границе сердцевина-оболочка.

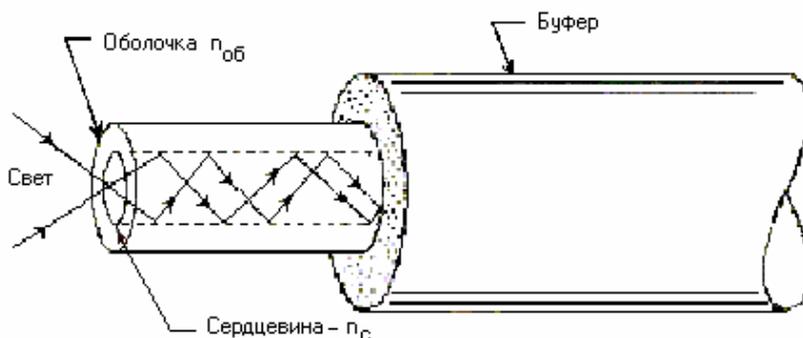


Рис.2. Устройство оптического волокна

Кварцевое стекло (SiO_2) является основным материалом для изготовления как сердцевины, так и оболочки. Для изменения и подгонки нужных значений показателя преломления данной модификации кварцевого стекла используют легирующие примеси, такие как бор или германий.

Различают оптические волокна одномодовые и многомодовые.

Одномодовое волокно (SMF – Single Mode Fiber), как правило, имеет диаметр световедущей жилы порядка единиц мкм, что сравнимо с длиной волны передаваемого излучения и обуславливает минимальное затухание сигнала и минимальную дисперсию.

Многомодовое оптоволокно (MMF – Multi Mode Fiber) имеет диаметр сердцевины в несколько десятков мкм и предназначено для распространения по нему излучения сложного модового состава.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) с многомодовым оптоволокном обладают значительной дисперсией, ограничивающей их длину.

Многомодовое волокно может иметь сердцевину с постоянным по сечению значением показателя преломления (ступенчатый профиль волокна), или с изменяющимся значением показателя преломления - от максимального в центре, до минимального на краю сердцевины (градиентный профиль волокна) - (см. рис.3). Волокно с градиентным профилем имеет большую полосу пропускания, чем со ступенчатым. Это объясняется тем, что моды более высокого порядка проходят области сердцевины с меньшим показателем преломления, а моды низкого порядка, проходящие вблизи оси волокна, области с более высоким показателем преломления. Тем самым выравниваются оптические пути для мод низких и высоких порядков, и выравнивается время прохождения волокна для разных мод излучения, что обуславливает неизменность длительности импульса при его распространении по волокну .

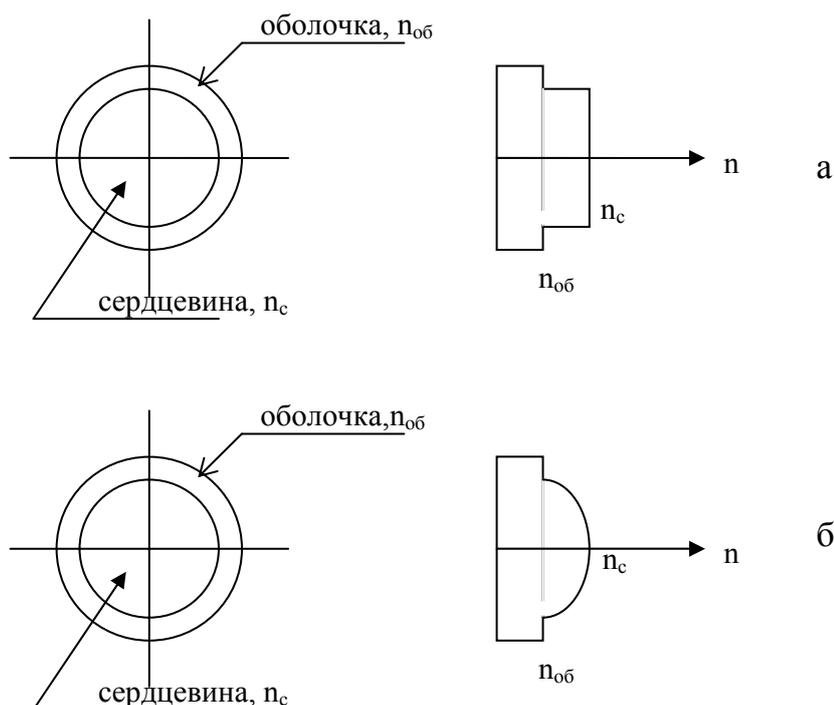


Рис.3. Типы многомодового волокна: а - волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, б - волокно с градиентным профилем показателя преломления.

Если сердцевина волокна имеет поперечные размеры сравнимые с длиной волны, то в таком волокне будет распространяться только одна мода, идущая вдоль оси. Такие одномодовые волокна обладают

наибольшей полосой пропускания (порядка 30 ТГц). Условием распространения в волокне одной моды является следующее выражение

$$\frac{2\pi R_c (n_c^2 - n_{об}^2)^{\frac{1}{2}}}{\lambda} < 2.405 \quad (1),$$

где R_c - радиус сердцевины, λ - длина волны.

Из приведенного выше выражения видно, что для разных длин волн одно и то же волокно может быть одномодовым или многомодовым.

Для увеличения пропускной способности ВОЛС отдельные оптоволоконные объединяют в волоконно-оптический кабель (ВОК), который может состоять из более чем 10 оптоволокон. Такие кабели могут иметь длину в несколько километров и используются для магистральных участков ВОЛС. При прокладке ВОЛС внутри зданий и сооружений используют ВОК, содержащие более 100 как одномодовых, так и многомодовых оптоволокон.

На качество передачи оптической информации большое влияние оказывает качество изготовления ОВ и геометрия прокладки кабелей ВОЛС. В частности, большое значение имеют параметры ВОЛС, которые определяются микро и макроизгибами ОВ (см. рис.4). Микроизгибы вызваны несовершенством волокна и приводят к увеличению потерь в ВОЛС, которые могут быть достаточно велики. Основная причина таких потерь кроется в процессе производства оптоволоконного кабеля. Потери от микроизгибов являются функцией диаметра поля моды, конструкции кабеля и его исполнения.

При изгибе оптоволоконного кабеля, к которому приходится прибегать при прокладке оптоволоконного кабеля, например, в производственных помещениях, приходится говорить о макроизгибах. Макроизгибы соотносят с некоторым определенным радиусом изгиба ОВ. В этом случае к указанным выше потерям добавляются потери, связанные с нарушением условия полного внутреннего отражения при распространении излучения в сердцевине и выходом излучения через оболочку оптоволоконного кабеля. Как правило, производитель кабеля указывает в спецификации минимальный радиус изгиба кабеля, при котором не происходит нарушений полного внутреннего отражения в ОВ. Кабель состоит из ряда ОВ и минимально допустимый радиус изгиба кабеля определяется также и числом волокон. Когда кабель намотан на катушку, то он сгибается по диаметру катушки. Если он прокладывается в зданиях, то он должен сгибаться на углах. Сгибаемый ВОК сильнее, чем это допускается ограничениями на радиус изгиба, можно повредить кабель и волокно, что может вызвать существенное увеличение потерь в ВОЛС.

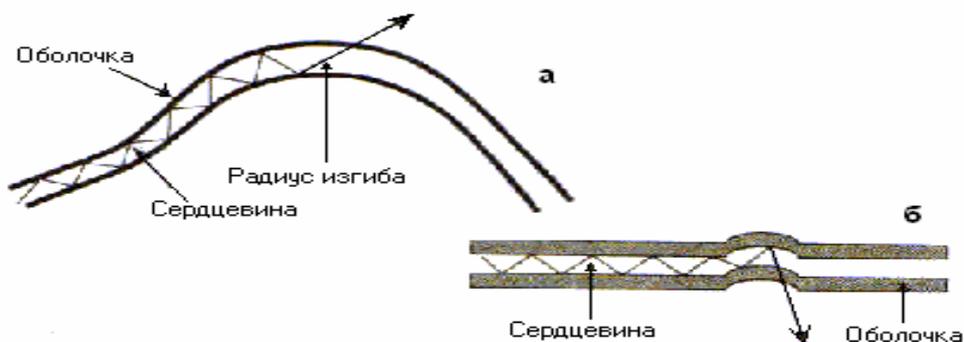


Рис.4.Варианты изгиба оптоволокна: а – макроизгиб, б – микроизгиб.

Выполняемая работа посвящена исследованию влияния радиуса изгиба оптоволокна на величину потерь в ВОЛС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис.5, собрана на платформе и включает следующие узлы и элементы.

1. Узел источника излучения (ИИ) состоит из оптического тестера VF-65-BU2S или лазерного модуля KLM ($\lambda = 650 \pm 5$ нм), сопряженного с входным торцом волокна. Лазерный луч определяет оптическую ось экспериментального стенда.
2. Волокно. (Одномодовое оптоволокно 9.5/125 мкм в буферном покрытии \varnothing 0.9 мм с оптическими коннекторами типа SC, многомодовое волокно MMF, или другой тип волокна – уточнить у преподавателя) .
3. Фиксаторы положения оптоволокна (левый и правый).
4. Устройство изгиба оптоволокна (УИ) – набор дисков переменного диаметра от 12 мм до 60 мм для создания петли волокна.
5. Приемник излучения, сопряженный с выходным торцом волокна. Используется кремниевый фотодиод ФД-24К в фотогальваническом режиме.
6. Измерительный прибор (V) – мультиметр типа UNI-T (рекомендуется проводить эксперименты в режиме измерения тока).

При измерении габаритных размеров различных элементов необходимо использовать штангенциркуль.

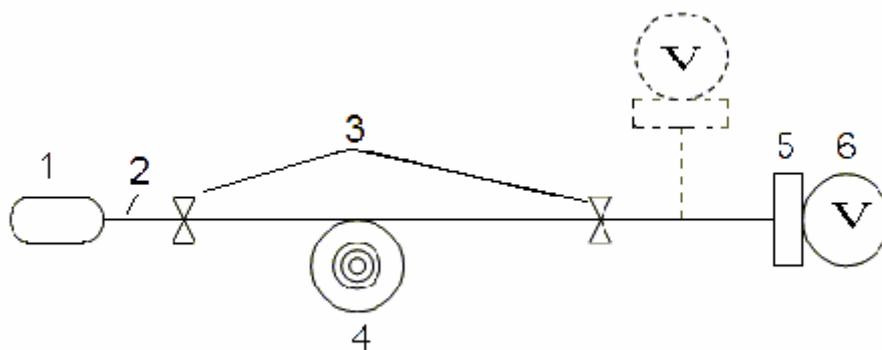


Рис.5.Блок-схема экспериментальной установки. 1 – источник излучения; 2 – волокно; 3 – фиксаторы положения волокна; 4 – устройство изгиба волокна; 5 – приемник излучения; 6 – измерительный прибор.

При проведении измерений необходимо создать петлю из ОВ определенного радиуса изгиба, который определяется диаметром используемого диска устройства изгиба ($D_{\text{диска}}$). При этом участок ОВ между источником излучения (1) и левым фиксатором (3-Л) закреплен неподвижно, и изменять положение стопорного винта фиксатора 3-Л не следует. При проведении измерений сигнала на выходе ОВ, имеющего определенный радиус изгиба, участок ОВ между двумя фиксаторами не должен иметь других изгибов кроме петли на устройстве изгиба. При работе на установке, в которой приемник излучения расположен не на оси системы (рис.5 – пунктир), следует проследить, чтобы изгиб ОВ, который может оказаться между правым фиксатором и приемником излучения (5), имел максимально большой радиус (существенно превосходящий используемый в работе максимальный радиус устройства изгиба).

В таблицу 1 заносятся экспериментальные данные каждого опыта, проведенного с петлями волокна разного диаметра. Измерения диаметра диска проводятся 3 раза (графа 2 таблицы 1 – измеряемые величины), среднее значение заносится в графу 4 таблицы 1 (расчетные величины).

При отсутствии макроизгибов, когда волокно между фиксаторами представляет собой прямую линию, прохождение сигнала осуществляется с минимальными потерями. Ослабление сигнала за счет наличия изгиба волокна (радиус изгиба - $R_{\text{изг}}$) следует рассматривать по отношению к сигналу, который прошел по прямому волокну ($R_{\text{изг}} = \infty$). Величина сигнала считывается со шкалы цифрового измерительного прибора (6).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить наружный диаметр оптоволокна штангенциркулем в нескольких точках и вычислить его среднее значение ($D_{ОВ}$).
2. Включить источник излучения. Оптический тестер VF-65-BU2S включается нажатием кнопки на торце тестера.
3. Включить измерительный прибор (шкала измерения тока – А).
4. Провести измерения сигнала при прямом положении ОВ между фиксаторами. Результаты занести в таблицу 1 (столбец 3).
5. Провести измерения сигнала при различном диаметре петли ОВ.
 - Измерить диаметр используемого диска – $D_{диск}$; результаты трех измерений занести в таблицу 1 (столбец 2).
 - Расфиксировать ОВ, ослабив стопорный винт правого фиксатора (3-П). Сделать петлю из ОВ и надеть ее на соответствующий диск. Подтянуть ОВ до плотного охватывания диска и зафиксировать стопорным винтом правого фиксатора.
 - Измерить сигнал, результат занести в таблицу 1 (столбец 3).
 - Измерения провести для 8 – 12 различных дисков – по указанию преподавателя.
6. Для контроля стабильности источника излучения во время проведения эксперимента провести измерения сигнала в прямом положении ОВ (см. пункт 4). Данные занести в последнюю строчку таблицы.

Таблица 1. Параметры ВОЛС при изменении радиуса изгиба волокна.

	Экспериментальные данные			Расчетные величины		
	$D_{диск}$, мм	I , мкА	$\langle D_{диск} \rangle$	Радиус макроизгиба ОВ ($R_{изг}$), мм	Относительное пропускание, τ , %	Ослабление сигнала, δ , дБ
1	2	3	4	5	6	7
1	∞					
2						
3						
...						
...						

Средний диаметр волокна - $\langle D_{ОВ} \rangle =$.

Величина сигнала при прямом положении волокна - $I_{\infty} =$.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам трех измерений диаметра определить средний диаметр используемого волокна $\langle D_{ОВ} \rangle$.
2. Для каждого значения $D_{диск.}$ (кроме $D_{диск.} = \infty$) рассчитать радиус изгиба волокна по нижеприведенной формуле, учитывая, что радиус изгиба определяется расстоянием от центра изгиба до оси волокна

$$R_{Изг} = \frac{(D_{диск.} + D_{ОВ})}{2} \quad (2).$$

Данные занести в графу 5 таблицы 1.

3. Определить среднее значение I при $D_{диск.} = \infty$, которое в дальнейшем будем обозначать как I_{∞} .
4. Вычислить относительное изменение пропускания исследуемого участка ВОЛС по формуле

$$\tau = \frac{U_i}{U_{\infty}} \times 100\% \quad (3).$$

Заполнить графу 6 таблицы 1.

5. Вычислить ослабление сигнала δ в дБ, используя следующую формулу

$$\delta = 10 \times \lg \frac{U_{\infty}}{U_i} \quad (4).$$

Заполнить графу 7 таблицы 1.

6. Построить график зависимости относительного пропускания исследуемого участка оптоволокна от радиуса его однократного макроизгиба.
7. Построить график зависимости ослабления сигнала на исследуемом участке ВОЛС от радиуса однократного изгиба волокна.
8. Определить минимальный радиус однократного изгиба волокна, допустимый при заданной величине потерь. Величина потерь может быть указана преподавателем как минимальное ослабление сигнала в дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи, Техносфера, Москва, 2003
2. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. Syrus systems, 2001
3. Вайнберг В.Б. Саттаров Д.И. Оптика световодов, Л., Машиностроение, 1977.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство оптического волокна.
2. На каком физическом явлении основана работа оптического волокна?
3. Основные типы оптоволокна и их основные параметры.
4. Чем обусловлены потери в оптоволокне?
5. Единицы измерения затухания (потерь) и дисперсии в многомодовом и одномодовом волокнах.

Исследование характеристик светового жгута

Цель работы: Знакомство с принципом работы светового жгута и его характеристиками.

Задачи, решаемые в работе

1. Измерить пропускание светового жгута, определить общие потери при распространении излучения по световому жгуту и построить индикатрису его пропускания.
2. Определить частотно-контрастную характеристику светового жгута.
3. Оценить параметры светового жгута: апертурный угол и разрешение в изображении, которое может быть передано по данному жгуту.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Световые жгуты изготавливаются из пучков одиночных световодов (волокон), которые протягиваются через специальную печь, где они обжимаются и спекаются друг с другом. При этом важно сохранить на входе и выходе жгута порядок укладки торцов световодов, иначе, при передаче изображения появляются искажения. Полученный жгут можно сложить с другими жгутами и провести аналогичную операцию еще раз. Такие действия можно повторять неоднократно, получая жгуты, состоящие из десятков тысяч волокон.

Существует способ изготовления световых жгутов, который заключается в намотке на барабан определенным образом одиночного волокна или “спеченного” пучка волокон. Затем следует разрезка намотанного рулона и склейка или сварка полученных после разрезки торцов, которые далее полируются. Отметим, что жгуты, полученные из пучков волокон, обладают в 2-3 раза большим разрешением, чем жгуты, полученные из отдельных волокон.

Световые жгуты имеют разный вид укладки волокна: примеры некоторых видов приведены на рис.1. Следует отметить, что плотность укладки волокон в этих трех случаях разная.

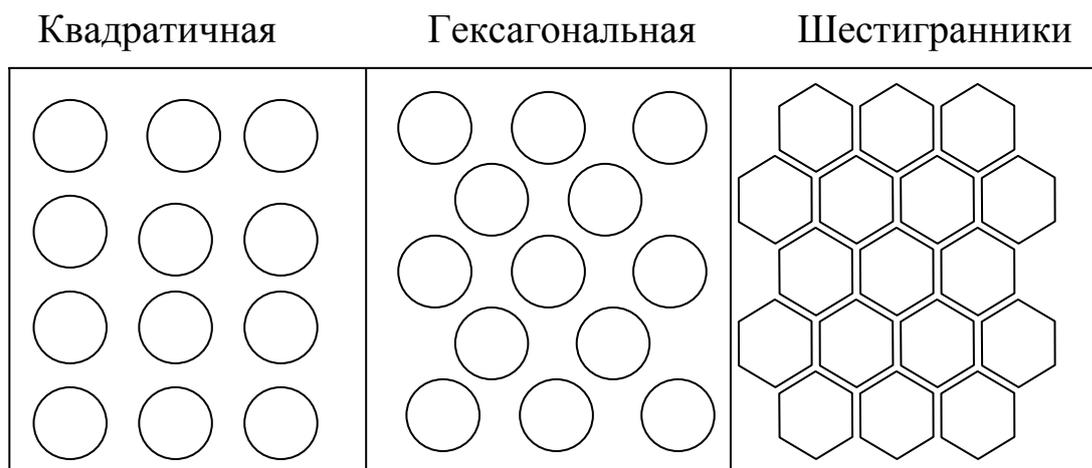


Рис.1.Виды укладок волокна в жгуте.

При характеристике световодов используют следующие основные параметры.

1. Коэффициент пропускания светового потока (τ) – отношение вышедшего из световода потока излучения к потоку, вошедшему в его торец.
2. Потери светового жгута (δ), измеряемые в децибеллах (см. формулы во введении). Коэффициент пропускания и потери светового жгута зависят от угла наклона (α) луча, падающего на торец жгута (см. рис.2 во введении). Для лучей, распространяющихся по оси световода ($\alpha = 0$), τ – максимально, δ – минимально; с увеличением угла уменьшается коэффициент пропускания и растут потери. Потери света в световодах включают концевые потери на торцах световода и линейные потери внутри световода. Концевые потери обусловлены потерями на отражение света от торцевых поверхностей на входном и выходном концах жгута (так называемые, Френелевские потери) и способом заполнения его волокнами. Коэффициент пропускания для концевых потерь определяется по формуле

$$\tau_{\text{кон}} = (1 - \rho_{\text{вх}})(1 - \rho_{\text{вых}}) \tau_{\text{зап}} \quad (1),$$

где $\rho_{\text{вх}}$; $\rho_{\text{вых}}$ - коэффициенты отражения от поверхностей торцов, $\tau_{\text{зап}} = S_{\text{св}}/S$ - коэффициент заполнения, $S_{\text{св}}$ - общая площадь сечения волокон, S - площадь сечения жгута.

Френелевские потери зависят от показателя преломления материала световода, от углов падения лучей на торец, от поляризации входящего в световод света. Линейные потери световода

обусловлены потерями, связанными с поглощением света материалом световода, рассеянием света, нарушением полного внутреннего отражения при прохождении света по световоду. Линейные потери существенно возрастают при углах наклона лучей больших номинального апертурного угла. Поглощение материала световода зависит от длины волны излучения.

3. Индикатриса пропускания светового жгута, характеризующая изменение коэффициента пропускания τ от угла α . Геометрически индикатриса пропускания представляет собой конус, образованный лучами, прошедшими через жгут.
4. Числовая апертура $NA = \text{Sin}\alpha$, где α - апертурный угол (угол наклона образующей конуса лучей, падающих на торец, к оси световода). Максимальное значение угла α , соответствующее лучам, прошедшим световод без нарушения полного внутреннего отражения, называется номинальным апертурным углом - α_0 . Величина $NA_0 = \text{Sin}\alpha_0$ называется номинальной числовой апертурой. Номинальная числовая апертура может быть больше 1, если лучи входят в жгут не из воздуха, а из какой либо среды с показателем преломления $n > 1$ ($NA_0 = n \text{Sin}\alpha_0$).
5. Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) представляет собой зависимость коэффициента передачи контраста изображения миры, переданного по жгуту, от частоты штрихов миры (измеряемой числом штрихов на 1мм). Мира представляет собой исследуемый тест-объект (см.раздел «Термины»). Контраст в изображении элемента миры, переданного по оптической системе (жгуту), определяется по формуле

$$K = (I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}) / (I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}) = I_A / I_{\text{CP}} \quad (2),$$

где I_{MAX} , I_{MIN} - максимальное и минимальное значение интенсивности излучения в изображении миры; I_A - амплитуда модуляции излучения; I_{CP} - среднее значение интенсивности излучения, прошедшего тест-объект (см. рис.2).

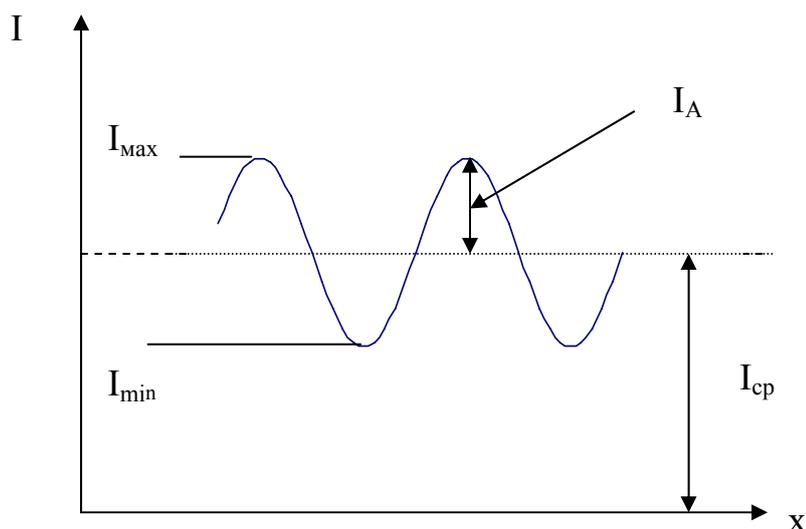


Рис.2. Распределение интенсивности в изображении элемента миры с синусоидальным профилем штриха.

На рис.2 показано распределение интенсивности излучения в изображении элемента миры в направлении перпендикулярном штрихам миры. Коэффициент передачи контраста T рассчитывается по формуле

$$T = K_{\text{вых}} / K_{\text{вх}} \quad (3),$$

где $K_{\text{вых}}$ и $K_{\text{вх}}$ - контраст в изображении элемента миры на выходном и входном торцах световода.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) определяет разрешение светового жгута, на величину которого влияют различные дефекты в волокнах, рассеяние на неоднородностях, переход света в соседние волокна, а также сильное влияние на ЧКХ оказывает мозаичность изображения, обусловленное дискретностью сечения жгута, так как свет передается отдельными волокнами. Очевидно, чем меньше диаметр волокна, тем с большим разрешением передается изображение по жгуту.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент состоит из двух частей. В первой части необходимо измерить потери светового жгута и построить индикатрису светопропускания. Блок-схема установки для проведения эксперимента приведена на рис.3.

В эксперименте в качестве источника излучения (ИИ) используется полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 650 нм. Диафрагма (Д) ограничивает сечение лазерного пучка до размеров входного торца жгута. Торцев жгута может поворачиваться вокруг вертикальной оси, что позволяет менять угол падения лучей, входящих в жгут. Интенсивность

входящего в жгут и выходящего из него излучения измеряется приемником излучения (ПИ).

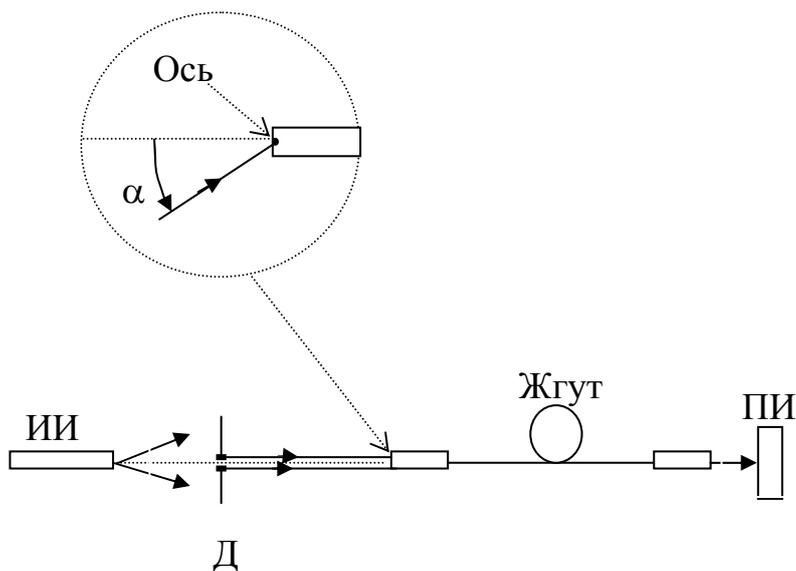


Рис.3. Оптическая схема установки для измерения пропускания светового жгута. ИИ – источник излучения, Д – диафрагма, ПИ – приемник излучения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Измерение индикатрисы пропускания светового жгута

1. Измерить интенсивность падающего на торец жгута излучения при $\alpha = 0$.
2. Зарегистрировать зависимость интенсивности вышедшего из жгута излучения от угла α (α – угол между осью световода и падающим на его торец лучом). Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1. Данные для построения индикатрисы пропускания светового жгута.

$I_0 =$		
α град	$I\alpha$ мкА	$\tau = I\alpha / I_0$

Определение частотно-контрастной характеристики светового жгута

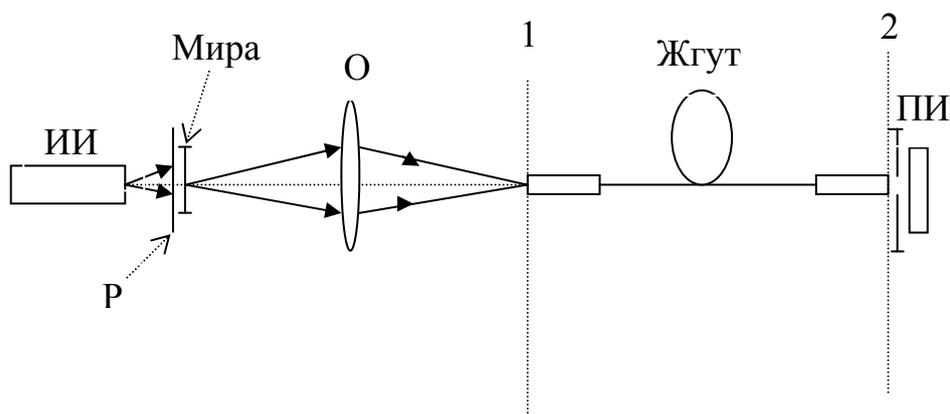


Рис.4. Оптическая схема установки для исследования частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) светового жгута: 1 – плоскость входного торца жгута, 2 – плоскость выходного торца жгута. ИИ – источник излучения, Р – рассеиватель (матовое стекло), О – объектив (оптическая система), ПИ – приемник излучения.

Лазерный пучок распространяется вдоль оптической оси системы, на которой установлены рассеиватель (матовое стекло) и элемент мира, содержащий набор штрихов определенной частоты. Изображение элемента мира, установленного на оптической оси, строится объективом О в плоскости входного торца жгута. Изображение, сформированное на входном торце, передается на выходной торец. Качество изображения на выходе жгута определяется его параметрами.

Матовое стекло и мира представляют собой единый узел, который может перемещаться по горизонтали перпендикулярно оптической оси

установки. В работе используется штриховая мира, штрихи которой имеют прямоугольный профиль (см. рис.5).

Распределение интенсивности в изображении элемента миры измеряется приемником излучения (ПИ) с измерительной щелью. Для более точного измерения контраста в изображении миры ширина измерительной щели должна быть в несколько раз меньше периода штрихов данного элемента миры.

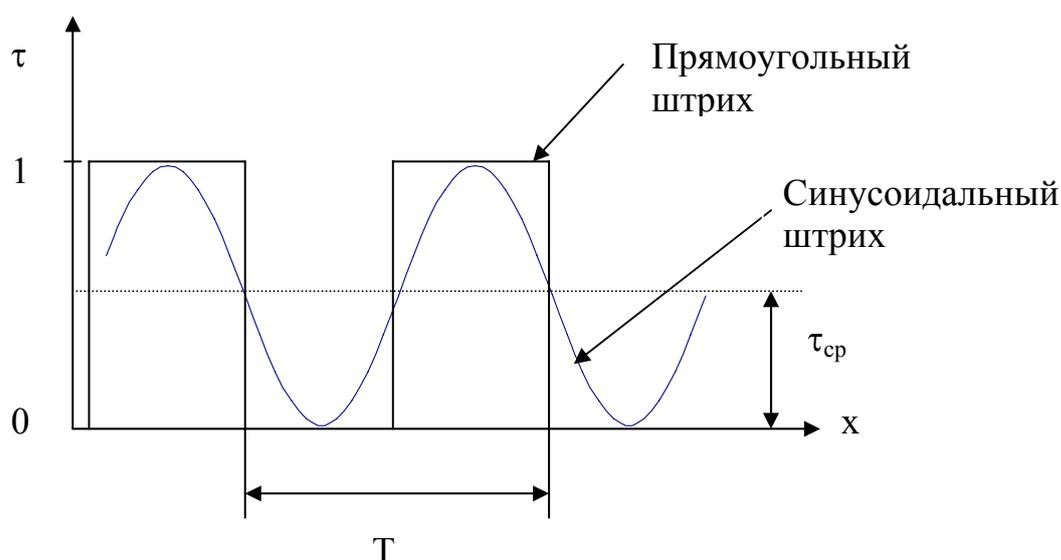


Рис.5.Пропускание элемента миры с прямоугольным и синусоидальным профилем штрихов.

Для определения частотно-контрастной характеристики светового жгута необходимо измерить \max и \min значения тока измерительного прибора приемника излучения, которые пропорциональны \max и \min значениям интенсивности в изображении штрихов миры.

1. Для этого в лазерный пучок устанавливается участок миры с наименьшей частотой штрихов
2. Для трех соседних штрихов, сдвигая узел миры по горизонтали, измеряется \max и \min значение интенсивности в изображении этих штрихов. Измерения необходимо проводить на входе жгута (в плоскости 1) и на выходе (в плоскости 2).
3. Далее в лазерный пучок необходимо установить участок миры с большей частотой штрихов (сдвигом узла миры по горизонтали) и повторить измерения по п.2.
4. Аналогичные действия проделать для всего набора пространственных частот миры, рекомендуемых преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу 2. Рекомендуется провести все измерения сначала для плоскости 1, потом для плоскости 2.

Таблица 2. Экспериментальные данные для построения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) светового жгута.

№	Частота штрихов на входном торце жгута, мм	$I_{\max}^{\text{ВХ}}$, мка	$I_{\min}^{\text{ВХ}}$, мка	$K_{\text{ВХ}}$	$I_{\max}^{\text{ВЫХ}}$, мка	$I_{\min}^{\text{ВЫХ}}$, мка	$K_{\text{ВЫХ}}$	$T_{\text{пр}}$	T^{\sim}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
средн.									
1									
2									
3									
средн.									
1									
2									
3									

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Используя данные измерений, полученных на первом этапе эксперимента, необходимо рассчитать с помощью формулы (1), приведенной во введении, общие потери жгута в децибеллах. Расчет производится при угле падения лучей на входной торец $\alpha = 0$.
2. Используя данные, записанные в таблице 1 построить индикатрису пропускания светового жгута.
3. По построенной кривой определить номинальный апертурный угол α_0 , для которого еще сохраняются условия полного внутреннего отражения лучей при прохождении жгута, и по формуле $NA_0 = \text{Sin } \alpha_0$ рассчитать номинальную числовую апертуру. Номинальный апертурный угол определяется по значению угла α , при котором наблюдается резкое уменьшение пропускания.
4. По данным таблицы 2 вычислить среднее значение $I_{\max}^{\text{ВХ}}$, $I_{\min}^{\text{ВХ}}$, $I_{\max}^{\text{ВЫХ}}$, $I_{\min}^{\text{ВЫХ}}$.
5. По полученным данным определить по формуле (2) контраст входного и выходного изображений.

6. Рассчитать по формуле (3) коэффициент передачи контраста. Все рассчитанные значения занести в соответствующие графы таблицы 2.
7. Используя данные таблицы 2 построить ЧКХ жгута (зависимость $T^{пр}$ от частоты штрихов).

Следует отметить, что все измерения интенсивности проводились на изображении миры с прямоугольными штрихами, пропускание которой можно разложить в ряд Фурье, представляющий собой сумму синусоидальных компонент разной частоты. По формуле (4) можно пересчитать ЧКХ прямоугольной миры в ЧКХ синусоидальной

$$\tilde{T}_v = 0,25 \pi (T^{пр}_v + T^{пр}_{3v} + T^{пр}_{5v} + \dots) \quad (4),$$

где \tilde{T}_v - точка на графике ЧКХ синусоидальной миры для частоты v ; $T^{пр}_v; T^{пр}_{3v}; T^{пр}_{5v}$ - точки на графике ЧКХ прямоугольной миры для частот $v, 3v, 5v$ соответственно.

Полученные данные расчета записать в десятый столбец таблицы 2 и построить график, аналогичный $T^{пр}$. По полученному графику определить диапазон частот, который пропускается жгутом. Диапазон частот определяется по уровню 0,5.

Отчет должен содержать схему эксперимента; полностью заполненные таблицы (куда входят данные, полученные, как при измерениях, так и при расчетах); формулы, используемые при расчетах; образцы расчетов; графики и выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Могут ли контраст, ЧКХ, номинальная числовая апертура, полученные при исследовании светового жгута, быть больше 1?
2. При какой укладке волокон в жгуте (см. рис.1) его пропускание может быть наибольшим?
3. Какое количество волокон может содержать световой жгут и как количество волокон влияет на разрешение переданного по жгуту изображения?
4. Покажет ли мультиметр какое либо изменение тока приемника излучения при сдвиге щели (см. рис.4), если ширина измерительной щели будет равна периоду измеряемых штрихов?

Литература к разделу «Передача информации»

1. Р.Фриман. Волоконно-оптические системы связи, М., Техносфера, 2004. 496 с.
2. А.Б.Иванов. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М., Сайрус Системс, 1999. 658 с.
3. В.Б.Вайнберг, Д.И. Сатаров. Оптика световодов, Л., Машиностроение, 1977. 254 с.
4. Х.Фризер. Фотографическая регистрация информации., М., Мир, 1978. 672 с.
5. Фотоника. Словарь терминов, Новосибирск, СО РАН, 2004. 342 с.

Термины к разделу «Передача информации»

Волновод – устройство или материал, предназначенные для заключения внутри себя и направленного распространения электромагнитных волн в направлении, определяемыми их физическими границами.

Волновой вектор – вектор \mathbf{k} , определяющий направление распространения плоской монохроматической волны в изотропной среде. Модуль волнового вектора называется волновым числом $k = 2\pi/\lambda$, где λ – пространственный период или длина волны излучения.

Волновой фронт (волновая поверхность) – поверхность, во всех точках которой волна имеет в данный момент времени одинаковую фазу. Распространение волны происходит в направлении нормали к волновому фронту и может рассматриваться как движение волнового фронта через среду. В простейшем случае волновой фронт представляет плоскую поверхность, а соответствующая ему волна называется плоской. Существуют также сферические, цилиндрические и другие волновые фронты. Излучение точечного источника в изотропной среде имеет волновой фронт сферической формы.

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) – система связи, в которой информация передается по оптическому волокну или, иначе, линия оптической связи, в которой передача информации осуществляется с помощью волоконно-оптических элементов. Основные компоненты ВОЛС: оптический передатчик, приемный оптоэлектронный модуль, оптический повторитель, оптический усилитель и волоконно-оптический кабель. Большинство современных ВОЛС предназначено для передачи цифровых сигналов.

Волоконно-оптическая связь – оптическая лазерная связь с передачей информации по волоконно-оптической линии связи.

Волоконно-оптическая сеть – информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы технологии сети и общие вопросы построения сетей.

Волоконно-оптические элементы – оптические устройства, выполненные на основе волоконных световодов. К основным элементам

относятся волоконно-оптические жгуты, волоконно-оптические кабели, фоуоны, селфоки и волоконно-оптические пластины.

Волоконно-оптический жгут – пучок оптических волокон, скленных или спеченных у концов (гибкий волоконно-оптический жгут) либо по всей длине (жесткий волоконно-оптический жгут), защищенный непрозрачной оболочкой и имеющий торцы с отполированной поверхностью. Используется для передачи оптических изображений или света.

Волоконно-оптический кабель (ВОК) – кабель, состоящий из одного или нескольких свободно уложенных или скрученных по определенной системе оптических волокон, заключенных в общую защитную оболочку, и предназначенный для передачи («канализации») оптического излучения. Оптические кабели классифицируются по назначению, области применения, конструкции сердечника и типу защитной оболочки.

Диффузное рассеяние – рассеяние света по всем возможным направлениям (а также в соответствии с определенной индикатрисой рассеяния) при отражении или пропускании.

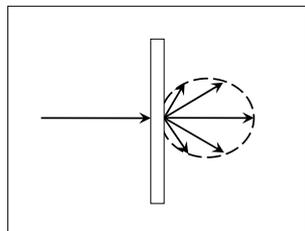
Диффузор (диффузный рассеиватель) – оптический элемент (например, матовый экран), обеспечивающий диффузное пропускание или диффузное отражение падающего излучения независимо от его направления (или в соответствии с индикатрисой рассеяния данного элемента, например, направленный диффузор).

Изображение действительное – изображение (оптическое), которое создается сходящимися пучками лучей в точках их пересечения. Если в плоскости пересечения лучей поместить экран (или регистрирующую среду), то можно на нем наблюдать действительное изображение.

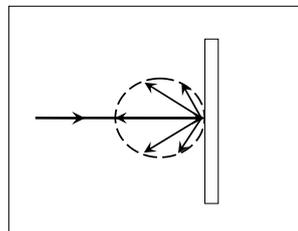
Индикатриса рассеяния – кривая, графически отображающая зависимость интенсивности рассеянного света от направления наблюдения.

Индикатриса рассеяния диффузного объекта

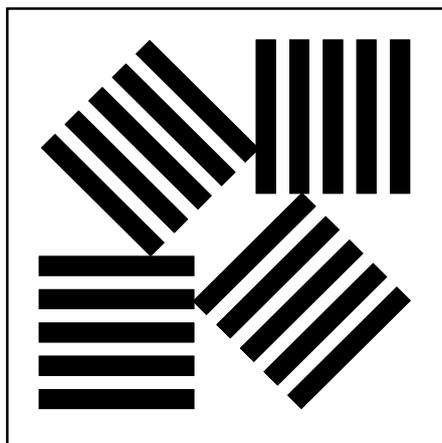
прозрачный объект



непрозрачный объект



Мира (тест-объект) – оптический элемент, предназначенный для определения характеристик качества изображения при исследовании оптических систем и светочувствительных материалов. Обычно представляет собой пластинку из прозрачного или непрозрачного материала, на которую нанесен геометрический рисунок. Элементами рисунка служат чередующиеся темные прямоугольные штрихи на светлом фоне с закономерно изменяющейся частотой (штриховые миры) или чередующиеся темные и светлые сектора (радиальные миры). Каждый из элементов штриховой миры состоит из четырех квадратов со штрихами одинаковой ширины, но ориентированных различным образом (см.рис.), что позволяет оценивать разрешающую способность в четырех направлениях. Радиальные миры выполняют в виде круга, разделенного на темные и светлые сектора с определенным угловым размером.



Элемент миры со штрихами одинаковой ширины.

Многомодовое волокно (многомодовый световод) – оптическое волокно с диаметром сердцевины, намного больше длины волны распространяющегося излучения, по которому на заданной частоте волны может распространяться несколько электромагнитных волн (мод) с разной пространственной конфигурацией. В свою очередь, это может быть ступенчатое или градиентное многомодовое волокно.

Моды в оптическом волокне – различные типы волн, которые могут распространяться по оптическому волокну и которые являются решением волновых уравнений Максвелла. По оптическому волокну распространяются только два типа волн: симметричные, у которых только одна продольная составляющая, и несимметричные (смешанные), у которых имеются две продольные составляющие.

Монохроматическое излучение – электромагнитное излучение одной, строго постоянной частоты. В более широком смысле слова – излучение очень узкой области частот или длин волн, которое может быть охарактеризовано одним значением частоты или длины волны. Происхождение термина связано с тем, что различие в частоте световых волн воспринимается человеком как различие в цвете. Однако, электромагнитные волны видимого диапазона, лежащие в интервале длин волн 380-760 нм, не отличаются от электромагнитных волн других диапазонов (инфракрасного излучения, ультрафиолетового излучения, рентгеновского излучения и др.), по отношению к которым также используется термин "монохроматический" (одноцветный), хотя никакого ощущения цвета эти волны не вызывают. Понятие "монохроматическое излучение" является идеализацией. Так как идеальным монохроматическое излучение не может быть по своей природе, то обычно монохроматическим считается излучение с узким спектральным интервалом, который можно приближенно характеризовать одной частотой (длиной волны). Чрезвычайно высокая монохроматичность характерна для излучения некоторых типов лазеров, у которых ширина спектрального интервала излучения не превышает 10^{-6} нм, что значительно уже, чем ширина линий атомных спектров. Приборы, с помощью которых из спектра реального излучения выделяют узкие спектральные интервалы, называются монохроматорами.

Одномодовое волокно (одномодовый волновод) - оптическое волокно, по которому распространяется только одна мода. Диаметр сердцевины одномодового волокна соизмерим с длиной волны и значительно меньше диаметра сердцевины многомодового волокна.

Оптическая длина пути – расстояние между двумя точками прозрачной среды, на которое свет (оптическое излучение) распространился бы в вакууме за то же время, за какое он проходит это расстояние в среде. Оптическая длина пути всегда больше реально пройденного светом расстояния и в изотропной среде с постоянным показателем преломления определяется произведением геометрической длины пути (l) и показателя преломления среды (n) – $l \cdot n$. Данное понятие играет большую роль в оптике, особенно в геометрической оптике и кристаллооптике, позволяя сопоставить пути, проходимые светом в средах, в которых скорости его распространения различны. Оптическая длина пути луча света между двумя произвольными точками пространства предметов и пространства изображений называется эйконалом.

Оптическая разность хода – разность оптических длин путей двух световых лучей, как правило, имеющих общие начальные и конечные точки. Данное понятие играет основную роль при описании явлений интерференции и дифракции излучения.

Оптический транспарант – тонкая пластинка, имеющая в разных точках плоскости различную прозрачность или величину показателя преломления. При прохождении плоской световой волны через транспарант создается амплитудная или фазовая модуляция сигнала, что позволяет применять такие транспаранты в системах оптической обработки информации. Примером оптического транспаранта является штриховая мира.

Оптическое волокно (волоконный световод, оптоволокно) – тонкое гибкое волокно (нить) цилиндрической формы из стекла (а также из кварца или пластмассы), по которому происходит передача электромагнитного излучения диапазона длин волн (10^{14} - 10^{15}) Гц.

Оптическое излучение – оптический диапазон электромагнитного излучения, включающий видимое излучение (свет), а также ультрафиолетовое и инфракрасное излучения. Диапазон частот оптического излучения принято определять в интервале ($3 \cdot 10^{11} \div 3 \cdot 10^{17}$) Гц.

Свет (видимое излучение) – электромагнитное излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение человека. Границы спектральной области видимого излучения условны и могут выбираться различными для разных применений. Нижняя граница обычно считается лежащей между 380 и 400 нм, верхняя – между 760 и 780 нм. Видимое

излучение содержит следующие основные составляющие с длинами волн: красную 760-620 нм, оранжевую 620-590 нм, желтую 590-560 нм, зеленую 560-500 нм, голубую 500-480 нм, синюю 480-450 нм и фиолетовую 450-400 нм. Более широкое толкование термина «свет» означает, что речь идет об оптическом излучении, которое включает ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, хотя непосредственно глазом они не воспринимаются.

Решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным для науки и техники (1973 г.) скорость света в вакууме принято считать равной 299 792 458 (12) м/с.

Светофильтр – устройство, меняющее спектральный состав оптического излучения с целью выделения его отдельных спектральных участков или согласования спектральных зависимостей излучения со спектральной зависимостью чувствительности приемников излучения. Действие светофильтров основано на использовании таких физических явлений как избирательное спектральное поглощение (абсорбционные светофильтры), избирательное отражение (отражательные светофильтры), интерференция (интерференционные светофильтры), поляризация (поляризационные светофильтры), дисперсия (дисперсионные светофильтры). Нейтральные светофильтры равномерно ослабляют световой поток в относительно широкой области спектра. Основная характеристика светофильтра – кривая относительного пропускания, или иначе, зависимость коэффициента пропускания τ (или оптической плотности $D = -\lg\tau$) от длины световой волны.

Типы оптических волокон - оптические волокна делятся на два основных типа: многомодовое волокно (MMF) и одномодовое волокно (SMF). Они отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления. При обозначении волокна указываются через дробь значения в микронах наружных диаметров сердцевины и оболочки. По профилю показателя преломления многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые и градиентные, а одномодовые – на ступенчатые и со специальным профилем.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), (функция передачи контраста, передаточная характеристика. Зависимость коэффициента передачи контраста от пространственной частоты, которая характеризует разрешающую способность передающей системы или устройства. ЧКХ светового жгута определяет способность светового жгута передавать детали объекта в передаваемом по жгуту изображении объекта.

Хранение информации

Элементы оптической памяти на основе мультиплексных голограмм

Цель работы: Знакомство с характеристиками объемных наложенных голограмм, предназначенных для использования в системах архивной оптической памяти, и условиями их получения.

Объект исследования: Образец объемной полимерной регистрирующей среды «Диффен», на одном участке которого произведена запись нескольких наложенных голограмм (3-5 голограмм) методом углового мультиплексирования.

Задачи, решаемые в работе:

1. Измерить зависимость интенсивности дифрагированного пучка от угла поворота образца-носителя относительно падающего пучка и определить контуры угловой селективности наложенных голограмм, зарегистрированных на данном участке образца.
2. Определить основные параметры каждой из наложенных голограмм: дифракционную эффективность и угловую селективность.
3. Оценить увеличение информационной емкости единицы площади элемента оптической памяти (которым является образец-носитель) за счет использования наложенной записи голограмм.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Научно-технический прогресс мирового сообщества идет по пути быстрого и постоянно увеличивающегося роста потока информации. В связи с этим непрерывно растут требования к плотности хранения и скорости обработки данных. Одним из путей решения данной проблемы является привлечение оптических технологий.

В настоящее время в системах записи, хранения и воспроизведения информации широко используется так называемая оптическая память в форме дисков CD (compact disk), DVD (digital versatile disk), HD-DVD (high definition digital versatile disk) и Blu-ray Disc. Такая форма памяти позволяет записывать и хранить колоссальные объемы информации – до 100Гб и производить считывание со скоростью до 140 Мбит/с. На таких

дисках информация записывается и считывается лучом полупроводникового лазера, сфокусированным в световое пятно малого размера (порядка одного и даже менее микрона). При этом большая информационная емкость в каждом последующем типе оптических дисков достигается за счет использования более короткой длины волны света и многослойности самих носителей. О сегодняшних параметрах оптических дисков лет 10 назад можно было только мечтать, но перспектив дальнейшего значительного увеличения информационной емкости таких дисков не прогнозируется. Дальнейшие перспективы увеличения плотности записи информации ориентированы на использование и применение голографических методов в этой научно-технической области. В таблице 1 приведено сравнение характеристик различных типов оптических дисков, предназначенных для систем хранения информации.

Таблица 1. Сравнение характеристик различных типов дисков для систем хранения информации.

Тип оптического диска	Логотип	Емкость носителя	Скорость записи
компакт-диск		700 Мб	1,4 Мбит/с
DVD-диск		4,7-9,4 Гб	10 Мбит/с
оптические диски для видео высокой четкости		15-108 Гб	140 Мбит/с
голографический диск		200-4000 Гб	до 15 Гбит/с

Прогноз фирмы IBM относительно развития запоминающих устройств различных типов (см. рис.1) отводит на ближайшие 10-15 лет ведущее место в этой научно-технической области голографическим методам.

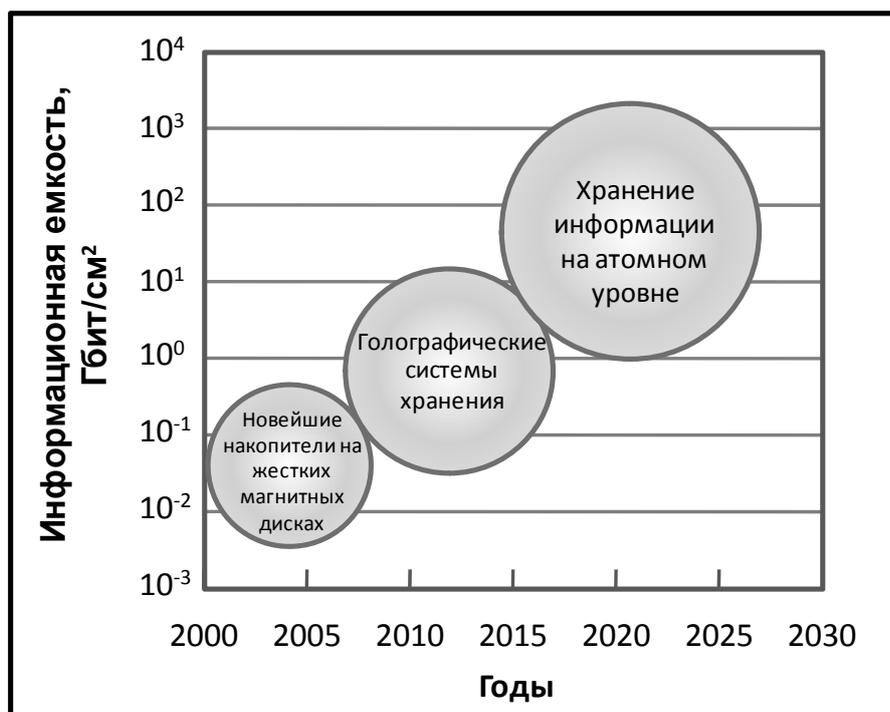


Рис.1. История и перспективы развития емкости запоминающих устройств (по данным IBM).

Научно-исследовательские компании всего мира в течение ряда лет уже ведут разработки в области оптической голографической памяти и многие из них рекламируют свои коммерческие разработки (см.рис.2).



Рис.2. Голографические системы хранения информации, предлагаемые разными фирмами-изготовителями.

InPhase Technologies (США), Optware (Япония), Dow Corning (США), NTT (Япония), IBM (США), Polight Technologies (Великобритания), Hitachi Maxwell (Япония) уже объявили о создании оптической памяти на голографических принципах с параметрами, существенно превышающими параметры существующих систем или конкурирующими с ними (см.рис.2).

Фирма InPhase Technologies совместно с фирмой Hitachi Maxwell в 2008 году приступила к продажам своей голографической системы Tapestry 300r, в состав которой входит однократно записываемый 130мм голографический диск емкостью 300 Гб. Хотя до сих пор до конца не решена проблема тиражирования дисков (технология штамповки с диска-оригинала миллионов идентичных копий пока не разработана), но производитель собирается в течение 3-4 лет довести емкость голографического диска до 1,6Тб (см.табл.2) и анонсирует перезаписываемые голографические диски.

Таблица 2. Прогноз увеличения емкости и скорости считывания голографического диска фирмы InPhase Technologies.

Год	Название системы хранения	Емкость диска для записи и чтения	Скорость считывания, Мбит/с
2008	Tapestry 300r	300Гб	240
2009-2010	Tapestry 800r	800Гб	640
2011-2012	Tapestry 1600r	1,6Тб	960

Большинство из предлагаемых решений голографической памяти пока могут быть использованы только для хранения архивных данных и не позволяют производить изменения записанной однажды информации. Тем не менее, такое ограничение не снижает перспективы использования голограмм для хранения обширных массивов данных, и именно использование принципов голографии будет способствовать значительному прорыву в области информационных технологий. Особенно это актуально в современных условиях, когда поиск нужной информации в большом объеме данных занимает много времени.

Идея создания голографической памяти была выдвинута еще в 1966-67гг. и тогда же частично реализована в виде лабораторных систем и устройств с использованием плоских носителей. Принципиальная схема устройства голографической памяти ЭВМ, опубликованная в журнале BSTJ в 1967г., где используется плоский носитель, приведена на рис.3а; принципиальная схема записи и считывания отдельной голограммы в

современных системах архивной голографической памяти на основе объемных наложенных голограмм приведена на рис.3б.

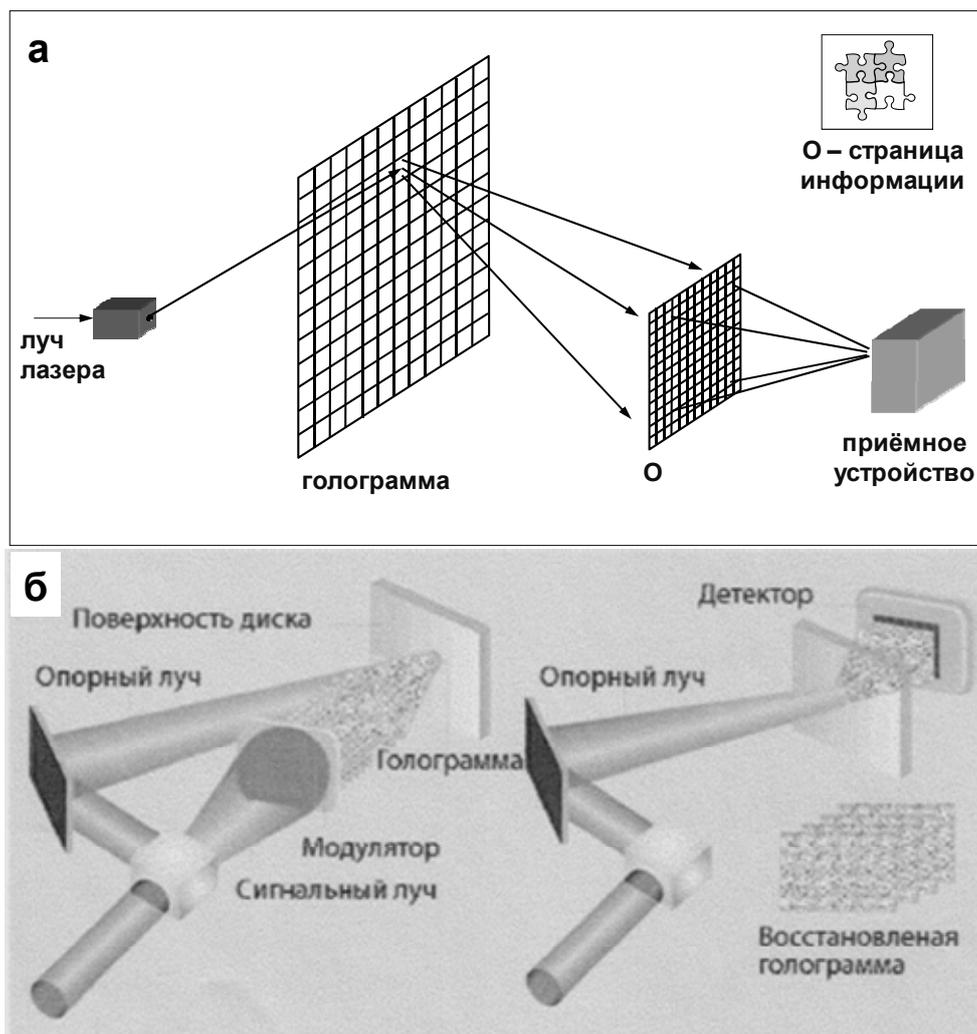


Рис.3.а – принципиальная схема устройства голографической памяти (1967 г. – плоский носитель-2D). б – запись и считывание голограммы в системах архивной памяти (2006 г. – объемный носитель - 3D).

Перспективность использования голографического метода для хранения и считывания информации обусловлена следующими специфическими особенностями, связанными с реализацией данного метода:

1. Возможность записи и хранения документов в аналоговом формате без предварительного кодирования.
2. Возможность параллельной записи и считывания больших объемов информации (не отдельных битов, а целых страниц).
3. Увеличение надежности и сохранности записанной информации за счет распределенной, а не локальной формы записи. Избыточность информации при голографической записи обеспечивает повышенную стойкость к локальным повреждениям носителя.

4. Снижение требований к электромеханическим системам управления и к их быстродействию за счет того, что ширина спиральных дорожек на голографических дисках в 10-100 раз больше, чем в существующих оптических дисках (запись происходит не побитово, а постранично).
5. Увеличение информационной емкости за счет использования постраничной, а не побитовой записи информации и за счет использования наложенной записи, то есть записи на отдельном локальном участке диска нескольких голограмм, каждая из которых может содержать значительный объем информации, например, страницу текста.

Полностью возможности и преимущества голографического метода при создании систем хранения информации могут быть реализованы только при использовании объемных голограмм и объемных регистрирующих сред в качестве носителя.

Несмотря на чрезвычайную важность всех компонент объемной (3D) голографической памяти (таких как, управляемые транспаранты, фотодиодные матрицы, дефлекторы света, фазовые маски, полупроводниковые лазеры и др.), проблема регистрирующей среды всегда определяла конечные результаты любого исследования и проекта в этом направлении. Успехи фирм – лидеров в области разработки и создания образцов такой современной техники определяются в первую очередь достижениями в создании регистрирующих сред для записи информации, которые должны обеспечивать необходимые технические параметры устройств.

По мнению специалистов при создании систем голографической памяти в настоящее время наиболее развитой и продвинутой является технология записи наложенных голограмм в объемных безусадочных полимерных материалах с толщиной 1-2 мм. Данная ситуация подготовлена усилиями ряда фирм и организаций. Разработанный в последние десятилетия XX-го века в Государственном Оптическом институте им. С.И.Вавилова принципиально новый полимерный регистрирующий материал для записи высокоэффективных объемных голограмм на основе органического красителя фенантренхинона также рассматривается специалистами в качестве рабочей среды для систем архивной голографической памяти, а его модификации, несомненно, являются прототипами ряда материалов, используемых современными исследователями. К таким модификациям относится материал «Диффен», образцы которого использованы в данной работе.

Принцип действия памяти при использовании технологии записи наложенных голограмм предусматривает работу с отдельными

информационными массивами в формате страниц $N \times N$ бит. Таким образом, технология записи наложенных голограмм является «странично-ориентированной»

Для создания элементов, имитирующих носитель информации для голографической памяти, в настоящей работе используются образцы регистрирующей среды «Диффен», толщиной порядка 1,5мм. На каждый рабочий участок образца записано несколько (от трех до десяти) голограмм-решеток методом углового мультиплексирования. Голограмма-решетка (элементарная голограмма) регистрируется при взаимодействии двух плоских волн. При создании реальных элементов производится запись голограммы более сложного объекта, например, одна из интерферирующих волн содержит информацию о странице текста. Но с помощью голограммы-решетки можно наиболее простым образом на практике продемонстрировать возможности объемных голограмм с наложенной записью осуществлять регистрацию больших объемов информации и независимое считывание фрагментов.

На рис.4 приведена оптическая схема установки для записи голограмм-решеток, которые используются в данной работе.

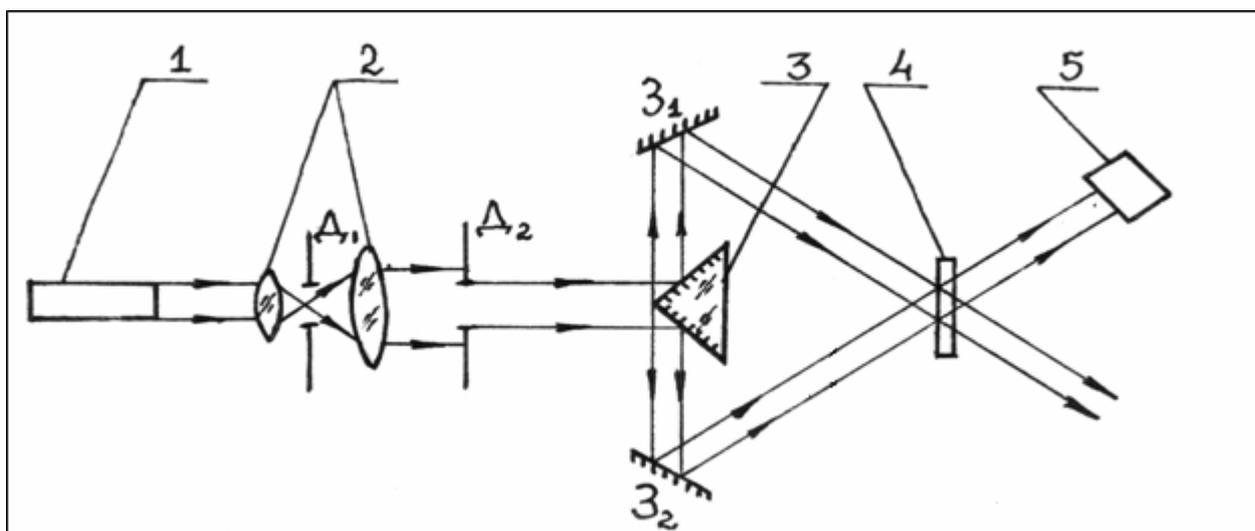


Рис.4.Схема записи пропускающих элементарных голограмм (голограмм-решеток): 1 – источник излучения; 2 – телескопическая система для расширения лазерного пучка; 3 – элемент для деления и поворота лазерного пучка (прямоугольная призма с алюминиевым покрытием); 4 – регистрирующая среда; 5 – приемник излучения; Δ_1 и Δ_2 – диафрагмы; $З_1$ и $З_2$ – зеркала.

Схема, поясняющая каким образом производится угловое мультиплексирование при получении наложенных голограмм в данной работе, приведена на рис.5.

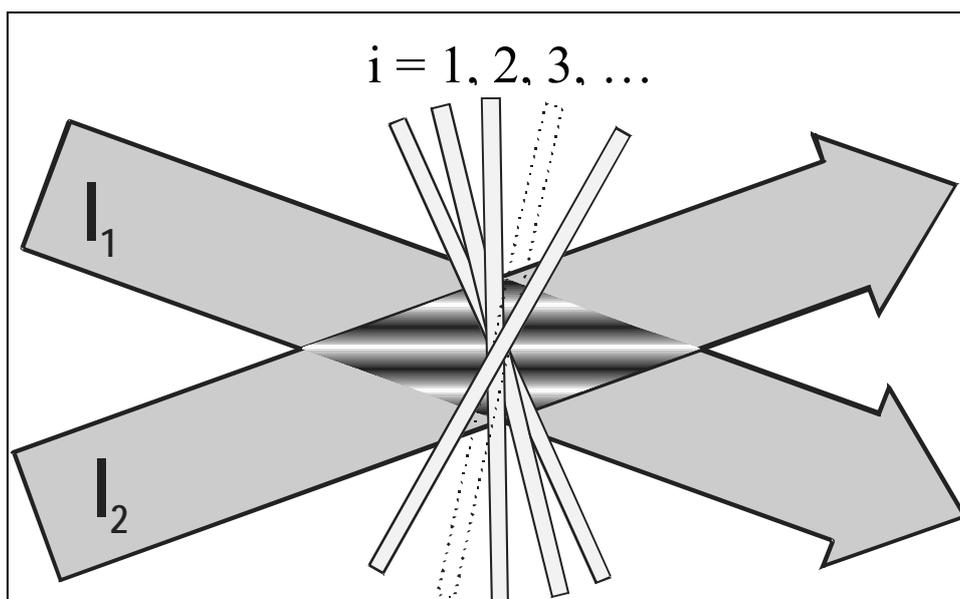


Рис.5. Принципиальная схема записи наложенных голограмм методом углового мультиплексирования. i – порядковый номер записи наложенной голограммы.

Голограммы №1; №2; №3 и т.д. записываются на один и тот же участок регистрирующей среды при различной ориентации образца-носителя относительно регистрируемой интерференционной картины. (На рисунке указан вариант, при котором для записи каждой последующей голограммы поворот образца-носителя производится по часовой стрелке.)

Возможность независимого считывания каждой из наложенных голограмм обусловлена таким свойством объемных голограмм как селективность. Селективность – свойство голограммы, связанное с уменьшением интенсивности дифрагированной (восстановленной) волны (I_D) при отклонении условий освещения голограммы от оптимальных, определяемых условием Брэгга. Селективностью обладают только трехмерные голограммы. Двумерные голограммы (как и традиционные плоские дифракционные решетки) неселективны. Различают спектральную селективность голограммы, связанную с изменением длины волны восстанавливающего излучения и угловую селективность, обусловленную изменением пространственного спектра восстанавливающей волны. Максимум интенсивности волны, дифрагированной на объемной элементарной голограмме, наблюдается при угле Брэгга (θ_{Br}) и длине волны Брэгга (λ_{Br}). При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{Br} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{Br} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны уменьшается (см. рис.6). В данной работе необходимо произвести измерения контура угловой селективности каждой из наложенных голограмм и определить ее угловую селективность - $\Delta\theta$, которая

количественно определяется интервалом углов падения плоской монохроматической восстанавливающей волны на голограмму, в пределах которого интенсивность дифрагированной волны превышает половину ее максимального значения (см.рис.6).

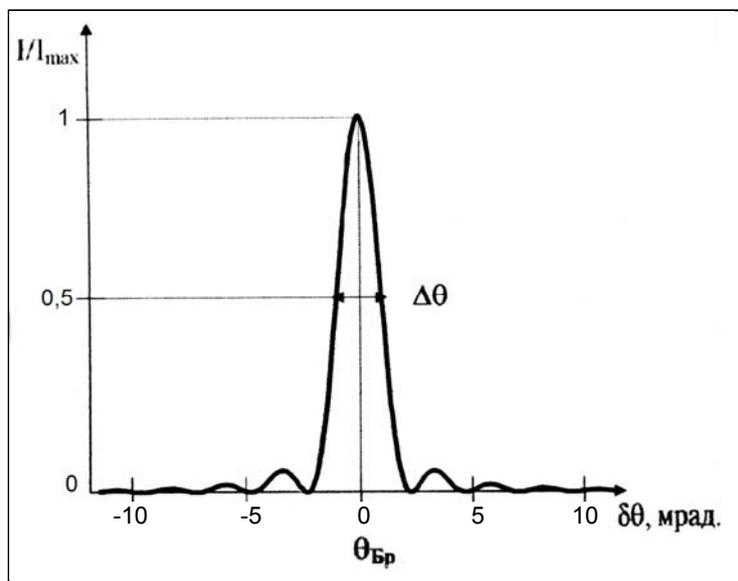


Рис.6.Изменение интенсивности дифрагированного излучения при отклонении от условий Брэгга при считывании голограммы монохроматическим излучением – контур угловой селективности голограммы (толщина голограммы порядка 1 мм). $\Delta\theta$ – угловая селективность голограммы.

Условие Брэгга определяет условие получения максимальной интенсивности дифрагированной волны при взаимодействии плоской волны с одномерной решеткой, зарегистрированной в объемной среде, и записывается следующим образом: $2d \sin \theta = k\lambda$ где d - постоянная решетки, θ - угол между направлением распространения волны и плоскостью решетки, λ - длина волны излучения, $k = 1,2,3\dots$ - порядок дифракции. Это соотношение, установленное для дифракции рентгеновских лучей на атомных плоскостях в кристалле, известно в физике как закон Вульфа-Брэгга - по имени Г.В.Вульфа и У.Л.Брэгга, одновременно и независимо получивших это выражение в 1913г.

В голографии условие Брэгга широко используется при рассмотрении дифракции излучения на объемной голограмме. При $k = 1$ условие Брэгга определяет для элементарной объемной голограммы условие образования главного максимума дифрагированной волны: выбор угла падения (θ_{Br}) задает длину волны (λ_{Br}) падающего на голограмму излучения, и наоборот. При отклонении от условий Брэгга ($\theta = \theta_{Br} \pm \delta\theta$ и $\lambda = \lambda_{Br} \pm \delta\lambda$) интенсивность дифрагированной волны падает (см.рис.6).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерения параметров мультиплексной голограммы используется установка, принципиальная оптическая схема которой приведена на рис.7.

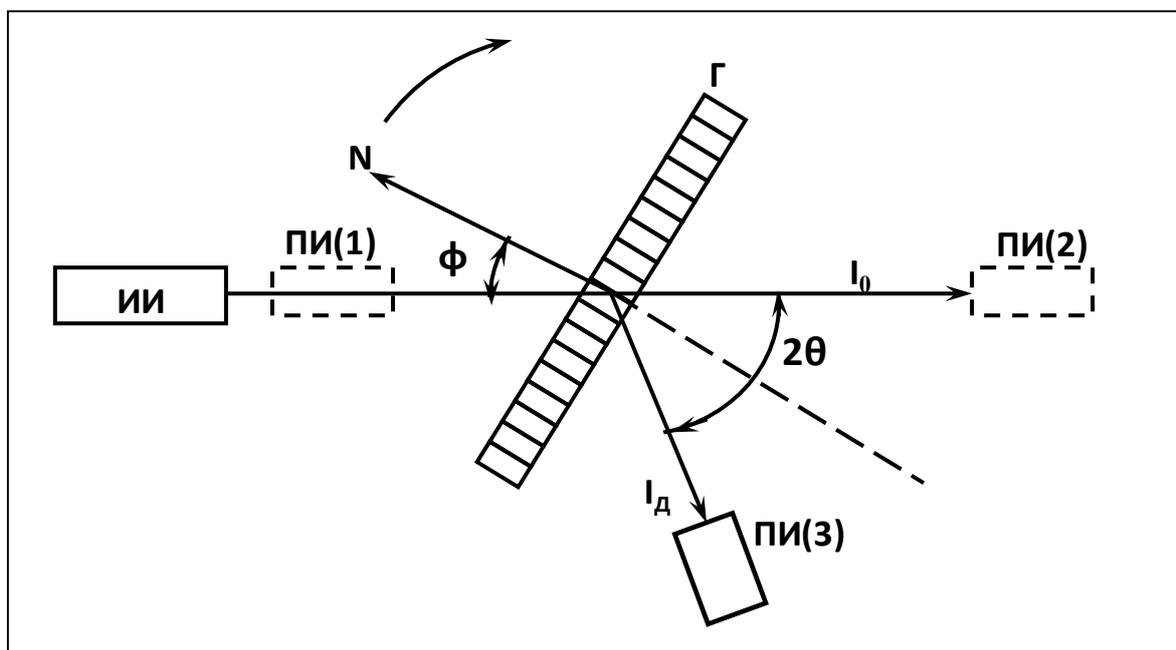


Рис.7. Оптическая схема установки для измерения дифракционной эффективности и контура угловой селективности пропускающей голограммы-решетки. ИИ – источник излучения; ПИ – приемник излучения, который может быть установлен в положения 1,2,3; Г – голограмма; N – нормаль к поверхности голограммы; I_0 и I_d – нулевой и дифрагированный пучки излучения; φ – угол поворота образца относительно падающего пучка; 2θ – угол между нулевым и дифрагированным пучками излучения (измерения проводятся при $\theta = \theta_{бр}$).

На рис.8 приведена зависимость интенсивности дифрагированного пучка (I_d) от угла поворота голограммы относительно считывающего (падающего) пучка для образца, на котором зарегистрированы три наложенные голограммы методом углового мультиплексирования. Приемник излучения в этом случае находится в положении «ПИ(3)» (см.рис.7). В этом случае при установке угла между носителем информации (образцом) и считывающим пучком (φ) равным φ_1 на приемнике излучения получаем информацию, записанную на голограмме №1. Если $\varphi = \varphi_2$, то на приемник излучения попадает информация, записанная на голограмме №2, для того, чтобы получить на приемнике излучения (детектирующем устройстве) информацию, записанную на

голограмме №3, необходимо далее носитель информации (или считывающий пучок) повернуть на угол $\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_2$.

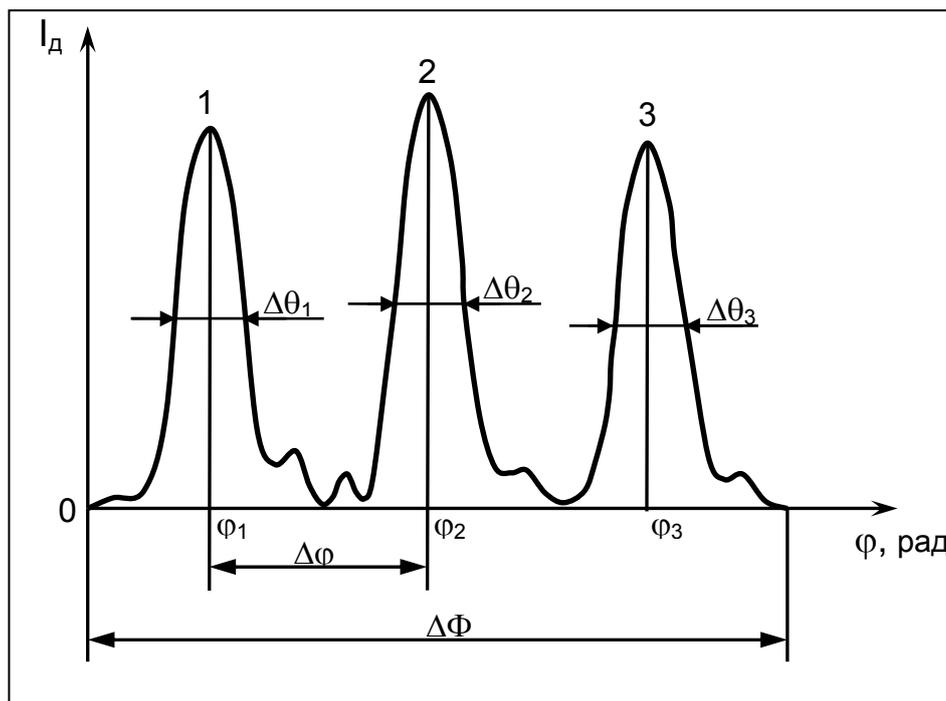


Рис.8. Зависимость интенсивности дифрагированного излучения (I_d), детектируемого приемником излучения (ПИ-3, рис.7), от угла поворота голограммы относительно считывающего (падающего) пучка (φ): φ_1 ; φ_2 ; φ_3 — угол поворота, соответствующий считыванию голограмм №1; №2; №3 (поворот образца по часовой стрелке); $\Delta\theta_i$ — угловая селективность отдельной, i -й, голограммы (определяется по уровню интенсивности дифрагированного пучка $I_d = 0,5 \cdot I_{\max}$); $\Delta\varphi$ — угол поворота образца между считыванием двух соседних наложенных голограмм; $\Delta\Phi$ — диапазон углов поворота образца-носителя, необходимый для считывания всех зарегистрированных голограмм.

Чтобы обеспечить независимое считывание каждой отдельной наложенной голограммы и избежать влияния помех, создаваемых соседними наложенными голограммами, угол поворота образца между считыванием двух соседних наложенных голограмм ($\Delta\varphi$) должен быть больше, чем величина угловой селективности отдельной голограммы ($\Delta\theta$). Угол $\Delta\varphi$ задается условиями регистрации наложенных голограмм. Как правило, на практике при мультиплексировании обеспечивают такие условия эксперимента, чтобы $\Delta\varphi = (2 \div 5) \cdot \Delta\theta$.

В работе необходимо исследовать зарегистрированную на образце-носителе мультиплексную голограмму как элемент странично-ориентированной голографической памяти, и оценить ее возможности,

предполагая, что отдельная наложенная голограмма несет фрагмент информации, равный одной странице текста.

При рассмотрении свойств отдельной голограммы основным измеряемым параметром, характеризующим ее качество, является дифракционная эффективность (см. «Терминологический словарь»). Именно дифракционная эффективность (ДЭ) голограммы определяет мощность источника излучения и чувствительность приемника излучения (приемной аппаратуры) при считывании информации с данного элемента архивной памяти. Кроме того, контроль ДЭ необходим в процессе разработки и создания таких элементов при сравнительном анализе свойств голограмм, зарегистрированных на различных материалах при различных условиях; а также при обеспечении определенных требований к качеству считываемой информации (например, необходимость обеспечить требуемое качество текста или изобразительного материала по всей площади считываемой страницы информации).

Дифракционная эффективность определяется обычно как отношение потока излучения в дифрагированной волне данного порядка дифракции $(P_{д})_n$ к падающему на голограмму потоку излучения $(P_{пад})$. Для характеристики голограмм, имеющих потери (на поглощение, рассеяние, отражение и т.д.), используют также приведенные, или нормированные, значения дифракционной эффективности, определяемые как отношение $(P_{д})_n$ к сумме потоков излучения всех порядков дифракции, включая нулевой. В этом случае для объемной голограммы, формирующей один дифракционный порядок, $ДЭ = (P_{д})_1 / \{(P_{д})_1 + (P_{д})_0\}$. Дифракционная эффективность зависит от типа голограммы, свойств регистрирующей среды и методов постэкспозиционной обработки, условий регистрации и освещения голограммы и является важнейшей характеристикой при количественной оценке ее свойств.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

А. Подготовка эксперимента.

1. Включить источник излучения – лазер.
2. Включить измерительный прибор – мультиметр в режиме измерения тока.
3. Проверить подключение к мультиметру приемника излучения (фотодиод ФД-24К).
4. Закрепить образец (оптический элемент) на поворотном столике так, чтобы рабочая область элемента с зарегистрированными голограммами оказалась в сечении светового пучка.

Б.Измерение дифракционной эффективности.

Дифракционная эффективность (ДЭ) голограммы в данной работе определяется как отношение потока излучения в дифрагированной волне (P_d) к падающему на голограмму потоку излучения ($P_{пад}$). Поток излучения (P) пропорционален интенсивности излучения (I) и измеряется в относительных единицах.

1. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерений.
2. Установить приемник излучения в положение «1», соответствующее измерению интенсивности (потока) падающего излучения. Проверить перпендикулярность положения входного окна приемника относительно падающего пучка. Измерить интенсивность падающего излучения $I_{пад}$ в относительных единицах (измеряется ток в цепи приемника излучения, пропорциональный интенсивности или потоку, излучения). Данные занести в столбец 4 таблицы 1.
3. Установить приемник излучения в положение «3», соответствующее измерению интенсивности дифрагированного излучения. Проверить перпендикулярность входного окна приемника излучения относительно падающего пучка. Поворачивая голограмму (вращением барабана микрометрического винта) относительно падающего пучка, найти максимальное значение интенсивности дифрагированного пучка первой наложенной голограммы. Данные занести в столбец 3.
4. Повторить п.2 и п.3 для голограммы №2.
5. Повторить п.2 и п.3 для голограммы №3.

Таблица 1. Данные для определения дифракционной эффективности отдельных наложенных голограмм

№ голограммы	Направление поворота образца	I_d (max)	$I_{пад}$	ДЭ,%
1	2	3	4	5
Голограмма№1	По часовой стрелке			
Голограмма№2	“			
Голограмма№3	“			

В.Измерение зависимости интенсивности дифрагированного излучения (I_d), детектируемого приемником излучения в положении ПИ(3), от угла поворота голограммы (φ). (Данные для получения контуров угловой селективности наложенных голограмм и оценки их угловой селективности)

1. Подготовить таблицу 2 для записи результатов измерений.
2. Установить приемник излучения в положение ПИ(3) для измерения интенсивности дифрагированного пучка.
3. Определить цену деления барабана микрометрического винта (МВ) в угловых единицах (q , рад/мм), измерив расстояние от вертикальной оси вращения столика с голограммой до горизонтальной оси вращения сердцевины микрометрического винта (МВ). Занести результат в исходные данные к таблице 2.
4. Оценить диапазон углов поворота $\Delta\Phi$ (см.рис.8), необходимый для считывания всех зарегистрированных голограмм.
5. Определить, с каким шагом необходимо проводить измерения, чтобы при построении контура для каждой голограммы имелось 20-30 экспериментальных точек. «Шаг измерений» – расстояние между двумя измерениями по барабану микрометрического винта – может быть постоянным при проведении измерений контура голограммы (например, 2; 5; 10 делений барабана МВ) и увеличен при измерениях вне контура голограммы.
6. Провести измерение исходной зависимости, заполнив столбцы 1 и 2 таблицы 2.

Таблица 2. Данные для построения зависимости $I_d(\varphi)$ и оценки угловой селективности наложенных голограмм.

Исходные данные: цена деления барабана МВ - $q =$ _____ радиан/мм

Отсчет по барабану МВ, N_i , мм	Интенсивность дифрагированного пучка, I_d , мкА	φ , рад
1	2	3

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определить дифракционную эффективность (ДЭ) каждой из наложенных голограмм ($i=1,2,..$), используя формулу:

$$ДЭ_i = (I_d)_{i\max} / I_{\text{пад}} \quad (1),$$

где $(I_d)_{i\max}$ – максимальное значение интенсивности дифрагированного излучения i -той голограммы, $I_{\text{пад}}$ – интенсивность падающего излучения. Данные занести в табл.1 и табл.3.

2. Рассчитать φ , заполнив столбец 3 в таблице 2. Расчет производить по формуле:

$$\varphi = (N_i - N_0) \cdot q \text{ [радиан]} \quad (2),$$

где рекомендуется использовать $(N_i - N_0)$ [мм] и q [радиан/мм].

3. Построить график зависимости $I_d(\varphi)$ для исследуемой мультиплексной голограммы, как показано на рис.8.
4. Определить угловую селективность ($\Delta\theta_i$) каждой из наложенных голограмм. $\Delta\theta_i$ определяется как полуширина соответствующего (i -того) пика зависимости $I_d(\varphi)$ как показано на рис.8. $\Delta\theta_i$ оценить в мрад. Данные занести в табл.3.
5. Оценить информационную емкость (V) единицы площади виртуального оптического элемента – голографического диска, который может быть изготовлен на основе использованного в данной работе образца регистрирующей среды, заполнив таблицу 4.
6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Таблица 3. Параметры наложенных голограмм.

№ наложенной голограммы	Дифракционная эффективность	Угловая селективность, $\Delta\theta_i$, мрад	Примечания
1			
2			
3			
....			

Таблица 4. Информационная емкость единицы площади виртуального голографического компакт-диска при различных условиях считывания.

№ п/п	Форма записи	Изменение угла падения считывающего пучка – $\Delta\Phi$	Инф.емкость на ед. площади, V	
			Страниц	Бит
1	Постранично	0 (без изменения)	1	50
2	Постранично	1 град		
3	Постранично	0,1 радиан		
4	Постранично	5 град		
5	Постранично	0,01 радиан		

Исходные данные для заполнения таблицы 4.

- Одна голограмма представляет собой один фрагмент регистрируемой информации, т.е. одну страницу текста;
- При записи одной голограммы (одной страницы текста) информационная емкость единицы площади виртуального диска - $V_1=50$ бит;
- Угловое расстояние между соседними голограммами при считывании отдельных наложенных голограмм ($\Delta\theta$) составляет величину $2,5\Delta\theta$;
- $\Delta\theta$ определяется как среднее измеренное значение по табл.3.
- Элемент рассчитан на работу в заданном диапазоне углов падения ($\Delta\Phi$) считывающего пучка на образец-носитель (данные в столбце 3 таблицы 4).
- Информационная емкость единицы площади диска V определяется количеством наложенных голограмм на данном участке диска, которые могут быть зарегистрированы при заданном $\Delta\Phi$, и значением угловой селективности отдельных голограмм $\Delta\theta$. Расчет производится по формуле:

$$V = V_1 (\Delta\Phi/\Delta\phi) = V_1 (\Delta\Phi/ 2,5\Delta\theta) \quad (3).$$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб: СПб ГУ ИТМО. – 2006. - С.6-36.
2. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. - Л.:ГОИ. - 1978. – 125С.
3. Акаев А. Оптические методы обработки информации. – СПб: СПб ГУ ИТМО. – 2005.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.:Мир. 1973. – 686С.
5. Оптическая голография. Под ред. Колфилда Г. - М.:Мир. 1982. - т.1, т.2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются преимущества использования голографической памяти?
2. Что такое наложенная запись голограмм, и для какого типа голограмм она возможна?
3. За счет чего производится уплотнение информации в устройствах хранения информации?
4. Основные свойства объемных голограмм?
5. Что такое «селективность голограммы»?
6. Как записываются наложенные голограммы?
7. Дать определение дифракционной эффективности голограммы.
8. Дать определение условия Брэгга.
9. Как изменяется угол Брэгга (θ_{Br}) при переходе от одной наложенной голограммы к другой в данной работе?

Обработка информации

Использование преобразования Фурье в системах оптической обработки информации

Цель работы: Изучение возможностей преобразования Фурье применительно к оптическим системам.

Задачи, решаемые в работе:

1. Изучить оптические системы, выполняющие преобразование Фурье.
2. Познакомиться с трактовкой преобразования Фурье применительно к оптике.
3. Изучить спектры Фурье некоторых характерных элементов оптических схем.
4. Освоить вычисление геометрических и частотных параметров оптических объектов на основе анализа их спектров Фурье.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Преобразование Фурье - один из основных методов теории информации и теории связи. Исторически теория информации и теория связи развивались на базе электротехнических дисциплин, электронных средств связи и вычислительной техники. Однако уже с конца 30 годов 20 века формировались и развивались связи между этими областями техники и оптикой. В 50-х годах прошлого века применение методов теории связи в области оптической обработки информации становится устойчивой практикой. Сочетание методов теории связи и возможностей оптики, в особенности когерентной, привело к мощному развитию направлений науки и техники, связанных с оптическими информационными системами.

Для описания таких систем одним из фундаментальных является метод, использующий математический аппарат преобразования Фурье.

Преобразование Фурье – мощный инструмент не только анализа, но и синтеза информационных систем, в основе которого - представление сигнала (**a**) в виде линейной комбинации более простых функций определенного вида, а именно, комплексных экспоненциальных функций. Применение преобразования Фурье к операциям свертки, корреляции и распределениям позволяет эффективно решать задачи анализа оптических систем, которые иначе требовали бы использования специальных и часто весьма трудоемких методов. При этом значение метода Фурье в оптике

было бы менее существенным, если бы он не открывал уникальных возможностей для синтеза оптических систем, связанных с направленным воздействием на спектр оптических сигналов. Использование методов синтеза Фурье привело, например, к созданию микроскопа фазового контраста Цернике, оптических согласованных фильтров и алгоритмов распознавания образов, различных методов усиления контраста.

Преобразование Фурье комплексной функции независимых переменных $\mathbf{a}(x,y)$ имеет вид

$$F(\mathbf{a}) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \mathbf{a}(x,y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy = A(v_x, v_y) \quad (1).$$

Величину $A(v_x, v_y)$ называют фурье-образом, или спектром Фурье, или частотным спектром функции $\mathbf{a}(x,y)$. Независимые переменные v_x, v_y обычно называют частотами.

Обратным преобразованием Фурье функции $A(v_x, v_y)$ называют выражение вида

$$F^{-1}(A) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} A(v_x, v_y) \exp[j2\pi(v_x x + v_y y)] dv_x dv_y = \mathbf{a}(x,y) \quad (2).$$

В оптике преобразование Фурье распределения комплексных амплитуд светового поля в плоскости можно трактовать как комбинацию плоских волн, распространяющихся в различных направлениях. То есть, амплитуда поля в любой точке представляется суммой амплитуд этих плоских волн с учетом фазовых сдвигов, которые они приобретают, приходя в данную точку.

Действительно, выражение для плоской волны единичной амплитуды с направляющими косинусами волнового вектора $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ имеет вид

$$e(x,y,z) = \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma) \right] \quad (3),$$

где $\cos \gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta}$, λ - длина волны.

При этом в плоскости $z = 0$ комплексные экспоненциальные функции в выражении (2): $\exp[j2\pi(v_x x + v_y y)]$ - описывают плоские волны (см. (3)) с направляющими косинусами

$$\cos \alpha = \lambda v_x, \quad \cos \beta = \lambda v_y, \quad \cos \gamma = \sqrt{1 - (\lambda v_x)^2 - (\lambda v_y)^2} \quad (4)$$

и комплексными амплитудами $A(v_x, v_y) dv_x dv_y$. Величины v_x, v_y имеют смысл пространственных частот распределения $\mathbf{a}(x,y)$. Соответственно, величину $F(\mathbf{a}) = A(v_x, v_y)$ называют также частотным спектром сигнала $\mathbf{a}(x,y)$.

В случае оптических систем частотный спектр (или преобразование Фурье) можно не только представить математически, но и получить его изображение. Дело в том, что один из базовых элементов оптических систем, линза, трансформирует поле световой волны таким образом, что распределение поля в задней фокальной плоскости является как раз фурье-образом распределения поля в передней фокальной плоскости. То есть амплитуда и фаза световой волны в точке (x_v, y_v) задней фокальной плоскости определяется амплитудой и фазой спектра Фурье для пространственных частот ν_x, ν_y сигнала $a(x, y)$ в передней фокальной плоскости. Физически это соответствует фокусировке плоской волны с волновым вектором $\mathbf{k} = (2\pi\nu_x, 2\pi\nu_y, k_z)$ в точку (x_v, y_v) .

Преобразование линзой светового поля вне передней фокальной плоскости приводит к формированию в задней фокальной плоскости распределения, отличающегося от фурье-спектра только фазой. В этом случае распределение амплитуд и, соответственно, интенсивности не отличается от такового в картине фурье-образа.

Рассмотрим вид спектров Фурье для некоторых характерных и часто встречающихся в оптике объектов:

1 – щель с горизонтальным и вертикальным размерами a и B соответственно ($a \ll B$).

Фурье-образ распределения светового поля, формируемого диафрагмой с узкой щелью, соответствует распределению амплитуд в дифракционной картине от щели в дальней зоне. Распределение интенсивности I_ν при этом имеет вид:

$$KI_0 \sin^2\left(\frac{ka}{2} \cos\alpha\right) / \left(\frac{ka}{2} \cos\alpha\right)^2 = KI_0 \sin^2\left(\frac{ka}{2} \sin\varphi\right) / \left(\frac{ka}{2} \sin\varphi\right)^2 \quad (5),$$

где K - постоянный множитель, обратно пропорциональный вертикальному размеру щели B , I_0 - интенсивность прямопроходящего света, φ - угол дифракции.

Графическое представление распределения интенсивности (5) дано на рис.1.

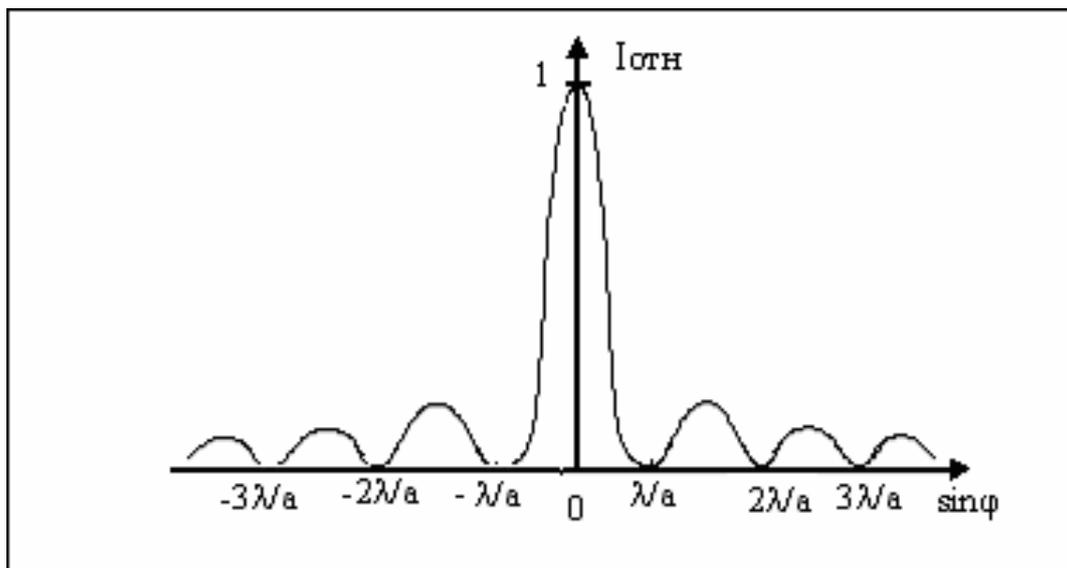


Рис.1. Распределение интенсивности в фурье-спектре светового поля, формируемого одной щелью.

2 - пропускающая дифракционная решетка с N штрихами: периодом d и шириной щелей a .

Фурье-преобразование распределения комплексных амплитуд светового поля, формируемого дифракционной решеткой, описывает распределение поля в картине дифракции Фраунгофера на этой решетке. Распределение интенсивности излучения в дифракционной картине описывается выражением:

$$I_{\nu} = I_0 \left[\frac{\sin^2(N\pi d \sin\varphi / \lambda)}{N^2 \sin^2(\pi d \sin\varphi / \lambda)} \right] \cdot \left[\frac{\sin^2(\pi a \sin\varphi / \lambda)}{(\pi a \sin\varphi / \lambda)^2} \right] \quad (6),$$

Пример такого распределения приведен на рис.2.

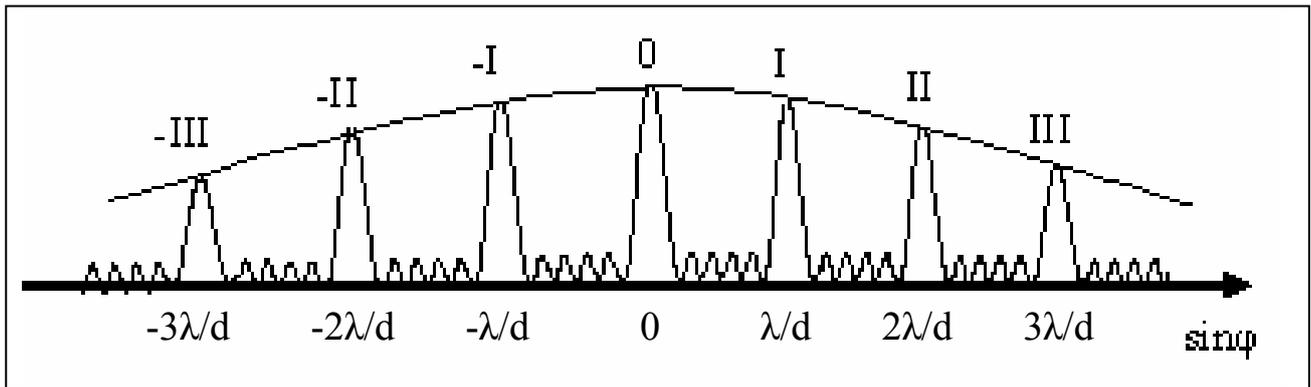


Рис.2. Распределение интенсивности в фурье-спектре светового поля, формируемого дифракционной решеткой (0, I, II, ... - порядки дифракции).

Конкретный вид распределения интенсивности (6) зависит от соотношения периода решетки и ширины щели: $d / a \equiv c$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

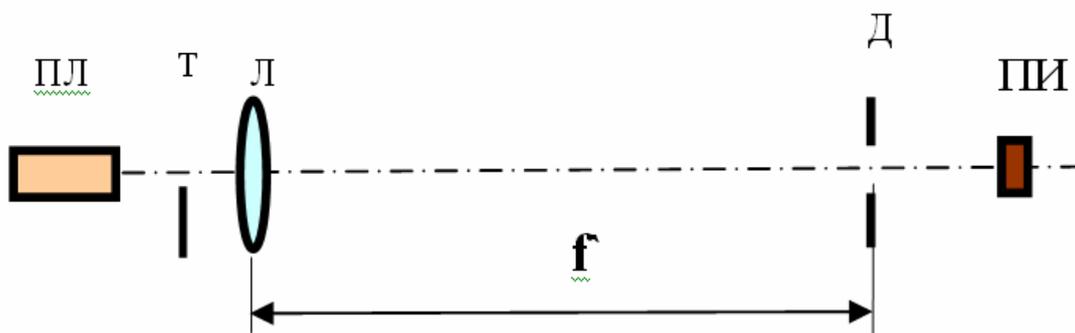


Рис.3. Схема экспериментальной установки для получения и измерения спектров Фурье оптических объектов: ПЛ - полупроводниковый лазер; Т – транспарант; Л – линза; Д - диафрагма со щелью; ПИ – приемник излучения (фотодиод ФД-24К).

На рис.3 приведена принципиальная схема лабораторной установки. Для получения спектров Фурье различных оптических объектов (транспарантов) Т используется линза Л с фокусным расстоянием f . Источником излучения служит полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 650\text{нм}$. В задней фокальной плоскости линзы, где формируется распределение амплитуд светового поля, соответствующее фурье-спектру объекта (см. раздел «Сведения из теории»), устанавливается диафрагма Д в виде щели для выделения узкого участка спектра. Интенсивность излучения на этом участке измеряется в относительных единицах с помощью фотоприемника ФД-24 и мультиметра (милливольтметра) и

определяется амплитудой спектра Фурье для соответствующей пространственной частоты (см. раздел «Сведения из теории»).

Для измерения распределения интенсивности в интересующем диапазоне пространственных частот диафрагма D имеет возможность перемещения в горизонтальном направлении перпендикулярно оптической оси.

Студентам предлагается исследовать ряд оптических объектов, широко используемых в оптических системах:

Объект №1. Транспарант в виде щели шириной a .

Объект №2. Пропускающая одномерная решетка с периодом d_1 и шириной щели a_1 .

Объект №3. Пропускающая одномерная решетка с периодом d_2 и шириной щели a_2 .

Объект №4. Матовое стекло (диффузный рассеиватель).

Объект №5 (дополнительный). Пропускающая двумерная решетка.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Включить блок питания лазера.
3. Кассету с объектом №1 (№2, №3) установить в лазерном пучке перед линзой L при помощи держателя.
4. Убедиться, что в плоскости диафрагмы D , установленной на юстировочном столике, формируется резкая картина фурье-образа объекта.
5. Измерить зависимость интенсивности в фурье-спектре транспаранта от горизонтальной координаты x_v , перемещая диафрагму перпендикулярно оптической оси с шагом 0,05 мм. (Полученная зависимость должна содержать 6-10 максимумов интенсивности.)*
6. Кассету с объектом №4 установить в лазерном пучке за линзой L при помощи держателя. Расстояние L от транспаранта до диафрагмы D должно обеспечивать достаточную для регистрации интенсивность излучения в плоскости приемной площадки приемника излучения.
7. Измерить расстояние L (от транспаранта до задней фокальной плоскости линзы или, что то же, до плоскости диафрагмы).
8. Измерить зависимость интенсивности в фурье-спектре транспаранта от горизонтальной координаты x_v , перемещая диафрагму перпендикулярно оптической оси с шагом 0,05 мм. (Полученная зависимость должна содержать 8-10 максимумов интенсивности.)*

* Проконсультироваться с преподавателем.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Построить графики зависимости интенсивности в фурье-спектрах объектов №1, №2, №3 от координаты x_v в фокальной плоскости линзы.
2. Сравнить относительную величину измеренных максимумов интенсивности в фурье-спектре объекта №1 с расчетными (полученными из соотношения (5)) значениями: $I_0 : I_1 : I_2 : I_3 = 1 : 0.047 : 0.017 : 0.008$, где $0, 1, 2, \dots = n$ - номер порядка дифракции.

Данные занести в таблицу вида А.

3. Рассчитать относительную величину максимумов интенсивности в спектре Фурье объектов №2, №3 по формуле:

$$I_n^{\text{отн}} = \sin^2(\pi n / c) / (\pi n / c)^2 \quad (7),$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ (см. выражение (6)).

Сравнить с относительными (нормированными на наибольшее значение) величинами максимумов интенсивности в экспериментальном спектре Фурье. Данные занести в таблицу вида А. Проанализировать полученные результаты.

4. Рассчитать значения пространственных частот, соответствующих координатам ${}^n x_v$ (в частотной плоскости)
 - минимумов интенсивности для объекта №1,
 - максимумов интенсивности для объектов №2, №3, №4 по формуле (см. (4))

$$v_x = {}^n x_v / (\lambda f) \quad (8)$$

полагая, что $x_v = 0$ соответствует положению главного (наибольшего) максимума. Результаты занести в таблицу вида Б.

5. Рассчитать ширину щели для объекта №1 по формуле:

$$a = n / v_x \quad (9)$$

для $n = 1, 2, 3, \dots$. Результаты занести в таблицу вида Б. Рассчитать среднее значение a , используя данные таблицы. Сравнить с номинальным значением.

6. Рассчитать пространственный период для объектов №2, №3, №4 по формуле:

$$d = n / v_x \quad (10)$$

для $n = 1, 2, 3, \dots$. Результаты занести в таблицу вида Б. Рассчитать среднее значение d , используя данные таблицы (Для объекта №4 величина d представляет оценку среднего размера неоднородностей матового стекла). Сравнить с паспортными данными объектов №2 и №3.

7. Определить отношение $d / a = c$ для объектов №2 и №3, используя графики п.1 данного раздела. Сравнить с паспортными данными объектов №2 и №3.

Таблица А. Расчётные и измеренные значения максимумов интенсивности в фурье-спектре объекта №1 (№2, №3)

Порядок дифракции, n	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Расчётные относительные значения максимумов интенсивности								
Измеренные относительные значения максимумов интенсивности								

Таблица Б. Характерные пространственные частоты и геометрические параметры объекта №1 (№2, №3, №4)

Порядок дифракции, n	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Пространственная частота ν_x , мм^{-1}								
Период d , мм (или a , мм)								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите формулы для прямого и обратного преобразования Фурье.
2. Дайте трактовку фурье-преобразования в оптике.
3. Какие оптические элементы выполняют преобразования Фурье?
4. Где в пространстве оптической системы, формирующей фурье-образ объекта, локализуется его пространственный спектр?

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.С.Ландсберг. Оптика. М, физматлит, 2006.
2. А.А.Акаев «Оптические методы обработки информации», СПбГУ ИТМО, 2005. (Выдающиеся ученые университета ИТМО).
3. Г. Старк. Применение методов фурье-оптики. М., Радио и связь, 1988.
4. Дж. Гудмен. Введение в фурье-оптику. М., Мир, 1970.

ПРИМЕЧАНИЕ

Дополнительные возможности лабораторной установки

Установка позволяет организовать эксперименты, демонстрирующие возможности фурье-синтеза, связанные с направленным воздействием на пространственный спектр объектов. Здесь потребуется установить экран (например, бумажный) в плоскости изображения объекта, находящейся вне рельса, комплектующего лабораторную установку. Помещая соответствующие фильтры-маски в задней фокальной плоскости линзы (плоскости фурье-спектра), можно наблюдать трансформацию изображения объекта на выходе оптической системы и повторить, например, весьма наглядный эксперимент Аббе – Портера с объектом в виде сетки (пропускающей двумерной решетки).

Векторно-матричный умножитель – простейший оптический процессор

Цель работы: Познакомиться с возможностями оптических систем, предназначенных для выполнения вычислительных процедур.

Задачи, решаемые в работе:

1. Изучить предложенный вариант схемы оптического процессора – векторно-матричного умножителя (ВМУ).
2. Изучить принцип действия макета оптического процессора.
3. Освоить способы представления математических объектов: вектора и матрицы в оптическом процессоре.
4. Исследовать особенности выполнения оптическим процессором операции умножения вектора на матрицу.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Выполнение математических операций в электронных системах требует зачастую достаточно больших вычислительных ресурсов. Оптика же позволяет реализовывать эти процедуры не только со скоростью света, но и выполнять операции в параллельном режиме. Основные затраты времени при этом необходимы для ввода информации в оптическое устройство (процессор) и считывания результата. В оптических системах могут производиться операции умножения вектора на матрицу, вычисление корреляционных функций, выполняться преобразование Фурье и другие операции.

Среди других процедур следует отметить операцию умножения вектора на матрицу, которая часто используется как в рамках традиционных вычислительных процедур, так и в таких новых направлениях, как нейрокомпьютинг, искусственные нейронные сети и, шире, в рамках парадигмы вычислительного интеллекта. Широкое применение этой математической операции для решения фундаментальных проблем искусственного интеллекта обусловлено прежде всего тем, что простые операции произведения векторов и умножения вектора на матрицу позволяют реализовать различные модели ассоциативной памяти, которая является основой любой

системы искусственного интеллекта, так как без памяти нет и интеллекта.

Так векторно-матричный формализм применяется для описания состояния и поведения искусственных нейронных сетей. В рамках этого подхода состояния нейронных слоев описываются посредством векторов-строк. Размерность такого вектора равна количеству нейронов в слое, состояние (уровень активации или возбуждения) каждого нейрона характеризуется значением соответствующего компонента вектора. В простейшем случае нейроны, объединенные в один слой, не связаны друг с другом, межнейронные связи возникают только между нейронами из разных слоев. Множество таких межнейронных связей представляют матрицей, называемой матрицей связей. Простой и удобный метод формирования матрицы связей W между двумя слоями нейронной сети, например, слоями A и B , дает модель произведения вектора-столбца A^T на вектор-строку B : $A^T B = W$ [1], где T – символ транспонирования. Размер матрицы связей W - $m \times n$, где количество строк m соответствует числу нейронов слоя A , а количество столбцов n – числу нейронов слоя B . Например, w_{ij} – это вес (элемент матрицы связей), соответствующий связи i -го нейрона слоя A (a_i) с j -ым нейроном слоя B (b_j). Этот метод может рассматриваться как реализация правила обучения Хэбба [2].

В оптической вычислительной системе матрице (тензору с валентностью 2) может соответствовать плоский транспарант (или тонкая голограмма), коэффициент пропускания каждой ячейки которого (дифракционная эффективность элементарной тонкой голограммы) пропорционален или равен величине соответствующего элемента матрицы.

При моделировании состояния и поведения искусственных нейронных сетей связь вектора-строки с матрицей может быть описана тензором с валентностью 3 и реализована в оптическом устройстве с использованием объемных регистрирующих сред.

Связь двух матриц можно описать тензором с валентностью 4. Технические методы получения такого рода оптических элементов в нашем трехмерном мире пока не известны (существуют способы организации такого типа связи с использованием пространственных, временных, частотных и др. каналов, но они не являются моделью именно тензора связи).

В данной работе студентам предлагается изучить действие оптического устройства (векторно-матричного умножителя), выполняющего операцию умножения вектора-строки на матрицу.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

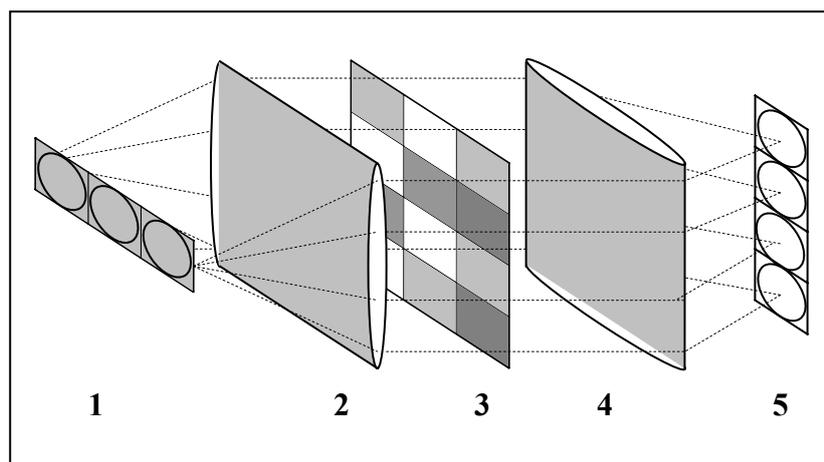


Рис.1. Принципиальная схема оптического векторно-матричного умножителя (ВМУ). 1 - линейка полупроводниковых лазеров (3 шт.), 2 и 4 - цилиндрические линзы, 3 - матрица оптических фильтров 3×4 , 5 - линейка фотодиодов (4 шт.)

Приведенная схема позволяет оптическим способом производить умножение вектора (\mathbf{A}) на матрицу (\mathbf{W}). Вектор \mathbf{A} вводится в процессор как матрица-строка, каждый элемент a_{1k} которой пропорционален интенсивности излучения I соответствующего лазера (длина волны 650нм) линейки полупроводниковых лазеров 1. Матрица \mathbf{W} моделируется матрицей оптических фильтров (транспарантов) 3. Пропускание τ_{kj} каждого фильтра матрицы 3 пропорционально величине соответствующего элемента матрицы \mathbf{W} . Компоненты вектора $v_{1j} = a_{1k} \cdot w_{kj}$ при этом пропорциональны суммарным значениям интенсивности (I_{1j}^b) излучения лазеров линейки 1 в плоскости приемных площадок фотодиодов (ФД) 5 после прохождения специальным образом организованной оптической схемы (рис.1).

Студентам предстоит убедиться в этом на практике.

Предварительно следует заметить, что указанная схема использует особенности излучения полупроводниковых лазеров, имеющих большую расходимость в одном направлении (вертикальное на рис.1) и малую расходимость в направлении перпендикулярном первому. В сочетании с использованием цилиндрических линз это позволяет сформировать (с точностью до неравномерности индикатрисы излучения лазеров 1) в плоскости матрицы 3 световой сигнал, пропорциональный компоненту a_{1k} вектора \mathbf{A} на входе каждого фильтра (kj) k -ой строки матрицы транспарантов ($I_{1k(j)}^A$, (j)-параметр), что необходимо для реализации алгоритма умножения вектора на матрицу в данной схеме. В нашем случае матрица транспарантов \mathbf{W} имеет 3 строки

(по числу компонентов вектора \mathbf{A}). Количество столбцов для примера задано равным 4.

Упомянутая выше неравномерность индикатрисы излучения лазеров приводит к некоторой разнице значений $I_{1k(j)}^A$ для k -ой строки матрицы и, соответственно, к погрешности определения вектора \mathbf{B} . Для компенсации этой погрешности в данной работе вводятся расчетные поправочные коэффициенты $K_{k(j)}$ (Для создания реальной скомпенсированной оптической схемы ВМУ необходимо введение дополнительного устройства с соответствующим пропусканием, определяемым коэффициентами $K_{k(j)}$. В выполняемой работе этот этап не предусмотрен):

$$k_{k(j)} = \frac{I_{1k(j)}^A}{I_{1k(j)\min}^A} \quad \text{при } k=\text{const}, \quad (1)$$

где (j) - параметр.

При этом компонентам вектора \mathbf{A} соответствуют минимальные значения интенсивности $I_{1k(j)\min}^A$ для каждого лазера ($k=1,2,3$ -номер компонента вектора \mathbf{A} и соответствующего ему лазера).

Вектор \mathbf{B} , результат умножения вектора \mathbf{A} на матрицу W , определяется через свои компоненты $b_{ij} = v_{ij}$, которые в нашей схеме пропорциональны, с учетом поправочных коэффициентов, интенсивности излучения I_{ij}^b в плоскости 5 приемных площадок ФД:

$$b_{ij} \rightarrow I_{ij}^{b*} = \frac{I_{1k(j)}^A}{K_{k(j)}} \times w_{kj} \cdot \quad (2)$$

Напомним, что вектор, например, \mathbf{A} может быть представлен в форме матрицы-строки:

$$\mathbf{A} = (a_{11}, a_{12}, a_{13}). \quad (3)$$

При транспонировании (т.е. при замене каждой строки матрицы столбцом) получаем матрицу-столбец, которая также может быть формой представления вектора:

$$\mathbf{A}^T = (a_{11}, a_{12}, a_{13})^T = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Произведением двух матриц $M1_{m \times p} = (m1_{ik})$ и $M2_{p \times n} = (m2_{kj})$ называют матрицу $M3_{m \times n} = (m3_{ij})$ такую, что $m3_{ij} = m1_{ik} \cdot m2_{kj}$ для $i=1,2,3,\dots,m$ и $j=1,2,3,\dots,n$ и обозначают $M3 = M1 \cdot M2$.

В нашем случае вектор \mathbf{B} , или в матричной форме $\mathbf{B}=(b_1, b_2, b_3, b_4)$, есть результат умножения матрицы-строки $\mathbf{A}_{1 \times 3}=(a_1, a_2, a_3)$, представляющей вектор \mathbf{A} , на матрицу $\mathbf{W}_{3 \times 4}$:

$$\mathbf{B}_{1 \times 4} = \mathbf{A}_{1 \times 3} \cdot \mathbf{W}_{3 \times 4} . \quad (5)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Включить питание линейки полупроводниковых лазеров 1.
3. Съюстировать оптическую схему (линзу 2, матрицу 3, линзу 4 и линейку 5) так, чтобы:
 - а. - линейка лазеров 1 находилась в передней фокальной плоскости линзы 2;
 - б. - излучение лазеров проходило через центры элементов матрицы 3 и фокусировалось линзой 4 в плоскости фотодиодов линейки 5.
4. Измерить индикатрису излучения каждого из полупроводниковых лазеров (т.е. интенсивность излучения, формируемую каждым из полупроводниковых лазеров линейки 1 и цилиндрическими линзами 2 и 4 в плоскости фотодиодов 5), для чего
 - вывести из схемы матрицу транспарантов 3 (W_1)
 - поочередно перекрывая экраном пучок излучения двух из трех лазеров, пользуясь переключателем для фотодиодов и мультиметром, измерить (в относительных единицах) значения интенсивности $I_{1k(j)}^A$ на каждом ФД. Измеренные значения занести в таблицу 1а.
5. Измерить распределение интенсивности каждого лазера в плоскости ФД в присутствии матрицы транспарантов 3 (W_1), для чего
 - установить матрицу транспарантов 3 в схему так, чтобы надпись «верх» была направлена в сторону лазеров
 - поочередно перекрывая пучок излучения двух из трех лазеров, пользуясь переключателем для фотодиодов и мультиметром, измерить (в относительных единицах) значения интенсивности на каждом ФД ($I_{1k(j)}^{A*}$). Измеренные значения занести в таблицу 2а.
6. Измерить интенсивности излучения, соответствующие компонентам вектора \mathbf{B} , для чего
 - завести в схему ВМУ излучение всех 3-х лазеров линейки 1
 - пользуясь переключателем для фотодиодов и мультиметром, измерить (в относительных единицах) значения интенсивности на каждом ФД (I_{1j}^b). Измеренные значения занести в таблицу 3а.

7. Провести измерения по п.п. 5-6 для других матриц (W_2, W_3), для чего
- перевернуть матрицу транспарантов 3 (W_1)
 - А) на 180^0 вокруг оптической оси относительно исходного положения
 - Б) на 180^0 вокруг вертикальной оси относительно исходного положения
 - повторить пункты 5-6. Данные занести в таблицы 2б,в-3б,в аналогичные таблицам 2а-3а.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Построить график индикатрисы излучения для каждого из лазеров линейки 1 по данным п. 4. раздела «Порядок выполнения работы» (пример построения см. на рис.2)
2. Определить элементы матриц W_1, W_2, W_3 по формуле

$$W_{kj} \rightarrow \tau_{kj} = I_{1k(j)}^{A*} / I_{1k(j)}^A. \quad (6)$$

Результаты занести в таблицы 4а,4б, 4в

3. Рассчитать для матриц W_1, W_2, W_3 поправочные коэффициенты K_{kj} по формуле (1). Результаты занести в таблицы 5а,5б, 5в.
4. Рассчитать ожидаемые значения интенсивности излучения в плоскости ФД $(I_{1j}^b)_{\text{расчет}}$ для матриц W_1, W_2, W_1 по формуле

$$v_{1j}^{\text{расчет}} \rightarrow = I_{1k(j)}^A \cdot \tau_{kj}. \quad (7)$$

Данные занести в таблицы 3а,3б,3в. Сравнить с измеренными по п.4. раздела «Порядок выполнения работы» значениями I_{1j}^b . Оценить погрешность измерения I_{1j}^b .

5. Определить скорректированные с учетом неравномерности индикатрисы излучения лазеров значения интенсивности I_{1j}^{b*} , соответствующие компонентам вектора \mathbf{V} , для матриц W_1, W_2, W_1 по формуле (2).

Данные занести в таблицу ба(б, в).

Сравнить величину компонент v_{1j}^* ($v_{1j}^* \rightarrow I_{1j}^{b*}$) вектора \mathbf{V} , вычисленного скорректированной схемой ВМУ (с учетом поправочных коэффициентов $K_{k(j)}$) со значениями $v_{1j} \rightarrow I_{1j}^b$ (которым соответствуют значения интенсивности I_{1j}^b), определенными в схеме ВМУ, не учитывающей неравномерность индикатрисы излучения п/п лазеров.

Таблица 1. Данные для построения индикатрис излучения полупроводниковых лазеров ($I_{1k(j)}^A(j)$).

$I_{1k(j)}^A$, отн.ед.	j				

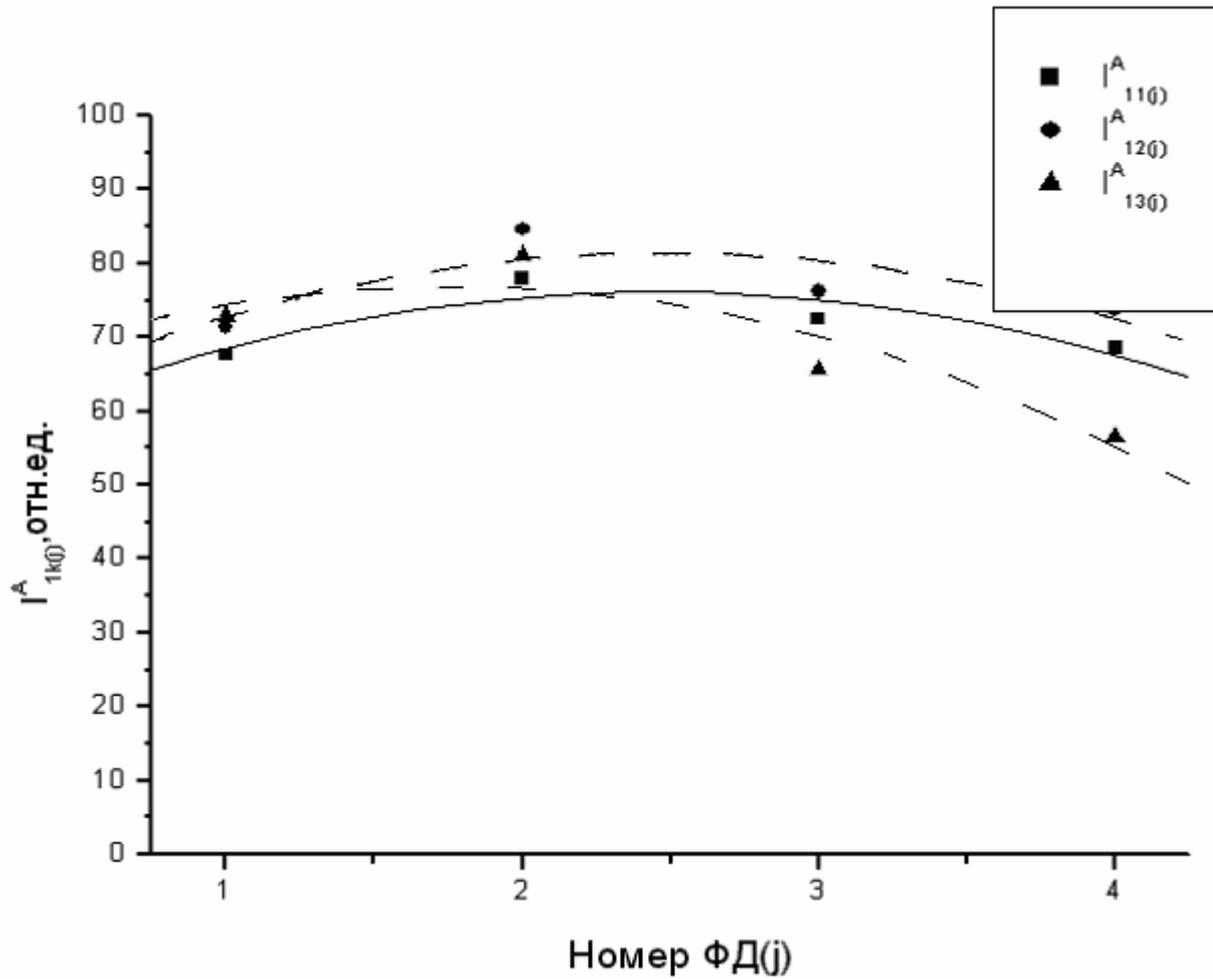


Рис.2. Пример построения индикатрис излучения лазеров.

Таблица 2а (б, в). Распределение интенсивности излучения лазеров за матрицей транспарантов.

$I_{1k(j)}^{A*}$, отн.ед.	j				

Таблица 3а (б, в). Компоненты вектора В ($v_{1j} \rightarrow I_{1j}^b$).

j				
I_{1j}^b , отн.ед.				
$(I_{1j}^b)_{\text{расчет, отн.ед.}}$				

Табл.4а (б, в). Элементы матрицы W (w_{kj}).

j \ k				

Таблица 5а (б, в). Поправочные коэффициенты K_{kj} .

j \ k				

Таблица 6а (б, в). Компоненты вектора В ($v_{1j}^* \rightarrow I_{1j}^{b*}$), вычисленные в скорректированной и нескорректированной схемах ВМУ.

j				
I_{1j}^{b*} , отн.ед.				
I_{1j}^b , отн.ед.				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких областях информатики используется операция умножения вектора на матрицу? Чем обусловлено ее широкое применение?
2. Раскройте формулу для произведения двух матриц. Размер матриц выберите самостоятельно.
3. Как характер индикатрисы излучения используемых в схеме ВМУ лазеров влияет на результаты вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Лань, 2003.
2. В.Н. Васильев, А.В. Павлов, «Оптические технологии искусственного интеллекта», СПбГУ ИТМО, 2005.
3. П.А. Белов, В.Г. Беспалов, В.Н. Васильев, С.А. Козлов, А.В. Павлов, К.Р. Симовский, Ю.А. Шполянский, «Оптические процессоры: достижения и новые идеи», Сб. «Проблемы когерентной и нелинейной оптики» под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова, СПбГУ ИТМО, 2006.

Оптические технологии искусственного интеллекта

Оптический вентиль нечёткой (многозначной) логики

Известно, что алгебра, в том числе, и алгебра логики, порождается оператором отрицания. В частности, оператор отрицания, определенный на интервале $[0,1]$ и с областью значений $[0,1]$, порождает нечеткую (многозначную) логику, более адекватную обычной человеческой, чем строгая Булева логика. В оптике оператор отрицания может быть рассмотрен как математическая формализация физического процесса взаимодействия света с веществом, в результате которого изменяются оптические характеристики вещества, например, пропускание, так, что удовлетворяется аксиоматическое определение оператора отрицания. В этом случае свойства алгебры логики как абстрактной математической конструкции физически обусловлены свойствами реальных регистрирующих сред и процессов их физико-химической обработки.

Цель работы: Изучение возможности реализации операторов многозначной логики оптическими методами.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с оптической системой, представляющей собой оптический вентиль нечеткой логики, которая реализует основные логические операторы: конъюнкции и дизъюнкции, и позволяет также реализовать операторы тавтологии, противоречия, стрелки Пирса.
2. Изучить операторы многозначной логики, реализуемые в данной работе.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Европейская культурная традиция со времен Аристотеля предъявляет к логике требования строгости, полноты и непротиворечивости. Любое высказывание может иметь только два значения истинности – истина или ложь. Третьего не дано (закон исключенного третьего). Эта классическая логика была формализована на языке математики (алгебра логики) в конце XIX века в виде Булевой логики.

Однако, в повседневной жизни человек оперирует нестрогой логикой, его суждения и высказывания зачастую противоречивы, а цели, которые он ставит себе в жизни, несовместны. Но, как ни странно, эти нестрогость и противоречивость обыденной логики отнюдь не мешают людям успешно достигать жизненных целей. В рамках Европейской культурной традиции это нонсенс, поскольку неполнота и противоречия рассматриваются в ней либо как следствие временного незнания, которое в ходе прогресса науки должно быть устранено, либо как признак слабости интеллекта. Но как быть с тем непреложным фактом, что очень многие успешные представительницы прекрасного пола используют именно «женскую логику»? Быть может, неполнота и противоречивость не дефект логики, но атрибут мира и мышления?

Как в классической физике на рубеже XIX – XX веков возник мировоззренческий кризис, разрешившийся сменой парадигмы – принятием квантовой теории и теории относительности, так и в классической логике возник своеобразный кризис, разрешившийся признанием неполноты, не строгости и противоречивости не недостатками, но напротив, атрибутами мышления. Нетрудно увидеть аналогии между принципом неопределенности Гейзенберга и сформулированным основателем теории нечетких множеств Л.Заде принципом несовместимости: "По мере возрастания сложности исследуемых нами систем наша способность делать точные и в то же время значимые суждения об их поведении уменьшается, вплоть до некоторого порога, за которым точность и осмысленность (релевантность) становятся практически несовместимыми характеристиками". При этом необходимо иметь в виду, что тот мировоззренческий кризис, о котором сказано выше, актуален только для человека, сформировавшегося в рамках Европейской культурной традиции. Для т.н. «Восточного» взгляда на мир, неполнота, нечеткость и противоречивость как мышления, так и мира, всегда были очевидны.

Логика, отличная от Булевой, в настоящее время принято определять термином **«неклассические логики»**. Иногда также используется термин **«нечеткие логики»**. Неклассические логики можно разделить на две большие группы – **многозначные и нечеткозначимые**.

К первой группе относятся логики, в которых значения истинности высказываний могут принимать не только значения 0 и 1, как в Булевой, где 0 – ложь, 1 – истина, но из интервала $[0,1]$ (дискретного или непрерывного). Первые многозначные логики были предложены еще в начале XX века - трехзначные логики Лукашевича, k-значные логики Поста и др.

В нечеткозначимых логиках значения истинности принимают нечетко определенные значения. Например, высказывание может быть почти истинно, примерно истинно, не совсем истинно и т.п.. Эти логики имеют своим математическим основанием теорию нечетких множеств (понятие нечеткого множества было введено в 1965г. Лотфи Заде).

В данной работе исследуется возможность реализации операторов многозначной логики методами геометрической оптики (поскольку не принимается во внимание и не используется фундаментальное явление дифракции) с использованием процессов, происходящих в реальных регистрирующих средах. Фундаментальное значение процесса фоторегистрации для построения логики как алгебраической конструкции определяется тем, что этот процесс может рассматриваться как оптическая реализация оператора отрицания, а именно оператор отрицания определяет свойства алгебры (детальное изложение этого аппарата можно найти в работе [2], приведенной в списке литературы).

Традиционное определение логического вентиля - переключатель, дающий на выходе результат булевой операции (**AND**, **OR**, **NOT**, **XOR**) над входными сигналами. Для многозначной логики понятие вентиля расширяется – это устройство, вычисляющее значение истинности высказывания, состоящего из двух (или нескольких) операндов (элементарных высказываний), связанных логическим оператором. Оптический вентиль – вентиль, реализованный оптическими методами.

Используемый в данной работе подход базируется на следующих положениях:

1. Примем, что значение истинности некоторого высказывания A представлено, например, транспарантом, имеющим пропускание τ_a . Это допущение по определению ведет к многозначной логике, поскольку интервал значений пропускания τ транспаранта есть $[0,1]$, т.е. соответствует интервалу значений истинности $[0,1]$.
В данной работе используется простейший вариант – транспарант с постоянным по площади пропусканием. В реальных устройствах пропускание может изменяться как по координатам, так и во времени (ввод и вычисления в реальном времени), для чего используются специальные пространственно-временные модуляторы света.
2. Определим унарную операцию отрицания как отображение $N: [0,1] \rightarrow [0,1]$, удовлетворяющее следующим аксиомам:

$$N(1) = 0, \quad N(0) = 1, \quad (1)$$

$$\forall a, b \in [0, 1]; a \geq b \Rightarrow N(a) \leq N(b). \quad (2)$$

Отрицание строгое (инволюция), если $N(N(a)) = a$

3. Рассмотрим типичную для ряда регистрирующих сред и пространственно-временных модуляторов света зависимость их пропускания (τ) от плотности энергии падающего света (H), представленную на рис.1.

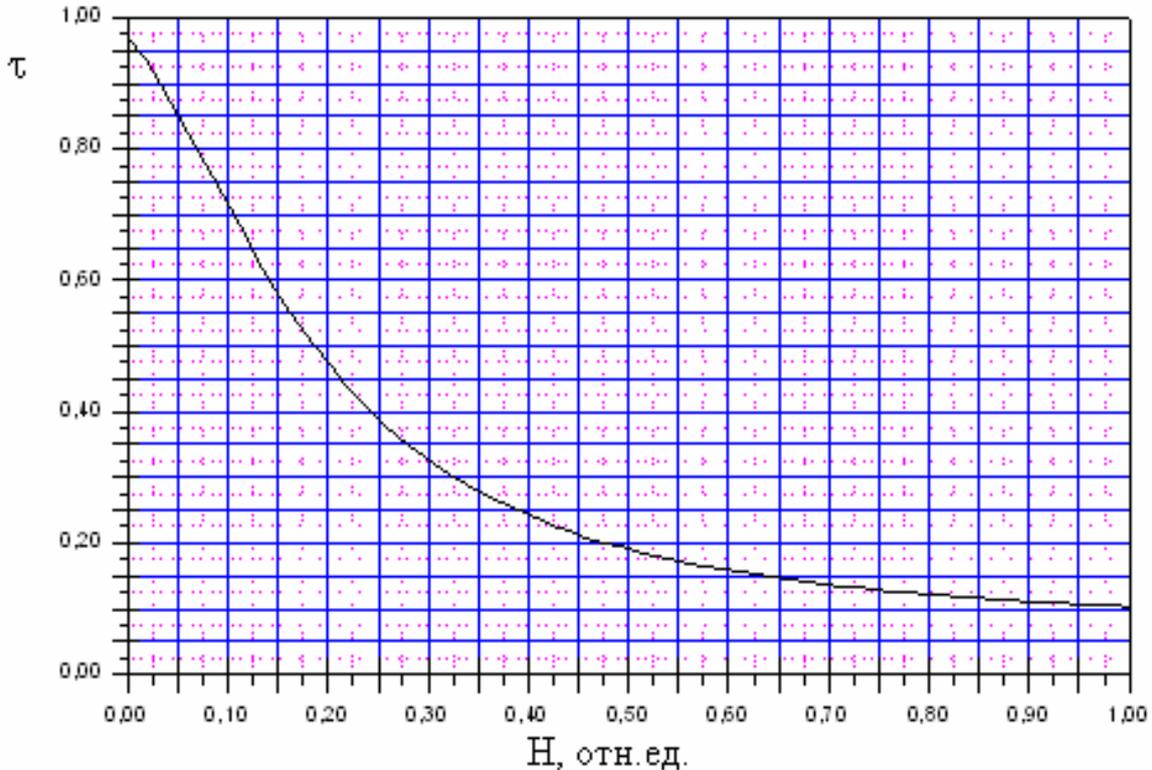


Рис.1. Типичная зависимость пропускания от плотности энергии света.

Как видно из рисунка 1, τ уменьшается с увеличением H и зависимость $\tau(H)$ не удовлетворяет граничным условиям (1). Условие $\tau_{\max}=1$ физически не реализуемо, так как при прохождении излучения через реальную среду всегда существуют потери на отражение и поглощение. Также, для регистрирующих сред физически невыполнимо и условие $\tau_{\min}=0$.

Можно применить нормировку $\tau_{\max}=1$, $\tau_{\min}=0$, $a_{\max}=1$, $a_{\min}=0$, в этом случае зависимость $\tau(a)$ удовлетворяет аксиоматическому определению операции отрицания (1–2), т.е. правомочно рассмотрение регистрирующей среды или устройства, реализующего убывающую зависимость $\tau(H)$ (как показано на Рис.1), в качестве оператора отрицания $\tau(a) \equiv N(a)$.

4. Операция отрицания позволяет выразить N -дуальность операций конъюнкции и дизъюнкции в форме законов де Моргана:

$$N(a \wedge b) = N(a) \vee N(b) \quad (3.a)$$

$$N(a \vee b) = N(a) \wedge N(b). \quad (3.b)$$

Если N – инволюция, то применив операцию отрицания к обеим частям равенств (3.a), (3.в), выразим конъюнкцию через дизъюнкцию и наоборот:

$$a \wedge b = N(N(a) \vee N(b)) \quad (4.a)$$

$$a \vee b = N(N(a) \wedge N(b)). \quad (4.b)$$

5. Операция конъюнкции реализуется при использовании двух последовательно расположенных транспарантов, освещаемых светом (Рис.2). Пропускание каждого транспаранта, принимающее значение в интервале $[0,1]$, соответствует значению одного из операндов. Интенсивность света прошедшего через транспаранты, нормированная к максимальному значению, равна произведению пропусканий двух транспарантов и представляет собой значение операции конъюнкции операндов a и b

$$a \wedge b = \tau_a \cdot \tau_b,$$

где τ_a, τ_b пропускания транспарантов, равные значениям операндов a и b

$$\tau_a = a,$$

$$\tau_b = b.$$

Максимальная интенсивность света имеет место, когда пропускание обоих транспарантов равно 1.

6. Операция дизъюнкции выполняется в соответствии с равенством (4.b), выражающим дизъюнкцию через конъюнкцию

$$a \vee b = N(N(a) \wedge N(b)) = N(\tau_a \cdot \tau_b). \quad (5)$$

Таким образом, для того, чтобы вычислить дизъюнкцию операндов a и b , необходимо перемножить их отрицания, т.е. последовательно просветить два транспаранта τ_b и τ_a , пропускания которых равны значениям отрицания операндов a и b

$$\tau_a = N(a),$$

$$\tau_b = N(b)$$

и к результату умножения снова применить операцию отрицания.

7. Используя классические семантические правила (правила исчисления истинности сложного высказывания) для многозначной логики, получим приведенную в таблице 1 реализацию логических операторов оптической схемой на Рис.2.

Таблица 1. Реализация операторов многозначной логики оптической схемой на Рис. 2. τ_a и τ_b - пропускания транспарантов.

Логическая связка	Формула	Пропускание транспарантов		Результат измерений	Дополнительная обработка результата измерений
		τ_a	τ_b		
Конъюнкция	$a \wedge b$	$\tau_a = a$	$\tau_b = b$	$I = a \wedge b$	Не требуется
Дизъюнкция	$a \vee b = N(N(a) \wedge N(b))$	$\tau_a = N(a)$	$\tau_b = N(b)$	$I = N(a) \wedge N(b)$	$N(I) = N(N(a) \wedge N(b))$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

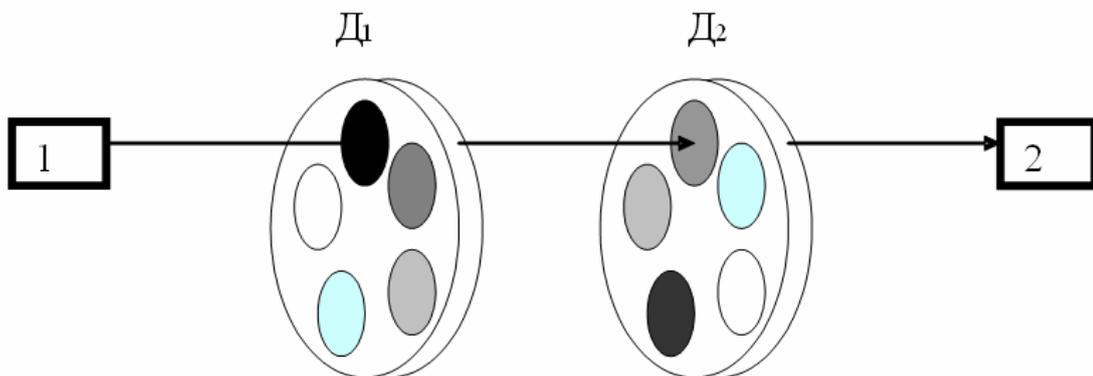


Рис.2.Схема экспериментальной установки. 1 – источник излучения (лазер), D_1 и D_2 – диски в окна которых установлены транспаранты (в качестве транспаранта с единичным пропусканием используется окно диска без транспаранта), 2 – приемник излучения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с элементами оптической схемы.
2. Включить лазер и выставить фотодиод, а также рабочие окна дисков D_1 и D_2 по оси системы, определяемой лучом лазера.
3. Выставить на оси свободные от транспарантов окна дисков D_1 и D_2 (окна №7) и измерить мультиметром ток фотодиода, величина которого пропорциональна интенсивности источника излучения I_{Max} . В дальнейшем это значение будет использоваться для нормировки всех измеренных значений.
4. Поочередно выставляя на оптической оси каждое из окон дисков D_1 и D_2 , измерить интенсивности I_{ij} тока фотодиода. Результаты измерений представить в относительных единицах в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений интенсивности излучения, прошедшего через рабочие окна дисков D_1 и D_2

$D_2 \backslash D_1$	Окно 1	Окно 2	Окно 3	Окно 4	Окно 5	Окно 6	Окно 7
Окно 1	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}	I_{17}
Окно 2	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{27}
Окно 3	I_{31}	I_{32}	I_{33}	I_{34}	I_{35}	I_{36}	I_{37}
Окно 4	I_{41}	I_{42}	I_{43}	I_{44}	I_{45}	I_{46}	I_{47}
Окно 5	I_{51}	I_{52}	I_{53}	I_{54}	I_{55}	I_{56}	I_{57}
Окно 6	I_{61}	I_{62}	I_{63}	I_{64}	I_{65}	I_{66}	I_{67}
Окно 7	I_{71}	I_{72}	I_{73}	I_{74}	I_{75}	I_{76}	I_{77}

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Используя данные таблицы 2, рассчитать пропускание τ_{ij} каждого сочетания окон дисков D_1 и D_2 по формуле

$$\tau_{ij} = \frac{I_{ij}}{I_{Max}}, \quad I_{Max} = I_{77},$$

где i – номер окна диска D_1 , j – номер окна диска D_2 .

Данные внести в таблицу 3.

Пропускания транспарантов диска D_1 задают значения операнда А, диска D_2 операнда В.

2. Построить 2-D поверхность значений конъюнкции, как функции значений операндов А и В. Значения операнда А, задано значениями τ_{i7} , $i = 1, \dots, 7$, значения операнда В значениями τ_{7j} , $j = 1, \dots, 7$.
3. Для реализации операции дизъюнкции, пользуясь таблицей 3 и графиком Рис.1 (график Рис. 1. используется для обработки результатов измерений – вычисления отрицания измеренного значения), определить значения операндов А и В и их дизъюнкции. Значения операнда А, заданы значениями $N(\tau_{i7})$, $i = 1, \dots, 7$, значения операнда В значениями $N(\tau_{7j})$, $j = 1, \dots, 7$. Результаты занести в таблицу 4. Построить 2-D поверхность дизъюнкции, как функции значений операндов А и В.

Таблица 3. Данные расчета τ_{ij} для построения логической операции конъюнкции операндов А и В.

$B \backslash A$	Окно 1	Окно 2	Окно 3	Окно 4	Окно 5	Окно 6	Окно 7
Окно 1	τ_{11}	τ_{12}	τ_{13}	τ_{14}	τ_{15}	τ_{16}	τ_{17}
Окно 2	τ_{21}	τ_{22}	τ_{23}	τ_{24}	τ_{25}	τ_{26}	τ_{27}
Окно 3	τ_{31}	τ_{32}	τ_{33}	τ_{34}	τ_{35}	τ_{36}	τ_{37}
Окно 4	τ_{41}	τ_{42}	τ_{43}	τ_{44}	τ_{45}	τ_{46}	τ_{47}
Окно 5	τ_{51}	τ_{52}	τ_{53}	τ_{54}	τ_{55}	τ_{56}	τ_{57}

Окно 6	τ_{61}	τ_{62}	τ_{63}	τ_{64}	τ_{65}	τ_{66}	τ_{67}
Окно 7	τ_{71}	τ_{72}	τ_{73}	τ_{74}	τ_{75}	τ_{76}	τ_{77}

Таблица 4. Данные расчета $N(\tau_{ij})$ для построения логической операции дизъюнкции операндов А и В.

$A \backslash B$	Окно 1	Окно 2	Окно 3	Окно 4	Окно 5	Окно 6	Окно 7
Окно 1	$N(\tau_{11})$	$N(\tau_{12})$	$N(\tau_{13})$	$N(\tau_{14})$	$N(\tau_{15})$	$N(\tau_{16})$	$N(\tau_{17})$
Окно 2	$N(\tau_{21})$	$N(\tau_{22})$	$N(\tau_{23})$	$N(\tau_{24})$	$N(\tau_{25})$	$N(\tau_{26})$	$N(\tau_{27})$
Окно 3	$N(\tau_{31})$	$N(\tau_{32})$	$N(\tau_{33})$	$N(\tau_{34})$	$N(\tau_{35})$	$N(\tau_{36})$	$N(\tau_{37})$
Окно 4	$N(\tau_{41})$	$N(\tau_{42})$	$N(\tau_{43})$	$N(\tau_{44})$	$N(\tau_{45})$	$N(\tau_{46})$	$N(\tau_{47})$
Окно 5	$N(\tau_{51})$	$N(\tau_{52})$	$N(\tau_{53})$	$N(\tau_{54})$	$N(\tau_{55})$	$N(\tau_{56})$	$N(\tau_{57})$
Окно 6	$N(\tau_{61})$	$N(\tau_{62})$	$N(\tau_{63})$	$N(\tau_{64})$	$N(\tau_{65})$	$N(\tau_{66})$	$N(\tau_{67})$
Окно 7	$N(\tau_{71})$	$N(\tau_{72})$	$N(\tau_{73})$	$N(\tau_{74})$	$N(\tau_{75})$	$N(\tau_{76})$	$N(\tau_{77})$

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Оцените, как изменяется значение истинности в результате операций конъюнкции и дизъюнкции относительно значений истинности операндов Im_A и Im_B (истинность возрастает, уменьшается, не изменяется?)

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое неклассические логики? В каком смысле они неклассические? Какие неклассические логики Вы знаете?
2. Что такое истинностное отображение?
3. Дайте определение логической операции отрицания. Какой реальный физический процесс может быть описан операцией отрицания?
4. Удовлетворяет ли зависимость, приведенная на Рис.1, определению инволюции?

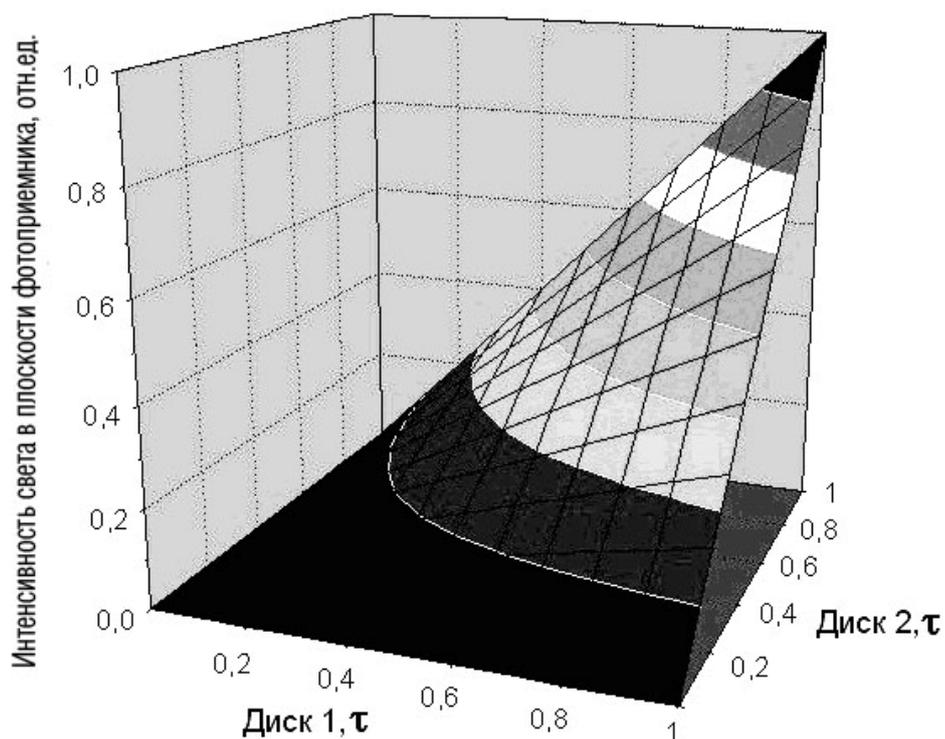


Рис.3.Графическая интерпретация логической операции конъюнкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новак В., Перфильева И., Мочкорж И., Математические принципы нечеткой логики // Новак В., Перфильева И., Мочкорж И. – Пер.с англ. М., Физматлит, 2006. – 352 с.
2. Э. Трильяс, К. Альсина, А. Вальверде. Нужны ли в теории нечетких множеств операции MAX, MIN и $1-j$? / В кн. «Нечеткие множества и теория возможностей» под ред. Р.Р. Ягера. – М.: 1986.-С. 199-228.
3. Г. Биркгоф. Теория решеток. – М.:Наука, 1984.- 568с.
4. W.M. Faucett, «Compact Semigroup Irreducibly Connected between Two Idempotents», Proc. Math. Soc. 6(1955). 741-747.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ

Кафедра фотоники и оптоинформатики создана в 2002 году и работает под руководством лауреата премии Ленинского комсомола по науке и технике профессора С.А.Козлова. Одной из важнейших задач кафедры является организация учебного процесса и подготовка специалистов по оптоинформатике – стремительно развивающейся новой области науки и техники, в которой разрабатываются оптические технологии сверхбыстрой передачи, обработки и записи информации, создаются быстродействующие оптические компьютеры и системы искусственного интеллекта. Разработка таких оптических информационно-телекоммуникационных технологий, представляющих собой информационные технологии нового поколения, является приоритетным направлением развития российской науки, техники и технологий.

В рамках образовательного направления 200600 студентам читаются лекционные курсы по оптической физике, теории информации и кодирования, архитектуре вычислительных систем, технологии программирования, цифровым оптическим вычислениям, оптическим технологиям искусственного интеллекта, голографическим системам записи и отображения информации, другим актуальным проблемам оптоинформатики, а также по квантовой информатике. Эти лекционные курсы поддержаны эксклюзивными учебно-исследовательскими экспериментальными практикумами

Научные подразделения кафедры:

- Проблемная лаборатория волновых процессов, основная задача которой – организация научного руководства студентами и аспирантами молодежной научной ассоциации «Оптика-XXI век», руководитель: д.ф.м.н., проф.С.А.Козлов.
- Научно-образовательный центр фемтосекундной оптики и фемтотехнологий – руководитель: д.ф.м.н., проф.В.Г.Беспалов.
- Лаборатория параллельных вычислений, нанофотоники и оптоинформатики – руководитель: д.ф.м.н., проф.Н.Н.Розанов.
- Лаборатория квантовой информатики – руководитель: к.ф.м.н., доцент С.А.Чивилихин.
- Лаборатория прикладной голографии – руководитель: к.ф.м.н., доцент О.В.Андреева

На кафедре сформирована признанная научно-педагогическая школа по фемтосекундной оптике и фемтотехнологиям – руководители: д.ф.м.н., проф. С.А.Козлов и д.ф.м.н., проф. В.Г.Беспалов.

Среди студентов и аспирантов кафедры – стипендиаты Президента и Правительства Российской Федерации, победители конкурсов научных работ, проводимых Российской Академией наук, крупнейшими мировыми научными обществами, такими как INTAS (Фонд научно-исследовательских работ Европейского сообщества), SPIE (Международное общество инженеров-оптиков), CRDF (Американский фонд гражданских исследований и развития), OSA (Оптическое общество Америки).

Кафедра фотоники и оптоинформатики постоянно занимает призовые места по итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов Университета ИТМО.

Учебное пособие
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОПТОИНФОРМАТИКЕ

Авторы: Ольга Владимировна Андреева
Александр Александрович Парамонов
Александр Владимирович Павлов
Сергей Васильевич Артемьев
Наталья Владимировна Ионина
Андрей Сергеевич Златов
Виталий Николаевич Крылов

В авторской редакции
Компьютерная верстка
Дизайн
Зав. РИО

А.А.Кулешов
А.А.Кулешов
Н.Ф.Гусарова

Подписано к печати
Отпечатано на ризографе

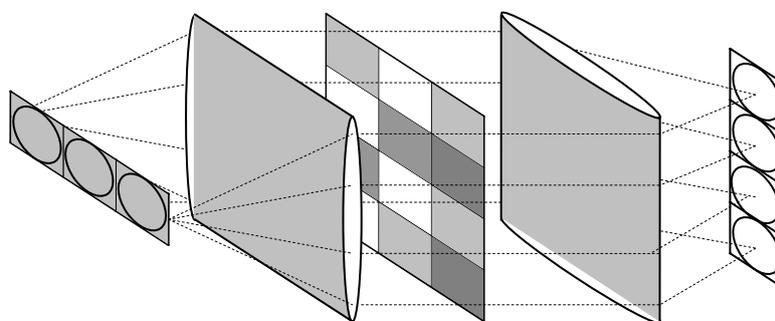
00.11.2008
Заказ № 1474. Тираж 100

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49



**О.В.Андреева, А.А.Парамонов, А.В.Павлов, С.В.Артемьев,
В.Н.Крылов, Н.В.Ионина, А.С.Златов**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОПТОИНФОРМАТИКЕ



Санкт-Петербург

2008

