

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

О.В. Андреева, Н.В. Андреева, П.А. Вовина, А.В. Возианова,
А.А. Парамонов, Н.В. Петров, О.А. Смолянская, М.К. Ходзицкий

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2013

О.В. Андреева, Н.В. Андреева, П.А. Вовина, А.В. Возианова, А.А. Парамонов, Н.В. Петров, О.А. Смолянская, М.К. Ходзицкий. Физические основы оптоинформатики. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 87 с.

В пособии представлены учебно-методические материалы по дисциплине «Физические основы оптоинформатики», необходимые для подготовки по всем разделам данной дисциплины. Даны материалы лекционного курса, а также описания лабораторных работ с кратким изложением теоретических основ изучаемых процессов и явлений.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 200700 «Фотоника и оптоинформатика», а также для студентов оптических и информационных специальностей смежных направлений.

Рекомендовано к печати на заседании Ученого совета факультета фотоники и оптоинформатики, протокол № 9 от 28 ноября 2013 г.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© О.В. Андреева, Н.В. Андреева, П.А. Вовина, А.В. Возианова, А.А. Парамонов, Н.В. Петров, О.А. Смолянская, М.К. Ходзицкий, 2013

Содержание

| | |
|--|----|
| Предисловие | 4 |
| <i>Лабораторная работа №1</i> «Исследование основных параметров полупроводникового лазера».. | 12 |
| <i>Лабораторная работа №2</i> «Волоконно-оптический световод как среда передачи информации».. | 26 |
| <i>Лабораторная работа №3</i> «Дифракция монохроматического излучения на пропускающей решетке» | 40 |
| <i>Лабораторная работа №4</i> «Получение изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка».. | 50 |
| Приложение 1..... | 64 |
| Приложение 2..... | 81 |
| Информация о кафедре фотоники и оптоинформатики..... | 85 |

Предисловие

Оптоинформатика — область науки и техники, связанная с исследованием, разработкой, созданием и эксплуатацией новых материалов, методов, приборов и устройств, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации на основе оптических технологий, с использованием светового фотона в качестве материального носителя информации [1]. Основное направление развития оптоинформатики – разработка технологий, обеспечивающих создание глобального информационного пространства для удовлетворения запросов современного общества. На практике решение данной задачи требует миниатюризации и интеграции оптических элементов, разработки и совершенствования технических устройств, ответственных за работу с информацией, создания многофункциональных оптических материалов, элементов и систем.

Начиная с середины прошлого века, значение информации в жизни общества постоянно увеличивается. Запросы развивающегося информационного общества требуют роста технологий, способных обеспечить поддержание темпов совершенствования средств связи, устройств обработки информации. Современная микроэлектроника, используемая для этих целей, во многих аспектах приближается к своим предельным возможностям. Следующим закономерным этапом развития данной области является использование оптических технологий, поскольку оптическое излучение обладает более высокой частотой колебаний, распространяется со скоростью света, а закодированные в нем сигналы могут представляться и параллельно обрабатываться не в одном, а в двух или трех измерениях в виде изображений или голограмм. Эти, и ряд других особенностей оптических технологий делают развитие оптоинформатики чрезвычайно актуальной задачей.

Цель данного курса заключается в ознакомлении лишь с основными понятиями, лежащими в основе физических принципов работы систем оптической обработки сигналов, систем связи, и их отдельных компонентов. Рассматриваются именно физические основы. Более сложные схемные решения устройств оптоинформатики, принципы работы оптических компьютеров рассматриваются в расширенном курсе «Основы оптоинформатики» [1]. К физическим основам оптоинформатики в первую очередь стоит отнести устройство и принцип работы лазеров, полупроводниковой

оптоэлектроники, основные явления распространения света, взаимодействие оптического излучения с веществом, принципы волоконной оптики и голографии. Данные вопросы рассматриваются в курсе лекций.

Острая потребность человечества в совершенствовании технологий обработки и передачи информации, стимулирует громадное количество исследований нацеленных на решение непосредственных задач оптоинформатики. Происходит процесс накопления новых знаний, изучение физических принципов явлений, которые впоследствии могут быть использованы для создания более совершенных средств связи, полностью оптических процессоров, и сопутствующей им периферии функционирующей в микро и нано масштабах. Среди достижений в этой области наиболее яркими примерами являются: явление квантовой запутанности, позволившее реализовать передачу информации с помощью квантовой телепортации, создание фотонных структур с запрещенными зонами, позволяющими управлять распространением света в веществе, получение конденсата Бозе-Эйнштейна и проведение опыта по интерференции атомов, разработка метаматериалов, которые способны усиливать нелинейные оптические свойства различных сред и позволяют передавать изображения с разрешением, превосходящим длину волны. Знакомство с достижениями в этой области проходит на практических занятиях, организованных в форме семинаров.

Краткое содержание лекций

Здесь приведен минимальный перечень вопросов, рассматриваемых в ходе лекционных занятий. Для ознакомления с основными понятиями в скобках приведен номер источника из списка литературы, где данный вопрос изложен в достаточно доступной форме. Для удобства, указаны также номера страниц.

- Постулаты Бора. Основные положения лазерной физики [2, стр. 216-218].
- Вывод соотношений между коэффициентами Эйнштейна, их физический смысл [3, стр. 10-13, 34-38].
- Спонтанные и вынужденные переходы [3, стр. 219-221].
- Усиление (поглощение) излучения в квантовой системе [3, стр. 13-15].
- Три условия лазерной генерации. Принцип действия и устройство лазера [2, стр. 221-225].
- Трех- и четырехуровневая схемы накачки и лазерной генерации [2, стр. 15-18].
- Типы лазерных резонаторов [2, стр. 160-165]. Моды лазерного резонатора [3, 187-189].
- Электроны и дырки в полупроводниках [4, стр. 28-35]. Полупроводники с примесной проводимостью [4, стр. 35-39].
- Уровень Ферми [2, стр. 405-406; 5, стр. 21-23, 26-27]. Квазиуровни Ферми [2, стр. 407].
- Устройство и работа простейшего полупроводникового лазера [2, стр. 409-412; 5, стр. 359-361].
- Полупроводниковые лазеры с гетероструктурами [2, стр. 412-420; 5, стр. 361-365].
- Понятие о квантово-размерной структуре. Получение квантово-размерных структур. Лазеры на квантовых ямах [6].
- Интерференция. Сложение когерентных волн [7 стр. 200-206].
- Дифракция. Принцип Гюйгенса-Френеля [7, стр. 267-278].
- Дифракция Френеля и Фраунгофера [7, стр. 284-296].
- Вид картины дифракции в зоне Фраунгофера [7, стр. 284-294].
- Дифракционный предел. Разрешающая способность оптических приборов [7, стр. 365-377].
- Гауссовы пучки. [7, стр. 297-304].

- Дифракционные решетки [7, стр. 305-312].
- Голография.

Голография (от греч. *holos grapho* – полная запись) – набор технологий для точной записи и воспроизведения волновых полей. В настоящее время голография получила большое распространение. Голограммы появляются на кредитных картах, деньгах, и акцизных марках, про голографию упоминают в телепередачах, художественных произведениях и кино. Первоначально, изобретатель голографии Денис Габор хотел лишь улучшить электронный микроскоп (на тот момент прибор, обладающий самой высокой разрешающей способностью) для того, чтобы увидеть изображение атомной решетки. В 1947 году, электронные микроскопы были ограничены разрешением 12 \AA , хотя теоретический предел составлял 5 \AA . Добиться теоретического предела разрешения мешала используемая в конструкции электронного микроскопа электронная линза, поэтому Габор размышлял о волновой природе света, и фотографическом способе записи интенсивности света [8]. Он предположил, что фаза световой волны также можно зарегистрировать. Для этого нужна опорная волна, с которой сравнивается фаза волны, исходящей от объекта. Интерференция опорной и предметной волн будут создавать полосы с максимумами, когда волны находятся в фазе, и с минимумами, когда полосы в противофазе. Эти полосы можно записать на фотопленку. Если потом фотопленку осветить той же самой опорной волной, то в результате дифракции на структуре записанных интерференционных полос возникнет в точности такой же волной фронт, как если бы его испустил сам объект. С помощью дуговой ртутной лампы, использовавшейся в качестве источника справочной и объекта, расположенного на оптической оси, Габору удалось воспроизвести зернистое двумерное изображение. К сожалению, Габор был впереди своего времени. Он предложил конструкцию голографического электронного микроскопа, в котором качество изображения сильно страдало от недостаточной когерентности электронных волн.

Стать голографии такой, какой мы знаем ее по фантастическим романам и художественным фильмам помогло открытие, сделанное выпускником Ленинградского института точной механики и оптики Юрием Николаевичем Денисюком. Разработав все необходимое оборудование для проведения экспериментов по записи и изучению свойств трехмерных голограмм, подслонной подготовки пластинок к поливу эмульсионных слоев, в декабре 1959 года [9] он записал

голограмму сферического зеркала. Своей работой он показал, что объемная фотографическая модель картины стоячей волны способна воспроизвести точные значения фазы, амплитуды и спектрального состава объектной волны, причем в качестве опорной волны при восстановлении может быть использован некогерентный белый свет. Предложив и обосновав теоретически и экспериментально свой метод трехмерной записи голограмм, или голографии в трехмерных средах, Ю.Н. Денисюк, в отличие от своего предшественника Д. Габора, показал, что информацию о форме и свойствах освещаемого предмета содержит не только плоская теневая проекция объекта с двумя присущими ей пространственными измерениями, но и все трехмерное пространство, которое окружает объект.

Широкое практическое применение голография нашла только после изобретения лазера в 1960, который давал направленный монохроматический свет. Сразу после этого, в 1962 году Эммет Лейт и Юрис Упатниекс предложили внеосевую схему записи голограмм [10].

Одним из наиболее перспективных технологических применений голографии является возможность использовать трехмерные голограммы для записи и хранения большого количества информации. Путем простого изменения угла или конфигурации опорного пучка, может быть записано и впоследствии считано множество «страниц» данных, размер которых превышает терабайты.

Содержание семинаров

Темы, рассматриваемые на семинарах, жестко не регламентированы, и каждый год отбираются в начале курса исходя из опубликованных в последнее время обзоров в области фотоники, которые были опубликованы в передовых мировых научных изданиях, таких как «Nature», «Science». В рамках данного пособия кратко рассмотрим, так называемые «краеугольные камни фотоники» (оригинальное название «Nature milestones: photons [11]»). «Nature milestones» – специальные образовательные материалы, выпущенные передовым научным издательством «Nature» с целью обозначить наиболее важные достижения в определенной области науки. Информация о каждом научном открытии оформляется в виде краткой заметки, в которой даются общие сведения о нем, а в списке литературы приводятся несколько ключевых статей, отражающих, как развивалась идея конкретного открытия. К 50-летию создания лазера был подготовлен выпуск «Nature milestones: photons», в котором

представлены краткие систематические описания открытий, связанных с изучением природы света, начиная с 17 века. Многие из фундаментальных понятий, связанных со светом, основаны на его описании в виде электромагнитной волны, представлении его в виде «единиц» - фотонов.

Изучение свойств света способствовало появлению фундаментальных научных открытий, среди которых и создание квантовой физики, и появление лазера, открытий, связанных с зарождением современных телекоммуникаций. Всего для данного издания было отобрано 23 темы, которые позволяют получить представление о текущем состоянии фотоники и о грядущих открытиях в данной области.

В таблице 1 представлена хронология открытий:

| № | Год | Описание |
|----------|------------|---|
| 1. | 1600-1800 | Споры о природе света |
| 2. | 1861 | Уравнения Максвелла |
| 3. | 1900 | Планковская теория излучения черного тела |
| 4. | 1905 | Специальная теория относительности Эйнштейна |
| 5. | 1923 | Эффект Комптона |
| 6. | 1947 | Квантовая электродинамика |
| 7. | 1948 | Голография |
| 8. | 1954 | Солнечные батареи |
| 9. | 1960 | Лазер |
| 10. | 1961 | Нелинейная оптика |
| 11. | 1963 | Квантовая оптика |
| 12. | 1964 | Неравенства Белла |
| 13. | 1966 | Оптическое волокно |
| 14. | 1970 | Камеры на приборах с зарядовой связью |
| 15. | 1970 | Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах |
| 16. | 1981 | Высокоразрешающая лазерная спектроскопия и частотная метрология |
| 17. | 1982-1985 | Квантовая информатика |
| 18. | 1987 | Фотонные кристаллы |
| 19. | 1993 | Синий фотодиод |
| 20. | 1998 | Плазмоника |
| 21. | 2000 | Метаматериалы |
| 22. | 2001 | Освоение аттосекундного диапазона |
| 23. | 2006 | Оптомеханика резонаторов |

Естественно, такая подборка открытий в оптике не является исчерпывающей. В случаях, когда хотят выделить из данного перечня всего три, самых основных события в оптике XX века, как правило, говорят о создании лазеров – источников высококогерентного и одновременно мощного излучения оптического диапазона (1); нелинейной оптике как результата действия такого излучения на вещество (2) и оптической голографии как наиболее полного способа регистрации пространственно-временных характеристик волновых полей различной природы (3) [9].

Из 23 приведенных в таблице 1 краеугольных камней фотоники многие, так или иначе, оказали влияние на развитие технологий, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации. В первую очередь к оптоинформатике относятся:

- *Фотонные кристаллы* – диэлектрические среды с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, период которых соизмерим с длиной волны электромагнитного излучения, что приводит к образованию фотонных запрещенных зон. Если излучение с частотой запрещенной зоны было сгенерировано внутри такого фотонного кристалла, то оно не может распространяться в нём, если же такое излучение посылается извне, то оно просто отражается от фотонного кристалла.

- *Создание метаматериалов* – искусственных композитных пространственно-периодических сред, в которых электрический и магнитный отклики существенно отличаются от отклика составляющих метаматериал сред. Метаматериалы обладают экзотическими электромагнитными свойствами, которые нельзя встретить у доступных в природе материалов, например, отрицательным показателем преломления. Характерной чертой метаматериалов является способность контролировать процессы распространения, отражения и рассеяния электромагнитных волн, что имеет большое значение для оптоинформатики.

- *Образование нового раздела нанофотоники – плазмоники* – области науки, которая описывает, каким образом электромагнитные поля могут быть ограничены размерами порядка или меньше длины волны. Она основана на процессах взаимодействия электромагнитного излучения и электронов проводимости на металлических поверхностях или в небольших металлических наноструктурах, что позволяет превзойти

дифракционный предел классической оптики, и работать в оптическом ближнем поле с суб-волновыми размерами. Плазмоника делает возможной миниатюризацию фотонных цепей до размеров современной электроники.

Основная литература:

1. Беспалов В. Г., Крылов В. Н., Михайлов В. Н. Основы оптоинформатики. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008 г., 204 с.
2. Звелто О. Принципы лазеров М. Мир. 1990. Пер. с англ. 560 с.
3. Ахманов С. А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. 2-е издание. М. Наука. 2004. 656 с.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 9. Квантовая механика II. Пер. с англ. М. Мир 1967. 259 с.
5. Гуртов В. А. «Твердотельная электроника», М., Техносфера, 2005 г. 506 с.
6. Демиховский В. Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? \ \ Соросовский образовательный журнал. № 7, 1997. с. 80-86.
7. Бутиков. Е. И. Оптика. М. Высш. шк. 1986, 512 с.

Дополнительная литература:

8. Gabor, D. A new microscopic principle. Nature. Vol. 161, 1948. p. 777-778.
9. Стаселько. Д. И. Юрий Николаевич Денисюк – основоположник трехмерной оптической голографии. Как это было. К пятидесятилетию открытия физического явления Электронный ресурс. URL: <http://3d-holography.ru/denisukdiary> (Дата обращения 27.11.2012)
10. Leith, E. N., Upatnieks, J. Reconstructed wavefronts and communication theory. J. Opt. Soc. Am. Vol. 52, 1962. p. 1123–1130.
11. Nature milestones: photons. Электронный ресурс. URL: <http://www.nature.com/milestones/milephotons/index.html> (Дата обращения 27.11.2013)

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 p-n 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.

Энергия Ферми системы невзаимодействующих фермионов — это увеличение энергии основного состояния системы при добавлении одной частицы. Это эквивалентно химическому потенциалу системы в ее основном состоянии при абсолютном нуле температур. Это может также интерпретироваться как максимальная энергия фермиона в основном состоянии. Фермионы — частицы с полуцелым спином, обычно $1/2$, такие как электроны — подчиняются принципу

запрета Паули, согласно которому две одинаковые частицы не могут занимать одно и то же квантовое состояние. Следовательно, фермионы подчиняются статистике Ферми — Дирака. Основное состояние невзаимодействующих фермионов строится, начиная с пустой системы и постепенного добавления частиц по одной, последовательно заполняя состояния в порядке возрастания энергии. Когда необходимое число частиц достигнуто, энергия Ферми равна энергии самого высокого заполненного состояния (или самого низкого незанятого состояния; различие не важно, когда система является макроскопической). Поэтому энергию Ферми называют также уровнем Ферми.

На рис.1. 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 p-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).

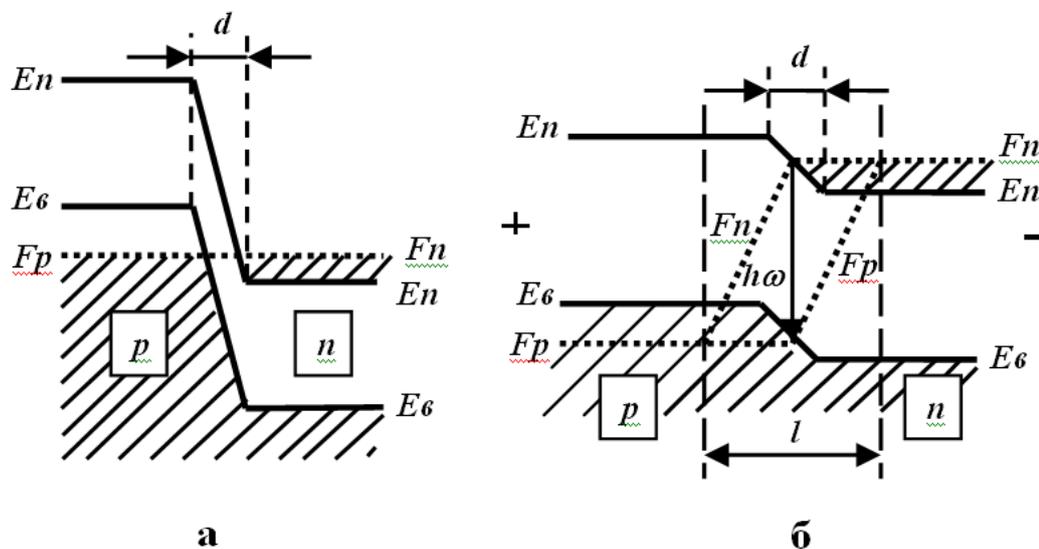


Рис.1. Энергетическая диаграмма инжекционного полупроводникового лазера: p-n переход без приложенного внешнего напряжения (а); p-n переход при приложении внешнего напряжения в прямом направлении (б). d - ширина p-n перехода, l - реальная ширина области, обеспечивающей работу лазера.

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 $h\nu$. По такому принципу работает светодиод. Если для этих фотонов создать обратную положительную связь в виде оптического резонатора, то в области р-п 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 р-п перехода. Эти плоскости делаются параллельными и полируются с высокой степенью точности. Выходную поверхность можно рассматривать как щель, через которую проходит излучение. Угловая расходимость излучения лазера определяется дифракцией излучения на этой щели. При толщине р-п перехода в 20 мкм и ширине – 120 мкм, угловая расходимость соответствует приблизительно 6° в плоскости XZ и 1° – в плоскости YZ.

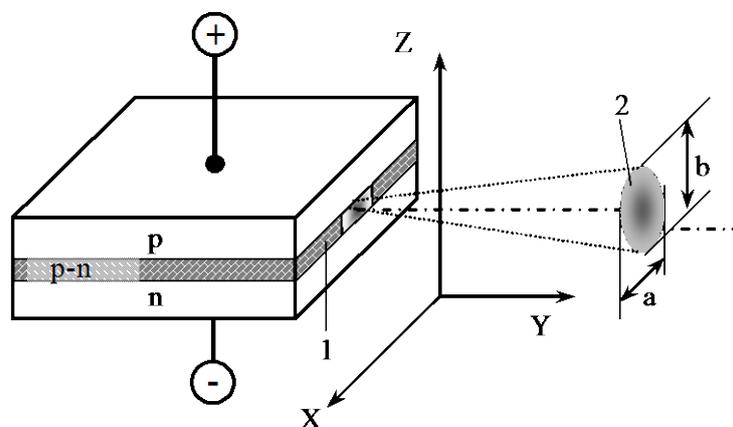


Рис.2. Принципиальная схема лазера на р-п переходе. 1-область р-п перехода (активный слой); 2-сечение лазерного пучка в плоскости XY.

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 энергетическая схема – на рис. 4.

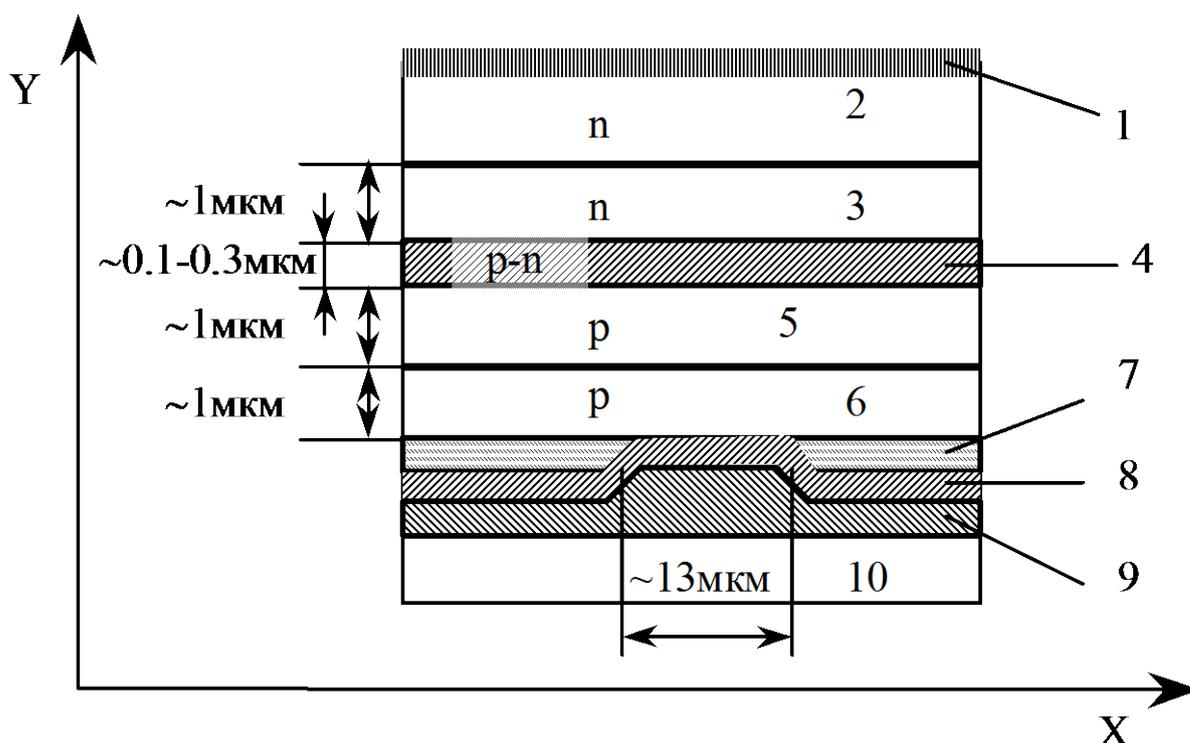


Рис.3. Полупроводниковая двойная гетероструктура. 1-проводящий металлизированный слой для создания электрического контакта; 2-слой GaAs (n); 3-слой $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (n); 4-слой, соответствующий зоне инжекции носителей заряда (p-n-переход); 5-слой $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (p); 6-слой GaAs (p); 7-непроводящий 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.

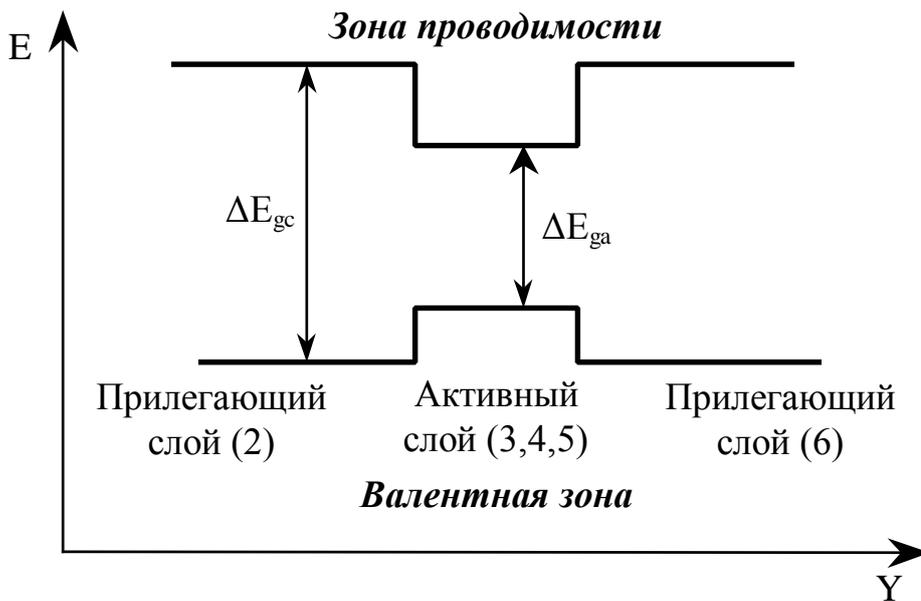


Рис.4. Энергетическая схема двойной гетероструктуры, ось Y и номера слоёв соответствуют рис.3. ΔE_{gc} -ширина запрещённой зоны; ΔE_{gv} -ширина запрещённой зоны p-n-перехода.

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

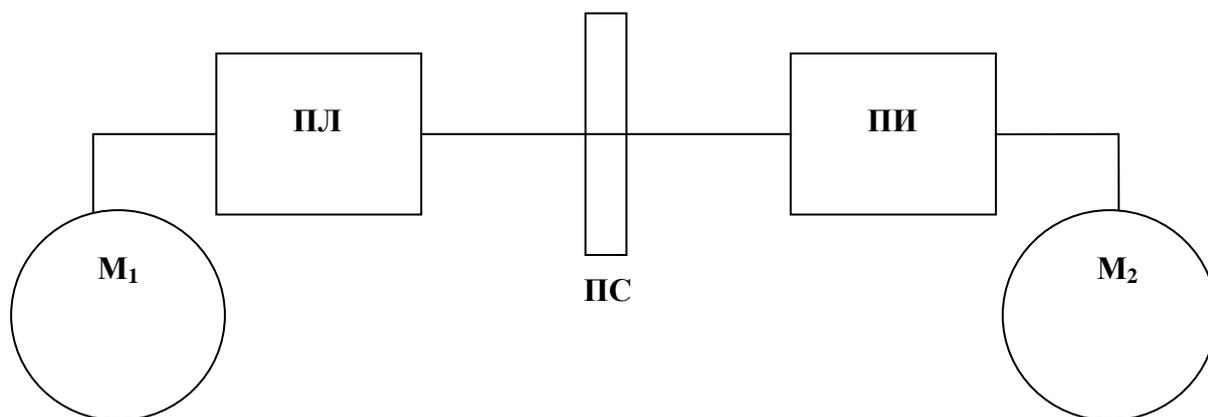


Рис.5. Блок-схема экспериментальной установки. ПЛ - полупроводниковый лазер, ПС – поляризационный светофильтр, ПИ – приемник излучения, M_1 и M_2 - измерительные приборы (мультиметры).

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 T . Напряжение от источника питания (лабораторная сеть электропитания 4,5 В или батарея аккумуляторов 4,8 В) через сопротивления R_1 и $R_{П}$ подается на лазерный модуль, при этом через р-п переход протекает ток I_{pn} , регулировка которого осуществляется потенциометром $R_{П}$.

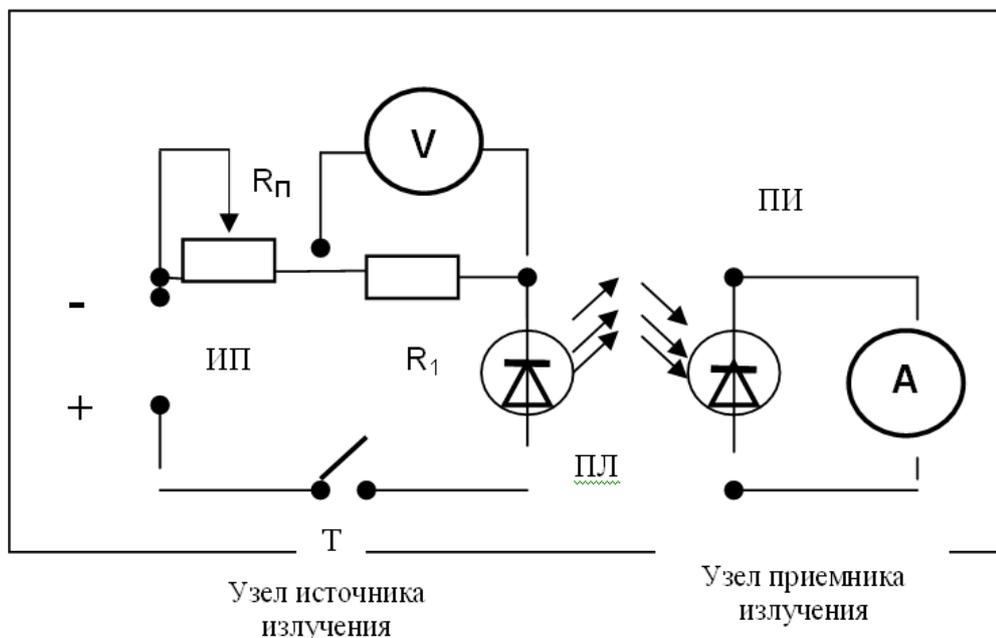


Рис.6. Электрическая схема установки для исследования зависимости интенсивности излучения полупроводникового лазера от величины тока, протекающего через р-п переход. ПЛ – полупроводниковый лазер, ПИ – приёмник излучения, ИП – источник питания постоянного тока 4,5 В; R_1 – постоянное сопротивление, $R_{п}$ - 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 ($U_{ПЛ}$), который включен последовательно с р-п переходом, а значение $I_{рп}$ вычисляется по закону Ома. Регулировка $I_{рп}$ производится потенциометром $R_{п}$ (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 ($I_{ПИ}$). В данных условиях эксперимента величина $I_{ПИ}$ прямо пропорциональна интенсивности лазерного излучения (поток излучения). Типичная зависимость

интенсивности лазерного излучения от величины тока, протекающего через р-п переход, приведена на рис. 7.

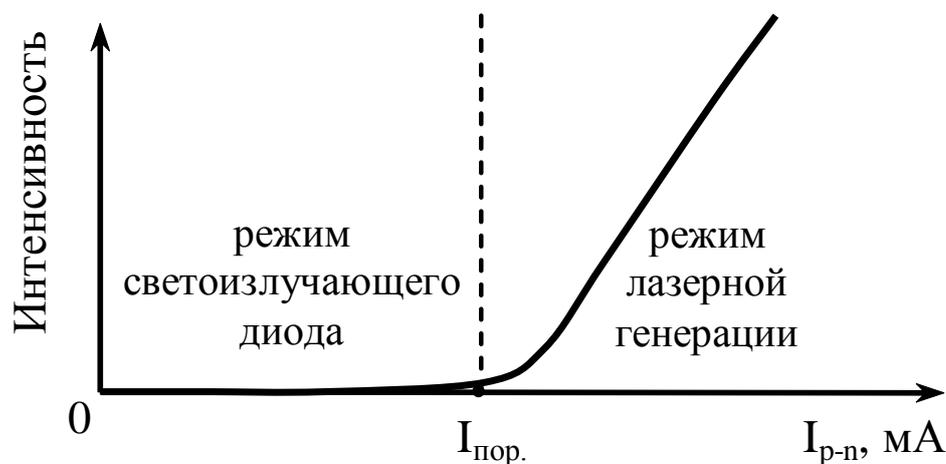


Рис.7. Зависимость интенсивности излучения лазера от тока, протекающего через р-п переход. $I_{пор.}$ — величина порогового тока.

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 $R_{П}$ (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 $R_{П}$ снять показания прибора M_1 ($U_{ПД}$) и показания прибора M_2 ($I_{ФП}$) 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.

| № | $U_{\text{ПЛ}}, \text{мВ}$ (Прибор M_1) | $I_{\text{рп}}, \text{мА}$ | $I_{\text{ПИ}}, \text{мкА}$ (Прибор M_2) |
|-----|---|----------------------------|--|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| ... | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

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

$$I_{\text{рп}} = U_{\text{ПЛ}} / R_1 \quad (1).$$

Результаты вычислений занести в таблицу 1.

2. Построить график зависимости $I_{\text{ПИ}}$ от $I_{\text{рп}}$.

3. Определить величину порогового тока – $I_{\text{пор}}$

4. Определить коэффициенты ($k_{\text{св}}$ и $k_{\text{лаз}}$), характеризующие изменение интенсивности излучения в светодиодном и лазерном режимах работы модуля, используя аппроксимацию каждого режима прямой линией

$$I_{\text{ПИ}} = k I_{\text{рп}} \quad (2),$$

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.

Поляризация волн — характеристика поперечных волн, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. В продольной волне поляризация возникнуть не может, так как направление колебаний в этом типе волн всегда совпадают с направлением распространения. Поперечная волна характеризуется двумя направлениями: волновым вектором и вектором амплитуды, всегда перпендикулярным к волновому вектору. Волновой вектор показывает направление распространения волны, а вектор поляризации представляет собой вектор напряженности электрического поля. Так что в трёхмерном пространстве имеется ещё одна степень свободы — вращение вокруг волнового вектора. Причиной возникновения поляризации волн может быть: несимметричная генерация волн в источнике возмущения; анизотропность среды распространения волн; преломление и отражение на границе двух сред. В общем случае для гармонических волн конец вектора колеблющейся величины описывает в плоскости, поперечной направлению распространения волны, эллипс, и такая поляризация называется эллиптической. Важными частными случаями являются линейная поляризация, при которой колебания возмущения происходят в какой-то одной плоскости, в таком случае говорят о «плоско-поляризованной волне», и круговая или циркулярная поляризация, при которой конец вектора амплитуды описывает окружность в плоскости колебаний, круговая поляризация в зависимости от направления вращения вектора может быть правой или левой.

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 (P) 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 p-n 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 (P) от тока через p-n переход.

| № | $U_{ПЛ}$, мВ (Прибор M_1) | I_{pn} , мА | $I_{ПИ}$, мкА (Прибор M_2) | | $P=(I_{max}-I_{min})/I_{max}$ |
|-----|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|
| | | | I_{max} | I_{min} | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| ... | | | | | |

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитать значения I_{pn} и P, заполнив таблицу 2.
2. По полученным данным построить график зависимости P 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. А.И. Ансельм. «Введение в теорию полупроводников», СПб., Лань, 2008 г.
6. Г.Г. Зегря, В.И. Перель. «Основы физики полупроводников», СПб., Лань, 2009 г.

7. К.В. Шалимова. «Физика полупроводников», СПб., Лань, 2010 г.

8. А.М.Сомов, В.В. Старостин, С.Д.Бенеславский, «Электродинамика», СПб., Лань, 2011 г.

9. В.В.Тучин. «Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях», СПб., Физматлит, 2010 г.

ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ:

1. Что такое полупроводниковый лазер?
2. Преимущества полупроводниковых лазеров над лазерами других типов.
3. Основные требования для работы полупроводниковых лазеров.
4. От чего зависит распределение электронов в полупроводнике.
5. В чем отличие равновесных носителей тока от неравновесных носителей тока?
6. Что такое рекомбинация электронов и дырок?
7. Что такое уровень Ферми?
8. Как расположен уровень Ферми в р и n полупроводнике при отсутствии / наличии внешнего напряжения?
9. Что такое инверсная заселенность?
10. Чем отличается режим светоизлучающего диода от режима лазерной генерации?
11. Нарисовать принципиальную схему лазера на р-п переходе и объясните назначение каждого их элементов.
12. Что такое поляризация?
13. Типы поляризация волн.
14. Из каких компонент состоит излучение полупроводникового источника излучения?
15. Как влияет ток через р-п переход на поляризацию излучения полупроводникового лазера?

Волоконно-оптический световод как среда передачи информации

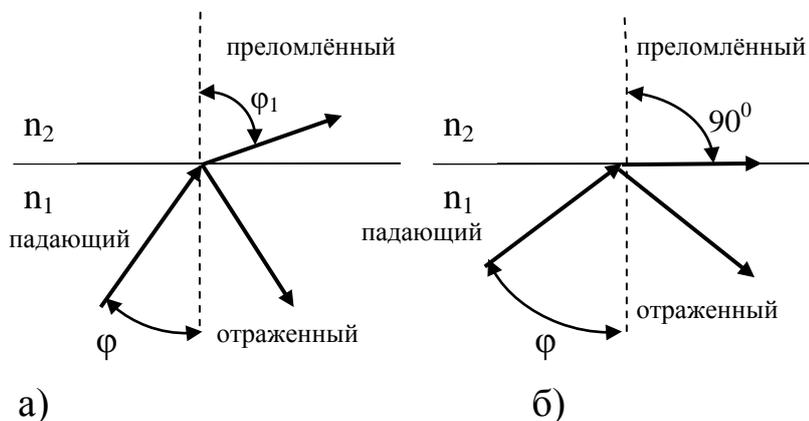
Введение к лабораторной работе

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 шифровки и дешифровки 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).



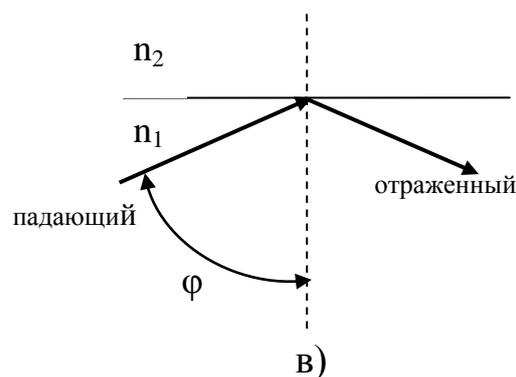


Рис.1. Варианты прохождения света через границу двух сред ($n_1 > n_2$).

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 $\text{Sin}\varphi_{\text{кр}} = n_2/n_1$.

Подчеркнем, что все выше сказанное относится к случаю $n_1 > n_2$.

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.)

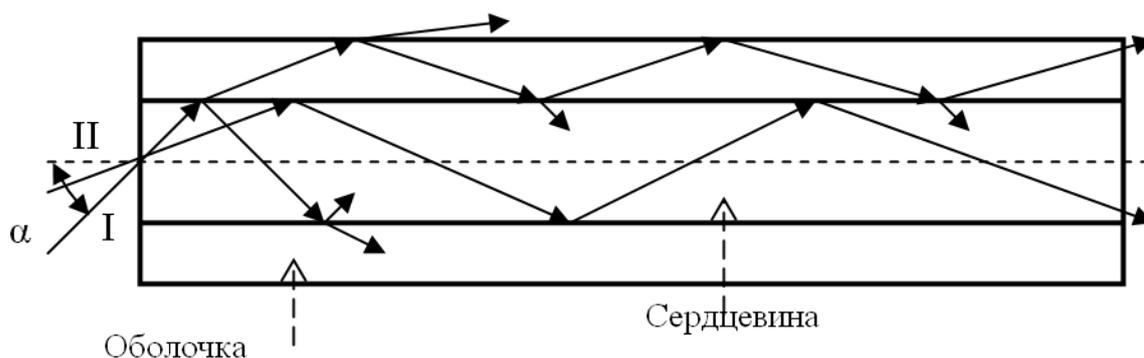


Рис.2. Ход лучей в оптическом волокне: луч I не испытывает полного внутреннего отражения; луч II испытывает полное внутреннее отражение.

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

$$\delta = - 10 \lg \tau \text{ дБ} \quad (1),$$

где τ - коэффициент пропускания светового потока световодом.

Для волокна пропускание определяется для участка длиной в один км. Единица измерения затухания (потерь) 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 – потеря на торцах волокна, 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, то его длительность на выходе увеличится. Поэтому, введя для волокна параметр – полосу частот, можно с его помощью оценить скорость передачи импульсной 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. Такое широкое и быстрое внедрение оптоволокна в проводную связь объясняется рядом его преимуществ по сравнению с используемыми до сих пор медными кабельными системами. Оптическое волокно обладает большей полосой пропускания, а значит большей скоростью передачи информации, меньшими потерями, а значит на большее расстояние можно передать сигнал без дополнительного усиления, нечувствительностью к внешним электромагнитным помехам, а значит сигнал дойдет до приемника с меньшими искажениями. Также оптические кабели обладают меньшим весом и меньшим объемом при тех же параметрах, что важно для самолета и ракетостроения.

Оптическое волокно и волоконная оптическая техника – основа ВОСП, первое – как среда для оптической цифровой передачи, вторая – как набор средств, дающих возможность осуществления такой передачи.

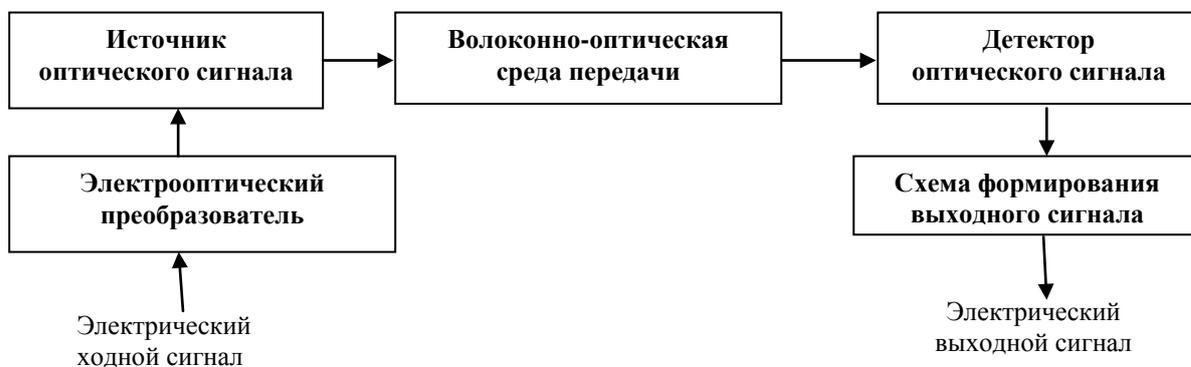


Рис.3. Модель волоконно-оптической системы передачи.

При рассмотрении упрощенной модели волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), представленной на рис.3, 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.4. 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.

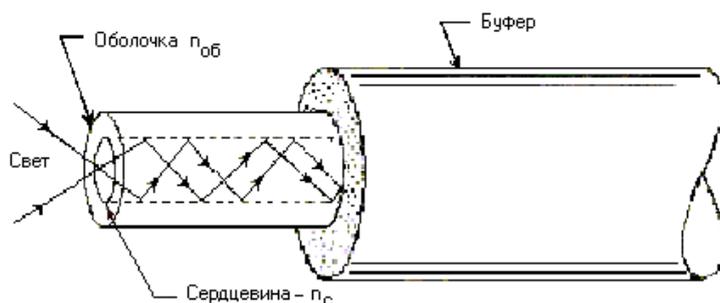


Рис.4. Устройство оптического волокна

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 оптоволоконным 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.5). 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.

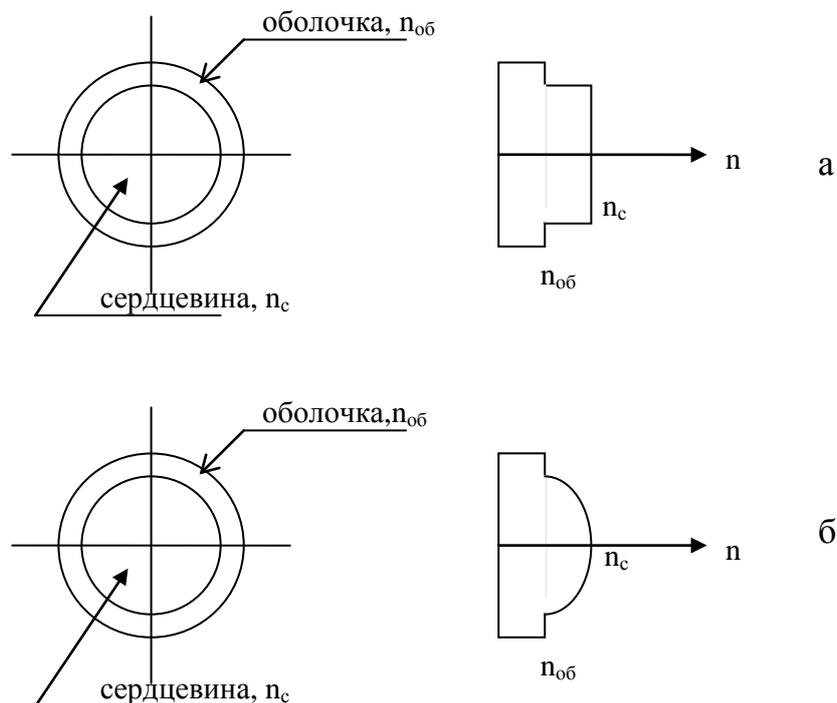


Рис.5. Типы многомодового волокна: а - волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, б - волокно с градиентным профилем показателя преломления.

Если сердцевина волокна имеет поперечные размеры сравнимые с длиной волны, то в таком волокне распространяется 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

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

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 оптоволоконка 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.6). Микроизгибы вызваны несовершенством волокна и приводят к увеличению потерь в ВОЛС, которые могут быть достаточно велики. Основная причина таких потерь кроется в процессе производства оптоволоконка и кабеля. Потери от микроизгибов являются функцией диаметра поля моды, конструкции кабеля и его исполнения.

При изгибе оптоволоконка, 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 оптоволоконка. 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. Сгибая ВОК сильнее, чем это допускается ограничениями на радиус изгиба, можно повредить кабель и волокно, что может вызвать существенное увеличение потерь в ВОЛС.

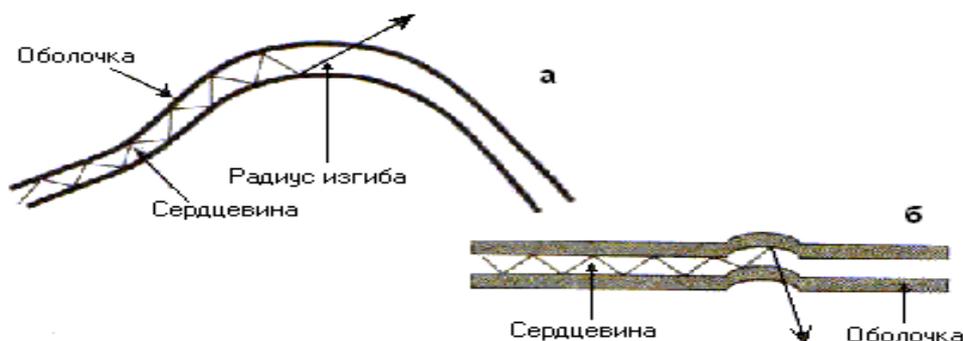


Рис.6. Варианты изгиба оптоволокна: а – макроизгиб, б – микроизгиб.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис.7, 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 (9,5 микрон - диаметр сердцевины, 125 микрон – диаметр оболочки) в буферном покрытии $\varnothing 0.9$ мм с оптическими коннекторами типа SC.
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.

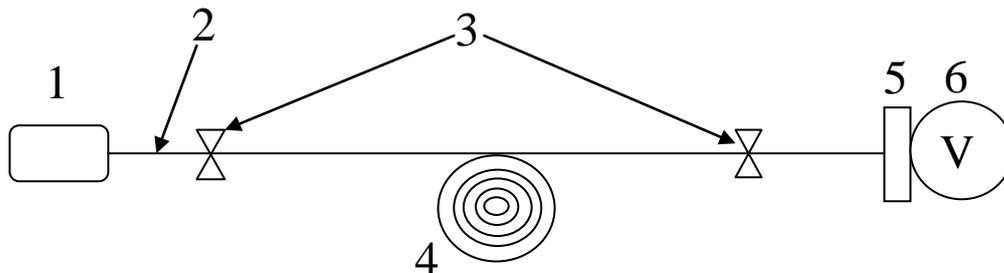


Рис.7. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – источник излучения; 2 – волокно; 3 – фиксаторы положения волокна; 4 – устройство изгиба волокна; 5 – приемник излучения; 6 – измерительный прибор.

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.

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 изгибов, 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 оптоволоконна 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).
 - Сделать петлю из ОВ и надеть ее на соответствующий диск. Подтянуть ОВ до плотного охватывания диска.
 - Измерить сигнал, результат занести в таблицу 1 (столбец 3).
6. Измерения провести для 8 – 12 различных дисков.
7. 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 | | |
|-----|--------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|
| | $D_{диск}, \text{мм}$ | $I, \text{мкА}$ | $\langle D_{диск} \rangle$ | Радиус изгиба ОВ ($R_{изг}$), Мм | Относительное пропускание, $\tau, \%$ | Ослабление сигнала, $\delta, \text{дБ}$ |
| 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 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 изгиба.

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.

Дифракция монохроматического излучения на пропускающей решетке

Цель работы: исследование дифракции света на пропускающей решетке

Объект исследования: дифракционные решетки с различным периодом, изготовленные по различным технологиям.

Задачи, решаемые в работе:

1. Получить картины интерференции дифрагированного излучения при нормальном и наклонном падении света на решетку.
2. Определить параметры решеток.
3. Рассмотреть особенности эксперимента при наклонном падении света на решетку.

Введение

Дифракцией называется явление огибания волнами препятствий. Оно характерно для волн любой природы – волн на поверхности жидкости, звука, электромагнитных волн. Наиболее хорошо оно изучено и используется для света – электромагнитных волн оптического диапазона. Для описания дифракции используется принцип Гюйгенса-Френеля, согласно которому каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, а колебания за этим фронтом рассматриваются как суперпозиция (интерференция) этих вторичных волн. Для света результатом дифракции является нарушение законов геометрической оптики, чаще всего закона прямолинейного распространения света, при падении его на препятствия достаточно малых размеров. Препятствия могут быть простыми (щель, отверстие, край непрозрачного тела) и сложными (наборы щелей или прозрачных и непрозрачных колец), упорядоченными и неупорядоченными. Наиболее ярким примером упорядоченного сложного препятствия является дифракционная решетка. Дифракционной решеткой (ДР) можно называть любую периодическую или близкую к периодической систему параллельных штрихов, нанесенных на стеклянные или металлические пластины. ДР может быть прозрачной (пропускающей) или отражательной. В первом случае дифракция рассматривается в прошедшем свете, а во втором в отраженном.

Мы будем рассматривать дифракцию когерентного света полупроводникового лазера на пропускающей ДР, т.е. на непрозрачном экране с периодически расположенными прямоугольными отверстиями. Размер отверстия (щели) d_1 . Расстояние между двумя соседними щелями (период решетки) - d (рис. 1).

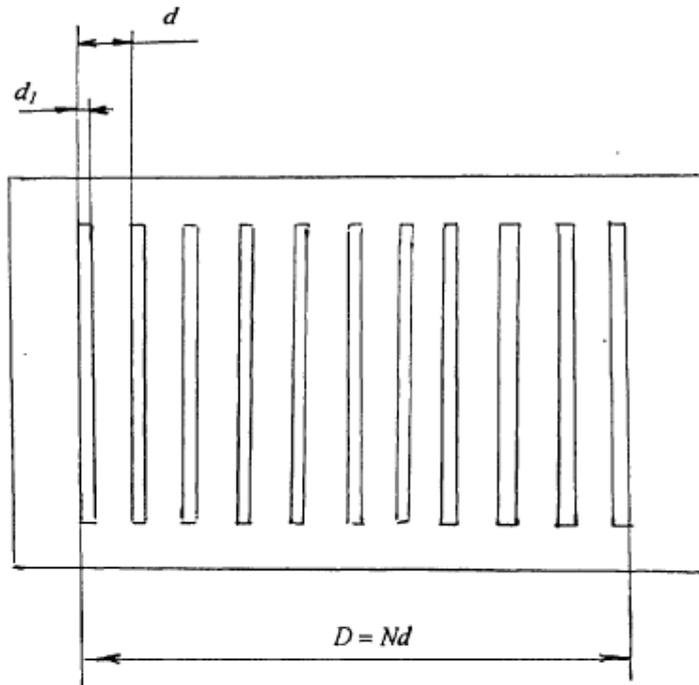


Рис.1. Дифракционная решетка в виде прямоугольных щелей.

Участок решетки длины d будем называть элементом решетки. Общий размер решетки, в направлении перпендикулярном к ее элементам, $D = Nd$, где N - число элементов решетки.

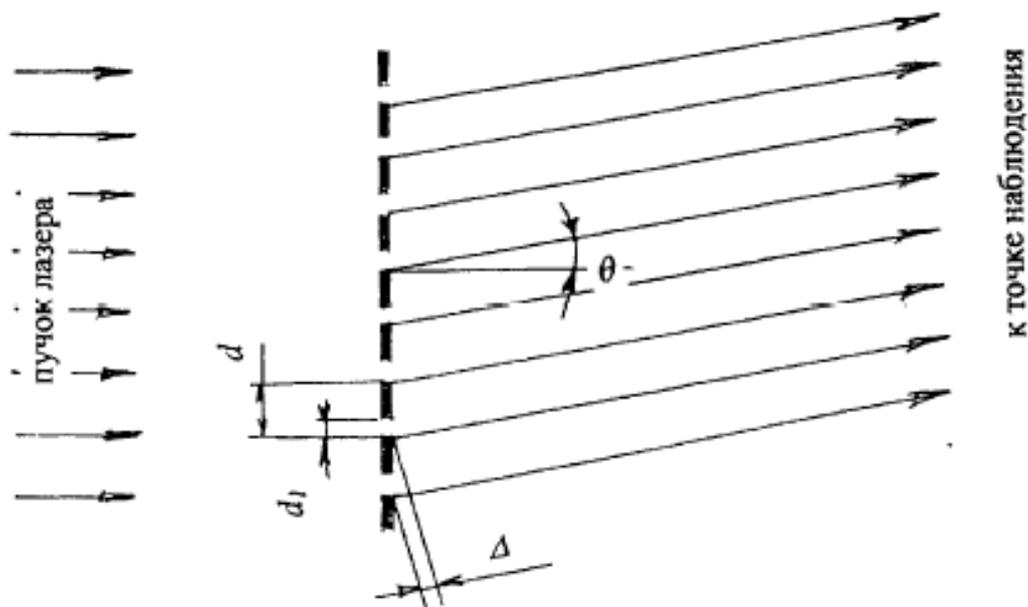


Рис. 2. Освещение решетки параллельным пучком света

В результате дифракции лазерного луча, падающего нормально на такую решетку (рис.2), за ее плоскостью распространяются не один, а несколько лучей (интерференционных максимумов, максимумов интенсивности) в направлениях, которые подчиняются соотношению:

$$\sin \theta_m = m\lambda/d \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (1)$$

В направлениях θ_m волны, приходящие в точку наблюдения от всех щелей решетки, оказываются в фазе, и их амплитуды складываются, а во всех остальных направлениях волны, пришедшие от разных щелей, гасят друг друга. Индексу $m=0$ соответствует недифрагированный луч, распространяющийся в том же направлении, что и падающий. Общая картина распределения интенсивности от угла θ показана на (рис.3). Этот рисунок показывает не только направления на максимумы согласно (1), но и зависимость относительной интенсивности этих максимумов из-за дифракции на отдельных щелях решетки.

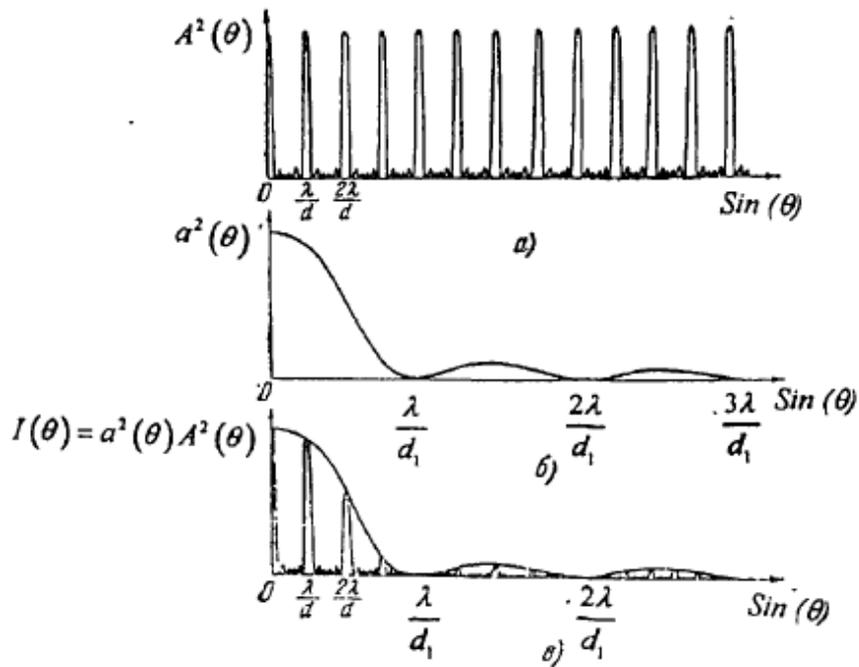


Рис.3. Распределение интенсивности света для дифракционной решетки: а) график функции $A^2(\theta)$, описывающий интерференцию света от N щелей; б) график функции $a^2(\theta)$, описывающий интенсивность света от одной щели; в) график произведения функций $a^2(\theta) A^2(\theta)$, описывающий интенсивность света для дифракционной решетки с параметрами d, d_1, N .

Из рис.3 видно, что интерференционные максимумы имеют конечную ширину и их интенсивность отлична от нуля в диапазоне углов $\theta_m \pm \delta\theta$, где

$$\delta\theta == \lambda/Nd \quad (2)$$

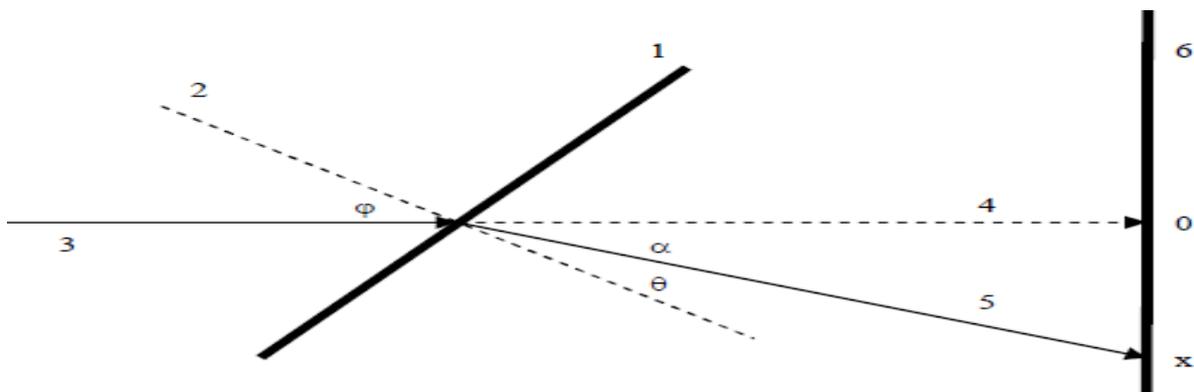


Рис.4. Наклонное падение лучей на дифракционную решетку: 1 – плоскость дифракционной решетки; 2 – нормаль к плоскости решетки; 3 – падающий луч; 4 – недифрагированный прошедший луч; 5 – дифрагированный луч; 6 – экран.

При наклонном падении луча на ДР (рис. 4) условие интерференционных максимумов несколько усложняется:

$$\sin\varphi - \sin\theta_m = m\lambda/d \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (3)$$

где φ и θ - углы, которые образуют с нормалью к плоскости решетки падающий и дифрагированный лучи, а α - угол между недифрагированным (или падающим) и дифрагированным лучами. Между этими углами существует соотношение: $\theta = \varphi + \alpha$. Положительные направления отсчета углов – против часовой стрелки от нормали для θ и от недифрагированного луча для α . Положительное направление оси x на этом рисунке – вверх, в этом же направлении возрастает индекс m .

Схема установки

Установка состоит из полупроводникового лазера с длиной волны 670нм (красный) и мощностью излучения 1 мВт, направляющей, рейтеров, набора дифракционных решеток, экрана для наблюдения с магнитами для крепления бумаги и линейки для объектов дифракционной картины (см. рис.5)

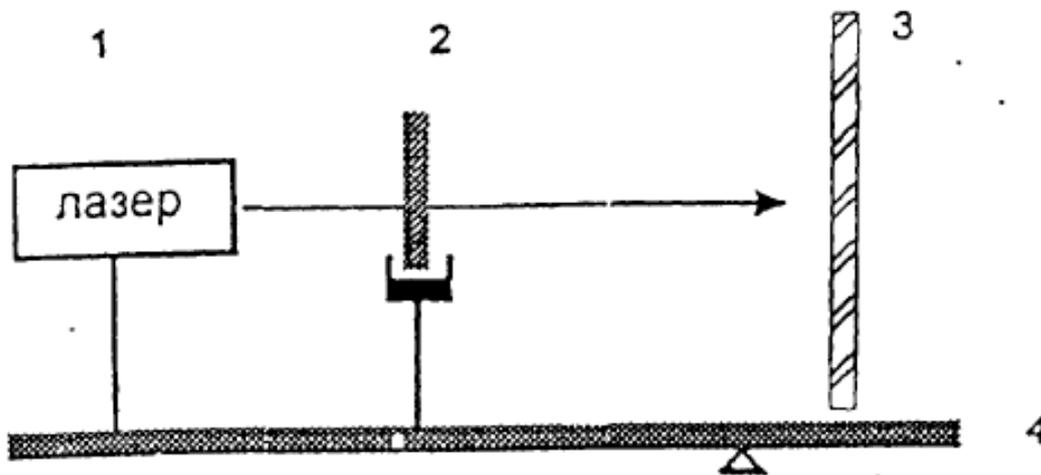


Рис. 5. Схема опыта для наблюдения дифракции на решетке: 1 – лазер; 2 – дифракционная решетка; 3 - экран наблюдения; 4 – направляющая.

Излучение лазера падает на дифракционную решетку. Про дифрагировавшее на решетке излучение попадает на экран,

отстоящий от решетки на расстояние L . На экране возникает ряд дифракционных пятен, ориентированных в направлении, перпендикулярном направлению щелей решетки, и убывающих по интенсивности от центра к периферии (см.рис.6). Угол α между падающим и дифрагированным лучами (для нормального падения он совпадает с θ_m) определяется по расстоянию X_m между центральным и m -ым максимумом и расстоянию L между решеткой и экраном.

Полуширину дифракционных максимумов на экране можно оценить, используя (3), с помощью формулы:

$$\delta X = \lambda L / Nd \quad (4)$$

Величина Nd равна размеру решетки, но практически она определяется размером освещенной области решетки, т.е. диаметром падающего луча. Общее число дифракционных максимумов определяется из условия $|\sin \theta_m| < 1$ в соотношении (3).

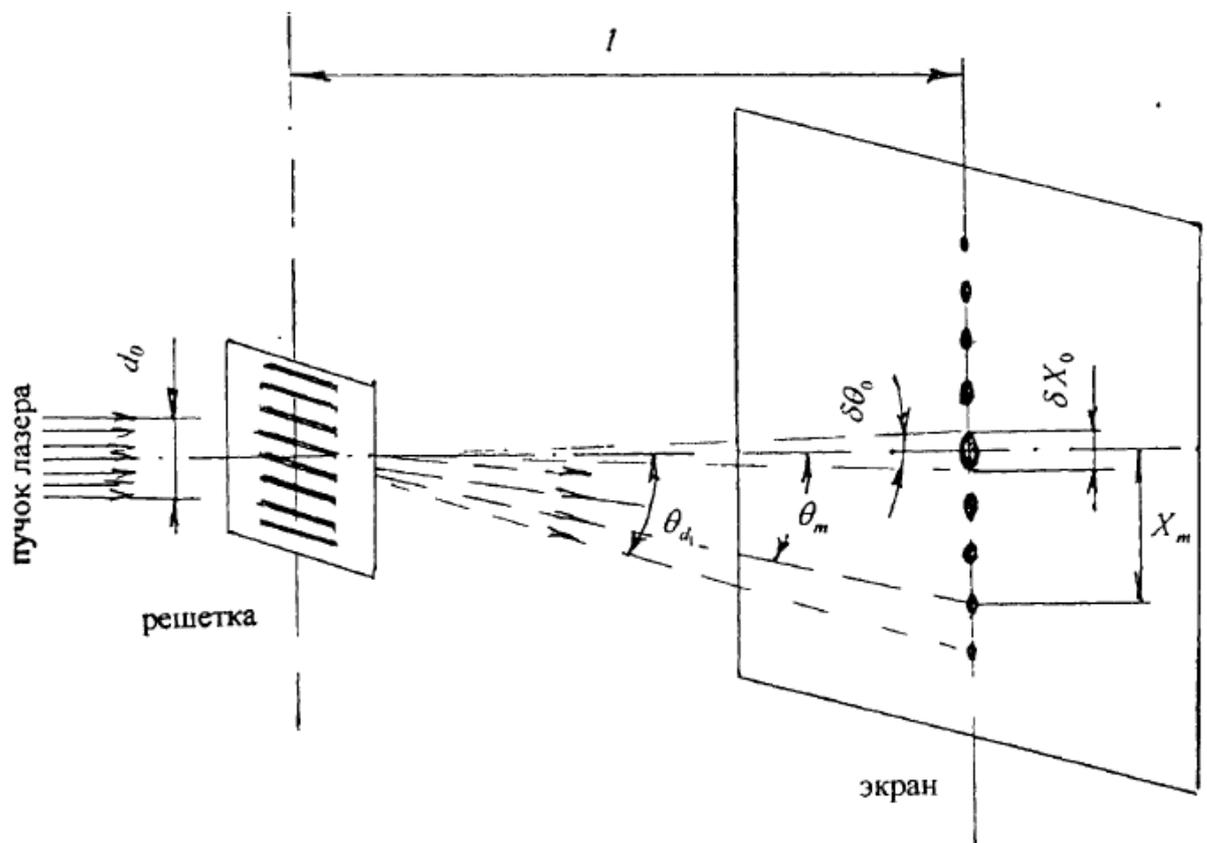


Рис. 6. Иллюстрация к опыту по наблюдению и исследованию дифракции излучения на пропускающей решетке.

Порядок проведения измерений.

1. Соберите схему согласно рис.5. Для этого лазер в оправе и на рейтере ставится на левом краю оптической скамьи, а экран на противоположном краю. Кассету с ДР на рейтере установите между ними.

На экране с помощью магнитов закрепите лист бумаги для зарисовки дифракционной картины. Наблюдая дифракционную картину, подберите расстояние между решеткой и экраном таким образом, чтобы на экране помещалось 5-7 интерференционных максимумов. Добиваясь симметричного расположения интерференционных максимумов, расположите решетку перпендикулярно к падающему лучу лазера.

Карандашом отметьте на закрепленном листе пятна дифракционных максимумов. Затем разверните ДР в кассете на 90° , убедитесь в том, что линия, вдоль которой располагаются максимумы интенсивности, также развернулась на 90° и снова зафиксируйте на листе дифракционную картину. Бумагу снимите, по зарисованным положениям пятен найдите с помощью линейки средние значения и погрешности положения максимумов X_m и размер центрального максимума. Измерьте линейкой расстояние между экраном и дифракционной решеткой и запишите его на листе с изображениями дифракционной картины. Поместив перед ДР лист бумаги зарисуйте сечение падающего луча.

2. Повторите те же измерения для второй ДР.

3. ДР с большим шагом установите в кассете так, чтобы ее щели располагались вертикально (максимумы интенсивности располагаются вдоль горизонтальной прямой), подберите расстояние L таким, чтобы на экране помещалось не менее 7 интерференционных максимумов, и зафиксируйте на листе дифракционную картину при нормальном падении луча на решетку. Затем разверните кассету вокруг вертикальной оси, добиваясь наклонного падения луча на плоскость решетки. Убедитесь в смещении интерференционных максимумов и их несимметричном расположении на экране и снова зафиксируйте на листе дифракционную картину. Измерьте новое значение расстояния между экраном и решеткой.

Обработка результатов измерений.

1. Нормальное падение луча на ДР. Измерьте на зарисовках дифракционных картин и занесите в таблицы значения расстояний X_m от центрального (нулевого) максимума интенсивности до максимума интенсивности с номером m (см. рис.6).

| Решетка N, L = | | | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| M | X_m , мм | $\text{tg } \theta_m$ | θ_m , град | $\sin \theta_m$ | d , мкм |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Значения $\text{tg } \theta_m$ вычисляются по формуле $\text{tg } \theta_m = X_m/L$, а значения шага решетки d из соотношения (1).

По данным последнего столбца таблицы для обеих решеток вычислить среднее значение d и его погрешность.

Измерьте на зарисовках дифракционных картин размер центрального максимума интенсивности δX (см.рис.6), с помощью соотношения $\delta \theta = \delta X/L = \lambda/Nd$ оцените размер освещенной области ДР и сравните его с результатом измерения сечения падающего луча.

2. Наклонное падение луча на ДР. Измерьте на зарисовке дифракционной картины для случая наклонного падения луча и занесите в таблицу значения расстояний X_m от центрального (нулевого) максимума интенсивности до максимума интенсивности с номером m .

| Решетка N, L = | | | | | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-----|---------------------|------------------|
| m | X_m , мм | $\text{tg } \alpha_m$ | α_m , град | $\sin(\alpha_m/2)$ | b | $\arccos(b)$, град | φ , град |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Для вычисления угла падения луча φ , который равен углу разворота решетки нужно в соответствии с рис. 4 преобразовать соотношение (3):

$$\sin\varphi - \sin(\varphi + \alpha_m) = m\lambda/d \quad (5)$$

Решением этого тригонометрического уравнения является $\varphi = \arccos(b) - \alpha_m/2$, где безразмерный параметр $b = m\lambda/2d \cdot \sin(\alpha_m/2)$. Значения $\operatorname{tg} \alpha_m$ (см. рис.4) вычисляются по формуле $\operatorname{tg} \alpha_m = X_m/L$, а значения шага решетки d известны по результатам измерений с нормальным падением луча (для той же решетки). По данным из последнего столбца таблицы вычислите среднее значение φ и его погрешность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев. «Физика: Электродинамика и оптика», М., Физматлит, 2008 г.
2. Е.И. Бутиков. «Оптика», Спб., Лань, 2012 г.
3. Г.С. Ландсберг «Оптика», М., Физматлит, 2010 г.

ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Что такое дифракция?
2. Принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Что такое дифракционная решетка?
4. Типы дифракционных решеток.
5. Что является результатом дифракции?
6. Условие интерференционных максимумов для случая нормального падения лучей на дифракционную решетку.
7. Условие интерференционных максимумов для случая наклонного падения лучей на дифракционную решетку.
8. Формула для полуширины дифракционных максимумов.
9. Нарисовать схему установки и объяснить назначение каждого из элементов.
10. Распределение интенсивности света для дифракционной решетки: график функции $A^2(\theta)$, описывающий интерференцию света от N щелей.
11. Распределение интенсивности света для дифракционной решетки: график функции $a^2(\theta)$, описывающий интенсивность света от одной щели.
12. Распределение интенсивности света для дифракционной решетки: график произведения функций $a^2(\theta)A^2(\theta)$, описывающий интенсивность света для дифракционной решетки с параметрами d, d_1, N .

Получение изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка

Цель работы: знакомство с основными свойствами голограмм путем самостоятельного получения изобразительной голограммы Денисюка.

Задачи, решаемые в работе:

1. Ознакомиться с основами голографического метода записи и воспроизведения информации; типами голограмм и их основными свойствами.

2. Ознакомиться с установкой для регистрации голограмм и требованиями к оптическим элементам голографической схемы для получения изобразительных голограмм по методу Ю.Н. Денисюка.

3. Подготовить объект (композицию) и установить его в голографическую схему; подготовить оптическую схему и установку для регистрации голограммы.

4. Получить голограмму выбранного объекта: зарегистрировать голограмму на фотопластинке, провести химико-фотографическую обработку фотоматериала, высушить полученную голограмму.

5. Определить условия освещения голограммы для получения максимального визуального эффекта при наблюдении изображения объекта. Проанализировать различия зрительного восприятия объекта в трех ситуациях:

- При рассматривании объекта, освещаемого монохроматическим светом;
- При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой монохроматическим светом;
- При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой «белым» светом.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

При подготовке к работе необходимо ознакомиться с терминами и их толкованием, которые приведены во второй части пособия: *голография, голограмма, объектная (предметная) волна, опорная (референтная) волна, голограмма отражательная, голограмма трехмерная (объемная), голографическая установка, Денисюка голограмма, динамический диапазон воспроизведения градации яркости объекта, регистрация голограммы (запись голограммы), изобразительная голография.*

Голограммы, используемые для зрительного (визуального) эстетического восприятия и наблюдения изображений, получили название изобразительных голограмм. Широкое распространение получили изобразительные голограммы объектов, представляющих собой художественную ценность, – музейных и коллекционных экспонатов, ювелирных изделий и т.д., получение которых производится по методу, предложенному русским ученым Юрием Николаевичем Денисюком.



Ю.Н.Денисюк. 27.07.1927 – 14.05.2006

Ю.Н.Денисюк – выдающийся русский ученый, основоположник объемной голографии – нового направления в физике. Вся жизнь и деятельность Ю.Н.Денисюка неотделимы от развития

голографии – научно-технического направления второй половины XX века, признанным лидером которой он являлся в течение последних десятилетий. Ю.Н.Денисюк внес существенный вклад в становление и развитие голографии не только в России и в СССР, но и во всем мире.

Голограмма Денисюка, впервые полученная автором в 1962 г. на прозрачных галогенидосеребряных фотоматериалах с использованием в качестве источника излучения ртутной лампы, явилась экспериментальным обоснованием метода Денисюка – записи в трехмерной среде голограмм, способных восстанавливать амплитуду, фазу и спектральный состав объектной волны и заложила фундамент нового направления в физике – объемной голографии, или голографии в трехмерных средах.

Изобразительные голограммы, получаемые по методу Ю.Н.Денисюка, наглядно и зрелищно демонстрируют основные свойства и особенности голограмм. В первую очередь это свойства, связанные с возможностью восстановления объектной волны, неотличимой зрительным аппаратом человека от исходной объектной волны (волны, сформированной объектом). Именно идентичность исходной объектной волны и волны, полученной при освещении голограммы, позволяет получить объективную информацию о пространственной форме и структуре поверхности объектов. Голограмма представляет собой оптическую копию объекта, так как с точки зрения наблюдателя «голографическое» изображение объекта при определенных условиях наблюдения неотличимо от оригинала.

За счет чего при рассматривании «голографического» изображения объекта возникает убеждение в реальности наблюдаемого объекта?

1. За счет «эффекта оглядывания», который всем опытом нашей повседневной жизни убеждает нас в реальности происходящего. Стереоскопическое, бинокулярное зрение подтверждает это убеждение. Информация, записанная каждым отдельным участком голограммы, зависит от угла между объектной и опорной волнами, соответствующего этому участку во время регистрации. Следовательно, каждый участок голограммы восстанавливает объект под определенным углом зрения. Если голограмма достаточно велика, чтобы можно было рассматривать освещенный участок обоими глазами, то при совмещении в мозгу двух наблюдаемых изображений возникает стереоскопический эффект. Если наблюдатель переместится

относительно голограммы, то увидит изображение под другим углом. Таким образом, от направления наблюдения зависит, какие части изображения увидит наблюдатель. Это – эффект оглядывания [1-3].

2. Правильная передача градаций яркости объекта в «голографическом» изображении позволяет наблюдать игру бликов на объекте при его оглядывании, что создает эффект присутствия реального объекта, недостижимый другими методами получения изображений и известными изобразительными средствами.

«Все перечисленные эффекты, по существу, являются формой, в которой мозг представляет информацию, содержащуюся в световых полях. Поскольку повседневный опыт убедил нас в надежности такой информации, вся она в целом дает уверенность в реальном присутствии объекта. Именно на воспроизведении светового поля, заключенной в котором информации мы так доверяем, и основан механизм воссоздания образов с помощью голограммы.» [1,3].

С помощью изобразительных голограмм легко можно продемонстрировать уникальное свойство делимости голограммы, связанное с возможностью восстановления объектной волны каждым отдельным, сколь угодно малым, участком голограммы (при условии, что при записи голограммы каждая точка объекта освещала всю поверхность регистрирующей среды). При наблюдении изображения объекта голограмма для наблюдателя является своего рода "окном" в пространство объекта – при уменьшении "окна" усложняются и ухудшаются условия наблюдения, но иллюзия действительности сохраняется.

Изобразительные голограммы незаменимы при демонстрации такого явления как «Обращение волнового фронта» (ОВФ), которое в традиционной оптике реализуется, как правило, только для простых волновых фронтов (плоского и сферического) и ряда конкретных экспериментальных ситуаций. На рис.2 приведены схемы наблюдения изображений объекта, сформированных исходной объектной волной и сопряженной, имеющей ту же форму, что и исходная, но распространяющуюся в противоположном направлении. При использовании исходной опорной волны наблюдается мнимое ортоскопическое изображение объекта, с определенным распределением разности фаз объектной волны на его поверхности. При использовании сопряженной опорной волны наблюдается действительное псевдоскопическое изображение объекта. Разность

фаз объектной волны на поверхности действительного изображения соответствует по абсолютной величине разности фаз на поверхности ортоскопического мнимого изображения, но имеет противоположный знак. Это приводит к тому, что в псевдоскопическом действительном изображении выпуклости выглядят вогнутостями и наоборот, а тень «гуляет» перед объектом, а не позади него.

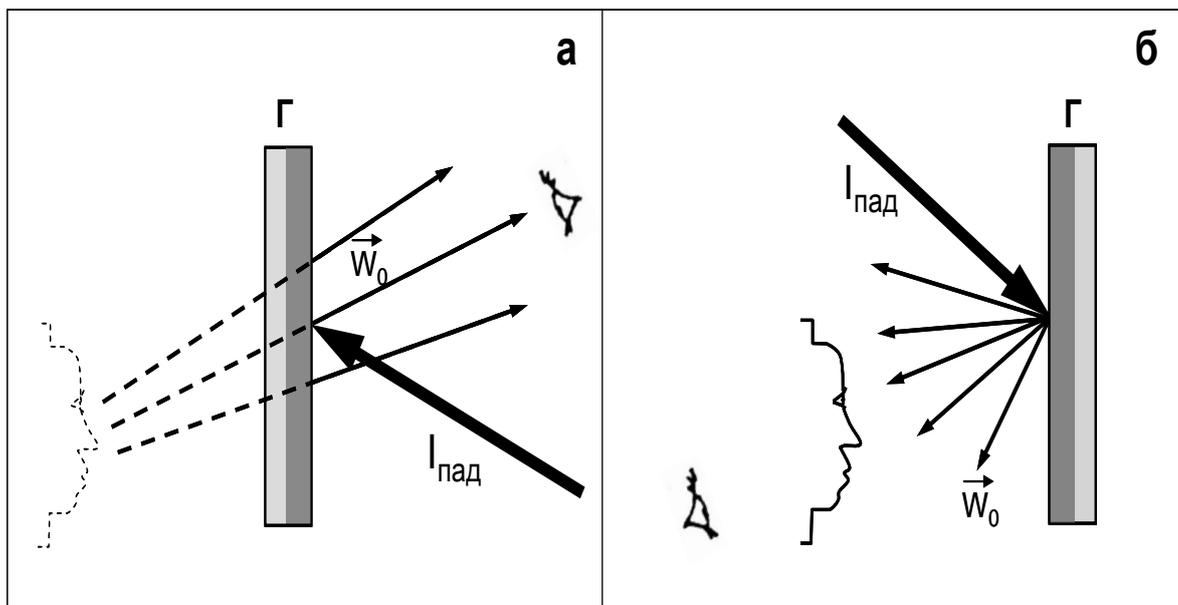


Рис.2. Наблюдение изображения объекта с помощью голограммы Денисюка при использовании исходной опорной волны (а) и обращенной (б). $I_{\text{пад}}$ – падающая на голограмму волна, предназначенная для считывания информации; W_0 – восстановленная объектная волна, формирующая при наблюдении мнимое (а) и действительное (б) изображение объекта.

Зрелищность изобразительных средств голографии еще не нашла в полной мере своего места в современном обществе, возможно, это связано с большим избытком информации, который несет в себе голограмма, при достаточно высокой трудоемкости ее получения. По-видимому, это удел будущих поколений. Вот как описывает данную ситуацию основоположник объемной голографии Ю.Н.Денисюк.

«Поразительно, что среди всего разнообразия известных физике эффектов до последнего времени не было явления, которое позволило бы объективно запечатлевать конфигурации предметов окружающего нас мира. Фотографии, полученные с помощью камеры-обскуры и линзы, - вот фактически и все, что имелось в этом направлении. Однако даже и этот, на первый взгляд очевидный способ регистрации, при ближайшем рассмотрении оказывается субъективным, т.е.

рассчитанным на восприятие с помощью человеческого глаза или какого-либо иного зрительного аппарата с аналогичным строением.

Первый действительно объективный способ регистрации формы предметов – голография и лежащее в ее основе явление были обнаружены только в середине нашего (XX-го) столетия к моменту появления технического средства их реализации – лазера». [2,4]

Схема записи голограммы Денисюка (см. «Денисюка голограмма») относится к так называемым однолучевым голографическим схемам, при использовании которых опорный пучок освещает объект и формирует объектную волну. Использование однолучевой схемы регистрации голограмм имеет существенные преимущества:

- Необходимо наличие только одного пучка излучения требуемого качества.
- Необходимо обеспечить высокую стабильность только одного узла, который формирует интерференционную картину, т.е. узла «объект- регистрирующая среда», который можно соединить в один элемент голографической установки. При этом требования к стабильности остальных элементов схемы сильно снижаются.

На рис.3 приведена принципиальная схема, используемая для регистрации голограмм Денисюка. Узел источника излучения (1) обеспечивает необходимые параметры излучения и формирует опорный пучок. Узел «объект - регистрирующая среда» (2,3) обеспечивает стабильность регистрирующей среды относительно объекта (или наоборот). Существенно то, что каждый узел является достаточно независимым по целому ряду параметров и обеспечению стабильности.

Для получения изобразительных голограмм по методу Ю.Н.Денисюка используют лазеры различных типов как непрерывного действия, так и импульсные. При этом необходимо, чтобы лазеры обладали длиной когерентности L , обеспечивающей установку объекта на заданном расстоянии от регистрирующей среды, которое не должно превышать $L/2$. Наиболее широко для получения монохромных изобразительных голограмм используют газовые лазеры на смеси He-Ne, которые обладают высокой степенью когерентности (обеспечивающей длину когерентности десятки см), малой расходимостью и высокой степенью поляризации излучения. Для расширения коллимированного пучка He-Ne лазера обычно

используется схема, приведенная на рис.4.

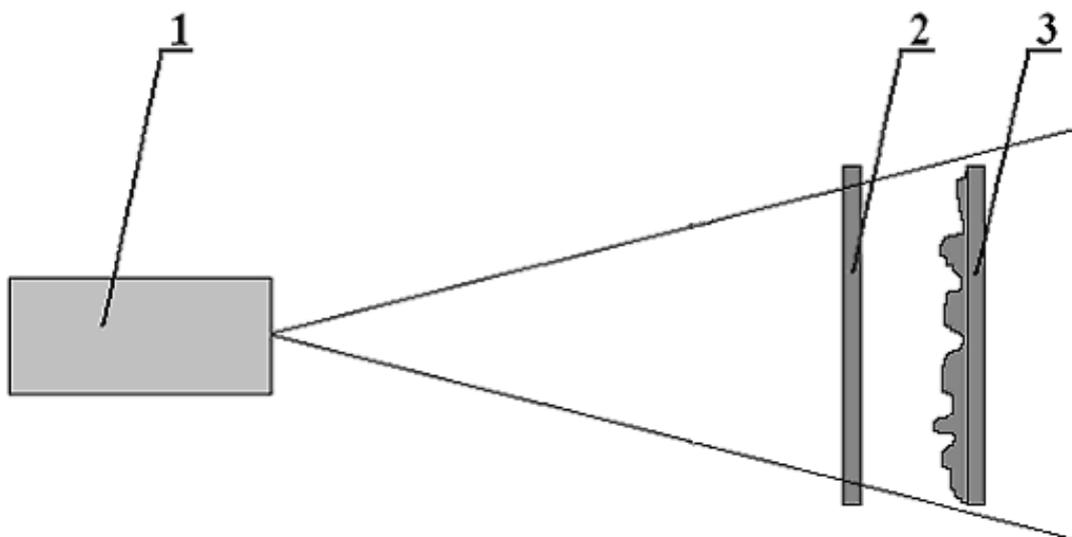


Рис.3. Принципиальная схема записи голограмм Денисюка: 1 – узел источника излучения с системой формирования пучка; 2 - регистрирующая среда (фотопластинка), 3 – объект-композиция.

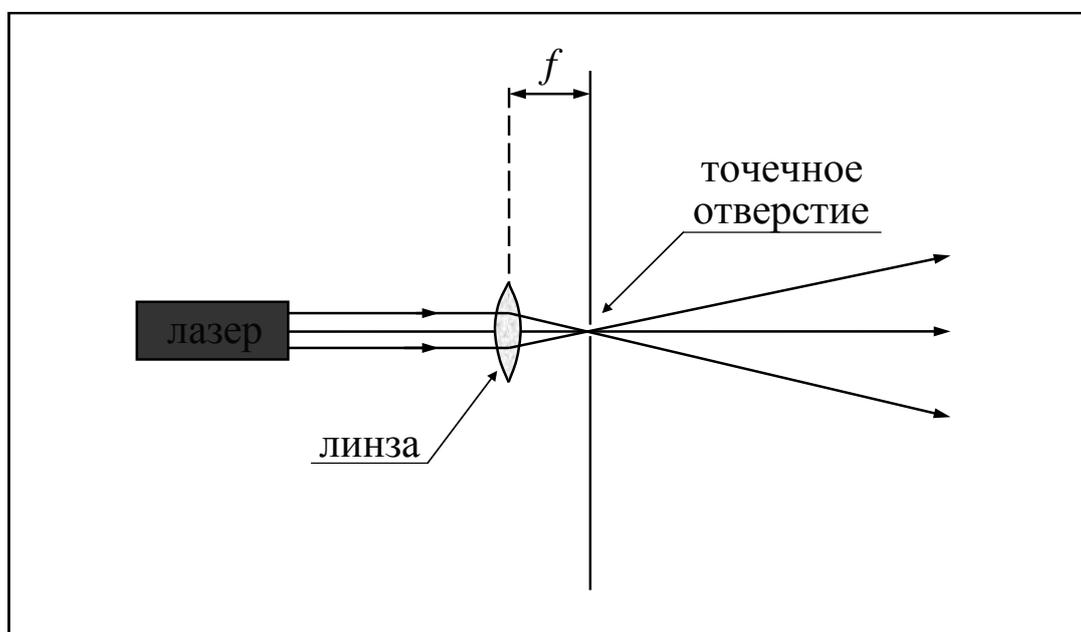


Рис.4. Схема, используемая для расширения коллимированного пучка лазерного излучения: формирование сферического пучка и его фильтрация с помощью точечной диафрагмы.

При получении голограмм Денисюка расстояние между интерференционными полосами сравнимо с длиной волны используемого излучения. Во время регистрации голограммы (ее экспонирования) сдвиг фотопластинки (или любого другого регистрирующего материала) должен быть существенно меньше, чем значение наибольшей пространственной частоты регистрируемой интерференционной картины, т.е. не превышать долей длины волны. Для крепления регистрирующей среды используют специальные кассеты-держатели, которые обеспечивают нужную стабильность во время экспозиции. Гораздо труднее во время экспозиции обеспечить стабильность самой интерференционной картины. Эта традиционная проблема прецизионной оптической интерферометрии. Голографическая установка собирается, как правило, на массивной плите из стали или гранита (последний имеет преимущество в том, что обладает меньшим температурным коэффициентом расширения). Большая масса необходима для того, чтобы сделать собственную частоту колебаний стола (около 1 Гц) много меньше частот колебаний здания. Для защиты голографического стола от вибраций здания применяют специальные меры: устанавливают систему пневматических амортизаторов; помещают в ванну с песком и т.д.

Возмущения окружающего воздуха – нестабильность температурных и акустических условий в помещении также сказывается на стабильности интерференционной картины. Избавиться от них часто бывает значительно труднее, чем от механических вибраций. Чтобы уменьшить влияние указанных факторов, оптическую длину пути интерферирующих пучков делают как можно меньше.

Для уменьшения влияния нестабильности следует уменьшать время экспозиции. С этой целью необходимо использовать наиболее чувствительные регистрирующие среды, полнее использовать выходную мощность лазера, выбирая оптимальное соотношение между интенсивностями пучков и сводя к минимуму количество оптических элементов, а, следовательно, и потерь в них.

Свойства объектной волны во многом определяются не только формой, но и оптическими характеристиками объектов для голографирования, которые в самом общем виде представлены в таблице 1. Как известно, свойства голограмм проявляются наиболее полно при условии, что излучение, рассеянное каждой точкой объекта, освещает всю поверхность голограммы. Поэтому важной характеристикой рассеивающего объекта является его индикатриса

рассеяния (см. рис.5). Приведенные характеристики важны при выборе объекта для голографирования в конкретных экспериментальных условиях. Для регистрации голограмм Денисюка используют, как правило, непрозрачные объекты, имеющие и зеркальную и диффузную составляющие в рассеянном излучении, структура которого определяет возможность получения различных визуальных эффектов при наблюдении изображений с помощью голограммы.

Таблица 1. Характеристики объектов для голографирования.

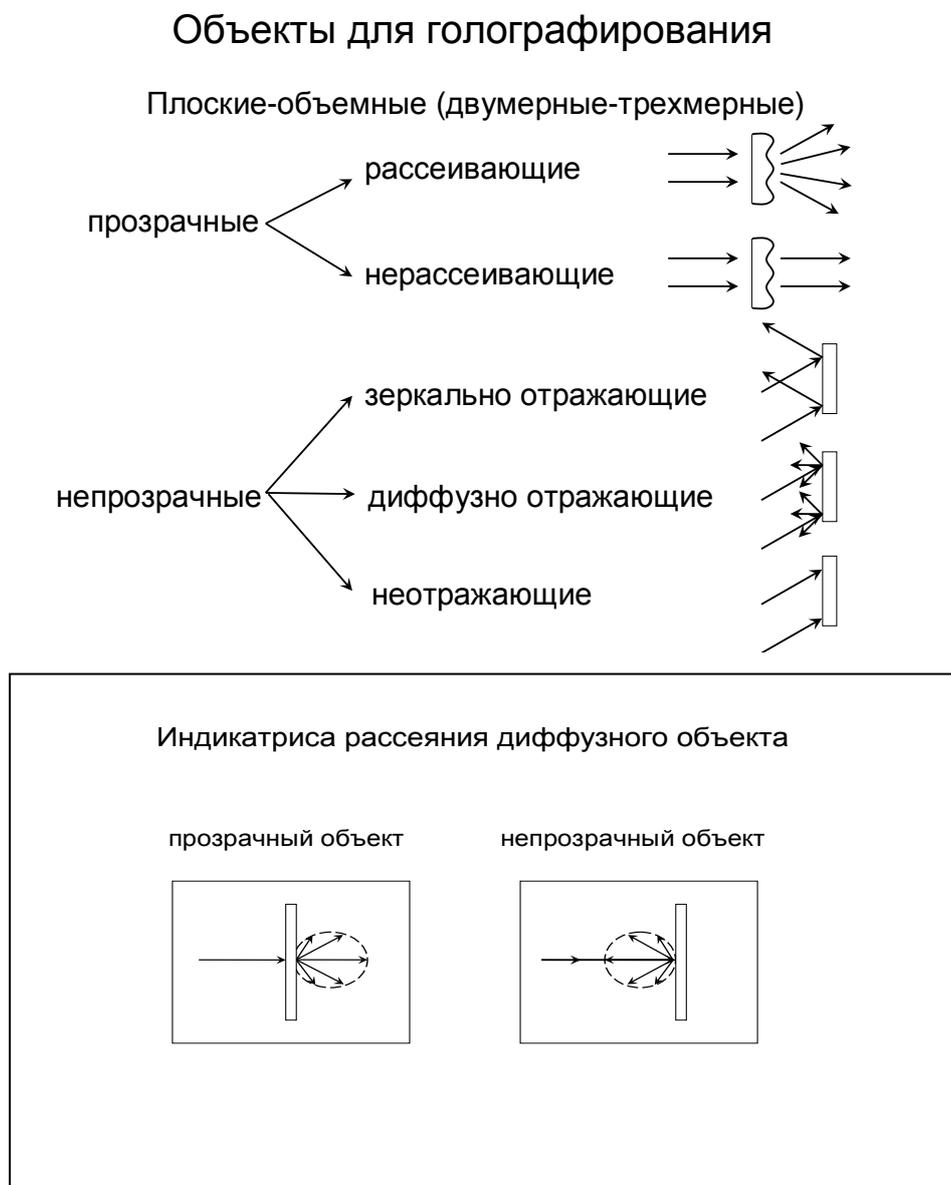


Рис.5. Индикатриса рассеяния прозрачного и непрозрачного объектов.

Регистрирующая среда для получения голограмм Денисюка должна обладать необходимыми характеристиками, главными из которых являются:

- разрешение, обеспечивающее в конкретном эксперименте запись интерференционной картины с периодом $\lambda/2$;
- спектральная чувствительность к длинам волн используемого лазера;
- чувствительность, обеспечивающая необходимую длительность экспонирования в данном эксперименте;
- размер, соответствующий условиям конкретного эксперимента.

Наблюдение изображений объектов при считывании изобразительных голограмм, полученных по методу Денисюка, как правило, не предусматривает сложных и дорогостоящих источников излучения для освещения голограммы. Обычно используют источники «белого» света с малым телом накала; лампы накаливания с оптической системой, моделирующей форму опорного пучка излучения определенной расходимости. Оптимальные условия наблюдения «голографического» изображения предоставляет излучение Солнца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Оптическая схема экспериментальной установки, используемой в работе, представлена на рис.6. Схема размещается на плите-основании, где устанавливаются рейтеры (держатели) с оптическими элементами и платформа для объекта-композиции. Объект-композиция собирается на платформе и устанавливается в схему перед регистрацией голограммы.

При выборе объектов для голографирования необходимо учитывать целый ряд факторов, главные из которых перечислены ниже.

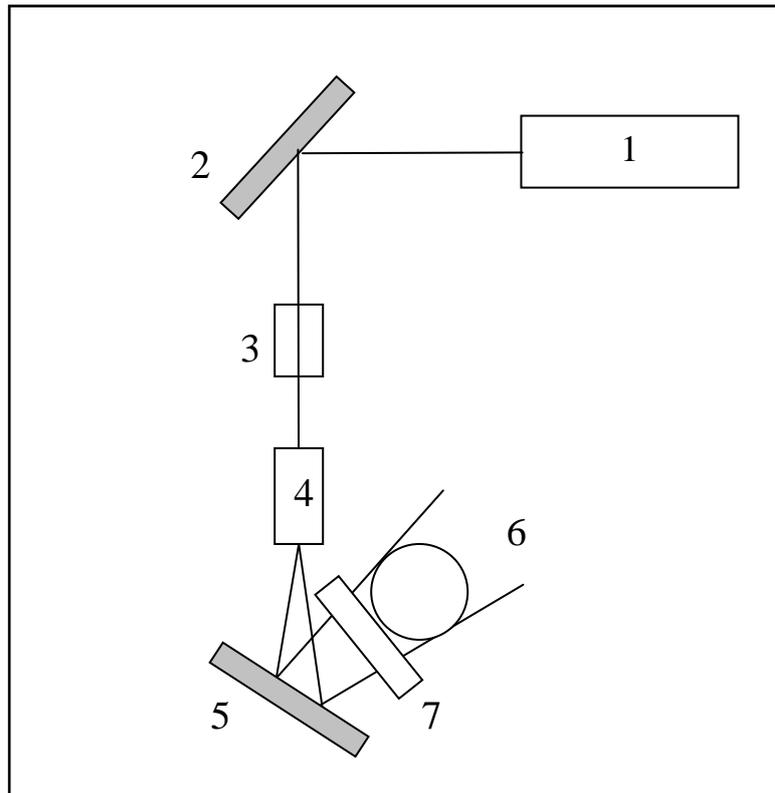


Рис.6. Принципиальная оптическая схема для получения голограмм по методу Ю.Н.Денисюка. 1 – лазер; 2,5 – зеркала; 3 – затвор; 4 – система формирования пучка; 6 – объект-композиция; 7 – регистрирующая среда (фотопластинка).

Объект, предназначенный для голографической съемки (голографирования), должен обладать следующими свойствами:

- достаточной механической прочностью всех деталей и элементов - желательно, чтобы это был металлический объект, либо объект из фарфора, твердой керамики и т.д.;
- достаточно высоким коэффициентом отражения, чтобы контраст записываемой интерференционной картины позволял получить высокую эффективность дифрагированного пучка, создающего изображение;
- иметь диффузную составляющую в отраженном излучении достаточную, чтобы реализовать возможности голографического метода, а именно: излучение, рассеянное отдельной точкой объекта, должно полностью освещать регистрирующую среду.

Следует иметь в виду, что объекты из дерева, пластмассы, бумаги не получаются, т.к. во время регистрации происходит сдвиг

отдельных деталей и элементов структуры этих объектов и интерференционная картина “размывается”.

Регистрирующая среда, используемая в работе – фотопластинки ПФГ-03 производства объединения «Славич» (Россия, г.Переяславль-Залесский). Размер фотопластинок определяется размером объекта и условиями регистрации и выбирается из стандартных размеров, которые выпускает изготовитель фотоматериалов. Обычно используют фотопластинки размером 76x76мм; 102x102мм; 90x120мм.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности на голографической установке.

2. Ознакомиться с оптической схемой конкретной установки, работой отдельных элементов и правилами их юстировки.

3. Подготовить композицию к съемке, закрепить все элементы композиции и оптической схемы на плите. (Обычно используются для закрепления магниты-держатели или специальные замазки-клеи.)

4. Промоделировать установку фотопластинки в оптическую схему установки с помощью стекла такого же размера.

5. Приготовить рабочий раствор проявителя ПРГ-1 из запасных растворов А и Б. Все компоненты проявителя смешиваются непосредственно перед проявлением в соотношении: 1 часть раствора А + 1 часть раствора Б + 13 частей дистиллированной воды.

6. Включить фонарь с зеленым фильтром, свет которого не засвечивает фотопластинку.

7. Перекрыть излучение гелий-неонового лазера затвором с дистанционным управлением.

8. Вынуть фотопластинку из черной бумаги и установить ее эмульсией к объекту. Выключить фонарь.

9. Обеспечить выдержку фотопластинки перед экспозицией 5-10 минут в стабильных условиях.

10. Открыть затвор - время экспозиции 30-60 секунд (согласовать с преподавателем); закрыть затвор;

фотопластинку вынуть из схемы и защитить от засветки перед проявлением.

11. Опустить пластинку в кювету с проявителем эмульсией вверх, время проявления 10-20 минут (уточнить у преподавателя).

12. Промыть голограмму в течение 10-20 минут в проточной воде.

13. Высушить голограмму в вертикальном положении.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Проверить качество полученной голограммы, наблюдая изображение объекта-композиции при различных условиях освещения:

- При рассматривании объекта, освещаемого монохроматическим светом;
- При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой монохроматическим светом;
- При наблюдении изображения объекта с помощью голограммы, освещаемой «белым» светом.

2. Определить условия освещения голограммы для получения максимального визуального эффекта при наблюдении изображения объекта. Проанализировать различия зрительного восприятия объекта при использовании трех вышеуказанных условий освещения.

3. На основании проведенного анализа отметить недостатки полученной голограммы и объяснить, чем они обусловлены (нестабильностью условий регистрации голограммы; нарушением технологии процесса химико-фотографической обработки; качеством фотопластинки).

4. Защитить эмульсию фотопластинки от возможных повреждений (с помощью прозрачных пленочных покрытий), и придать голограмме товарный вид с помощью окантовки готового изделия.

Дополнительные задания по указанию преподавателя

1Д. Проверить свойство делимости голограммы, используя при наблюдении «голографического» изображения диафрагму из черной бумаги, которая закрывает часть поверхности голограммы.

2Д. Создать условия для наблюдения с помощью полученной голограммы действительного псевдоскопического изображения объекта при использовании обращенной опорной волны. Проанализировать полученные результаты схематически и на основе зрительного восприятия (ощущения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. – Л.:ГОИ. – 1978. – 125с.
2. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах. В кн.: Оптическая голография; Под ред. Колфилда Г.(перевод под ред. Гуревича С.Б.) – М.:Мир. 1982. – Т.2. – С.691-729.
3. Денисюк Ю.Н. Изобразительная голография. – «Наука и человечество», 1982, М.: «Знание». (опубликовано в сб.: Труды ГОИ, т.68, вып.202, с.212-228).
4. Денисюк Ю.Н. Мой путь в голографии. В кн.: Ю.Н.Денисюк – основоположник отечественной голографии: Сб. научн. тр. – СПб, 2007. – С.7-14.

Приложение 1

Введение

Прежде, чем приступить к исследованию параметров и характеристик полупроводниковых лазеров, необходимо понять природу как оптического излучения, так и процессов определяющих свойства веществ по отношению к электрической проводимости.

Из школьного курса физики известно, что по отношению к электрической проводимости вещества делятся на проводники (удельное сопротивление – 10^{-6} - 10^{-10} Ом·м) и диэлектрики (удельное сопротивление – 10^8 – 10^{14} Ом·м). Существует, однако, огромное количество веществ, называемых полупроводниками, удельное сопротивление которых лежит в промежуточной области значений и, более того, сильно зависит от внешних условий. Масса таких веществ составляет примерно 4/5 массы земной коры. Это ряд элементов (германий, кремний, бор и др.), большинство минералов, различные оксиды, сульфиды, теллуриды и др. химические соединения. Их удельное сопротивление сильно зависит от температуры, освещения и наличия примесей в веществе.

Напомним, что для объяснения хорошей электрической проводимости металлов рассматривалось строение атома металла, образование металлической кристаллической решетки, образование электронного облака, т.е. электрические свойства вещества, по всей видимости, определяются строением его атома, кристаллической решетки и процессами, происходящими в ней.

Вопросы же связанные с природой оптического излучения можно рассматривать только с точки зрения атомарных явлений.

Таким образом, строение и свойства атома являются самыми актуальными вопросами для понимания процессов, изучаемых данным практикумом.

I. Атом. Оптические свойства атома. Уровни энергии.

Не углубляясь в историю развития физики, отметим, однако, что экспериментальные открытия на рубеже XIX-XX веков показали, что в области микромира, т.е. на уровне атомов и молекул не применимы используемые ранее законы классической физики – механики Ньютона и электродинамики Максвелла.

Опираясь на исследования Фарадея, показавшие связь между электрическими и оптическими явлениями, Максвелл предположил наличие электромагнитных волн, источником которых является электрический заряд, движущийся с ускорением, и предположил, что свет – электромагнитная волна, распространяющаяся с определенной частотой.

Предсказанные теорией Максвелла в середине 60-х годов электромагнитные волны, были впервые получены в 1886 году Герцем. Однако открытое Герцем в том же году явление фотоэффекта и работы других ученых в области тепловых излучений показали, что электромагнитное излучение состоит из порций энергий, т.н. квантов (подобно дождю, состоящему из отдельных капель), появление которых никак не могло объясняться теорией Максвелла. Работы же Резерфорда по рассеиванию α - частиц в 1912 году обосновали ядерную модель атома, согласно которой отрицательные электроны вращаются вокруг положительного ядра на круговых орбитах. Однако, если следовать теории излучения электромагнитных волн Максвелла, электрон, движущийся по круговой орбите (а следовательно, с ускорением), должен излучать электромагнитные волны постоянно, терять при этом энергию и за ничтожное время должен упасть на ядро.

Дальнейшие исследования и предположения позволили датскому ученому Нильсу Бору интуитивно постулировать строение атома и процессов, происходящих в нем.

Первый постулат Бора гласит: атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E . В стационарном состоянии атом не излучает.

Согласно второму постулату Бора излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_2 в стационарное состояние с меньшей энергией E_1 . При этом происходит излучение кванта энергии, равному разности энергий стационарных состояний. Частота излучения равна отношению разности энергий к константе, называемой постоянной Планка и равной $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

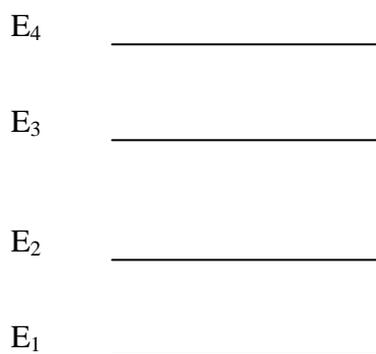
$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Интуитивно предложенная теория Бора хорошо согласовывалась со всеми уже известными экспериментальными результатами, и кроме

того дала толчок развитию квантовой механики, оптики, атомной физики, физики твердого тела и других разделов физики.

Рассмотрим более подробно, что же следует из постулатов Бора с точки зрения строения атома и его оптических свойств.

Значение энергии, которой обладает атом, связано с потенциальным взаимодействием заряженных частиц: электронов и ядра. Таким образом, она зависит от расстояния между ними или, можно сказать, от значения радиусов орбит электронов и их распределения на этих орбитах. Можно сказать, что каждый атом характеризуется определенным набором разрешенных электронных состояний (определенным распределением электронов по разрешенным орбитам), каждое из которых характеризуется соответствующим значением энергии. Чем больше значение энергии в ряду разрешенных, тем больше радиус разрешенной орбиты, на которой могут находиться электроны. Наименьшее значение энергии атома соответствует основному или невозбужденному состоянию атома, при котором электроны занимают ближайшие к ядру разрешенные электронные орбиты.



С точки зрения I постулата Бора можно описывать состояние атома при помощи энергетических диаграмм. Очень важно, что атомы не могут находиться в состояниях с энергиями отличными от значений E_1 , E_2 , E_3 и т.д. Такие состояния запрещены.

Каким же образом можно возбудить атом, т.е. перейти на верхний уровень энергии (или с точки зрения электронов, изменить их распределение по электронным орбитам, удаляя от ядра)? Очевидно, что необходимо передать ему определенную долю энергии, равную разности энергий стационарных уровней.

С точки зрения электронов, взаимодействующих с ядром, это означает появление дополнительной энергии, необходимой чтобы перейти на орбиту с большим радиусом.

Эту энергию можно передавать различными способами . Например бомбардировать атомы частицами, имеющими энергию равную энергетическому зазору, или освещать электромагнитными волнами с необходимой энергией квантов. При этом атом будет переходить в возбужденное состояние,

Переходя из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией, атом отдает энергию, причем энергия может выделяться в различных видах: тепловой энергии, энергии химической реакции, оптического излучения. С точки зрения оптических свойств атома, самым главным является тот факт, что процесс излучения света происходит исключительно при переходе из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией и частота излучения определяется энергетическим зазором уровней энергии.

Очевидно, что процесс поглощения света – процесс обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в более высокие. При этом он поглощает те же самые частоты, которые излучает. Схематически на энергетических диаграммах это можно изобразить так:



II. Принцип действия оптических квантовых генераторов.

Итак, при прохождении света через вещество интенсивность его должна уменьшаться за счет потери энергии, затраченной на возбуждение некоторых атомов самого вещества. Часть возбужденных атомов может переходить в невозбужденное состояние, высвечивая при этом кванты света, может переходить в основное состояние неоптическим путем, но так или иначе, закон изменения интенсивности прошедшего света в зависимости от толщины слоя вещества будет выражаться экспоненциальной зависимостью(закон Бугера)

$$U = U_0 \cdot e^{-kl}$$
, где U_0 - интенсивность падающего света
 l - толщина образца, через который
проходит свет
 k - коэффициент поглощения, зависящий
от свойств вещества.

При выводе этой зависимости предполагалось, что большинство атомов находятся в основном энергетическом состоянии. И надо сказать, что при малых интенсивностях падающего света закон Бугера хорошо согласуется с экспериментальными измерениями.

Однако при увеличении интенсивности света зависимость интенсивности прошедшего света начинает сильно отличаться от теоретических расчетов, что заставляет предположить о возникновении некоторых процессов, не учитывающихся при теоретических расчетах. В самом деле, при прохождении через вещество света большой интенсивности большая часть атомов будет находиться в возбужденном состоянии и, казалось бы, взаимодействовать с падающим излучением уже не будет. Однако на самом деле возбужденный атом взаимодействует с падающим квантом! Под действием падающего кванта атом будет переходить в невозбужденное состояние, высвечивая квант света, ничем не отличающийся от падающего, согласованный с падающим по всем оптическим параметрам. Возможность такого процесса была теоретически высказана Эйнштейном еще в 1916 году. Такой процесс называется вынужденным или резонансным излучением. Таким образом, при большой интенсивности падающего излучения доля поглощенных квантов уменьшается (все атомы возбуждены), а вынужденное испускание квантов становится заметным, что может привести не только к нарушению закона ослабления интенсивности, но и, при определенных условиях, к усилению падающего потока. Условием такого процесса является превышение количества возбужденных атомов над невозбужденными или в терминах энергетических уровней - заселенности верхних энергетических уровней над невозбужденными состояниями. Реализация такого состояния называется созданием инверсной заселенности.

Впервые идея подобного усиления была предложена в 1939 году в работе Фабриканта, авторское свидетельство на новый способ усиления света относится к 1951 году.

Итак, если создать в веществе инверсную заселенность, то одного кванта будет достаточно чтобы вызвать лавинообразный поток индуцированного излучения, все кванты которого будут согласованы

между собой по фазе излучения, по длине волны, по поляризации – т.е. создать вид излучения, который называется когерентным.

Очевидно, что все описанные процессы справедливы для электромагнитных волн любой части спектра. Кстати, первые усилители были получены именно в области радиоволн (так называемые мазеры). Однако нас интересуют именно оптические процессы, и в дальнейшем мы будем рассматривать принцип действия оптического квантового генератора или лазера. (Слово лазер является аббревиатурой английской фразы Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

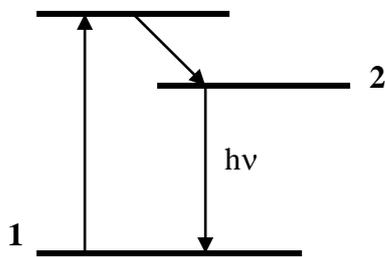
Итак, для создания лазерного излучения необходимо создать инверсную заселенность одного уровня энергии относительно другого, т.е. количество атомов с энергией E_2 больше количества атомов с энергией E_1 , при условии, что E_2 больше E_1 . Не вдаваясь в дебри атомной и молекулярной спектроскопии надо отметить, что энергетические системы, образованные двумя уровнями энергии, строго говоря, обладают разными свойствами. Если в системе возможен переход из одного состояния в другое при поглощении кванта света, то такой переход называется разрешенным, но время жизни системы в возбужденном состоянии мало и составляет порядка 10^{-8} с, т.к. атом достаточно быстро переходит в невозбужденное состояние, спонтанно (самопроизвольно) высвечивая при этом квант света. Однако не всегда между двумя уровнями энергии (или возможными состояниями атома) существует оптический переход. Тогда уровень E_2 называется оптически запрещенным по отношению к уровню E_1 . Таким образом, если атом каким-либо образом оказался в состоянии с энергией E_2 , то перейти на нижний энергетический уровень с излучением кванта света не может. Такой уровень по отношению к уровню E_1 называется метастабильным и время жизни атома в таком состоянии составляет примерно 10^{-3} с.

Использовать для создания инверсной заселенности двухуровневую оптически разрешенную систему практически невозможно из-за большой вероятности спонтанных переходов. Если же использовать двухуровневую систему с запрещенным переходом, то как попасть на метастабильный уровень?

Задача создания инверсной заселенности напоминает ситуацию, когда надо закинуть мяч на лапу сосны. Снизу с поверхности земли это сделать невозможно (запрещенный переход), но если подкинуть мяч выше ветки (разрешенный переход) с небольшим навесом, то поставленную задачу можно решить. Мяч на лапе сосны

естественно вечно находиться не будет и когда-нибудь оттуда скатится, однако продолжительность этого состояния значительно больше времени пребывания мяча в верхней точки траектории при бросании мяча вертикально вверх – не за что зацепиться.

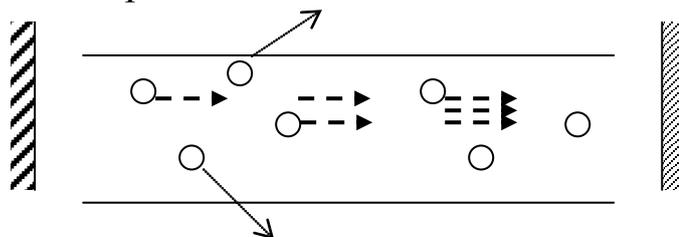
Таким образом, для реализации состояния инверсной заселенности, по всей видимости, необходима система, состоящая, по крайней мере, из трех энергетических уровней. Впервые лазерная генерация была осуществлена на кристалле рубина. Рубин – это ярко-красный кристалл окиси алюминия с примесью атомов хрома (около 0,05%), но именно уровни ионов хрома в кристалле обладают требуемыми свойствами.



При помощи мощной лампы накачки осуществляется оптически разрешенный переход 1→3. За счет теплового колебания кристаллической решетки система теряет часть энергии и неоптически переходит в состояние 2, которое является метастабильным по отношению к состоянию с энергией 1, что и позволяет создать инверсную заселенность уровней.

Самопроизвольный переход 2→1 вызывает резонансный лавинообразный обвал уровня 2 и индуцированное излучение между уровнями 2→1 в различных направлениях.

Обычно, чтобы получить мощное направленное излучение, рабочая среда лазера имеет вытянутую форму вдоль какой-либо оси (чаще цилиндрическую), в торцах которой находятся зеркала, обеспечивающие многократное усиление излучения именно вдоль оси рабочей среды.



В настоящее время существует достаточно много типов лазеров, отличающихся как режимом генерации – импульсные и непрерывные – так и по видам сред, в которых осуществлена генерация: твердотельные, газовые, полупроводниковые, лазеры на красителях и т.д. Однако все они имеют три необходимые составляющие:

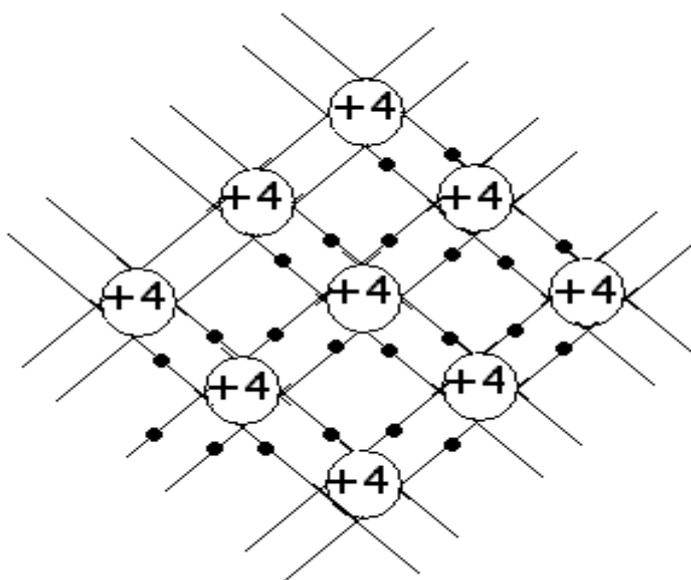
1. Система возбуждения
2. Среда, в которой создается инверсная заселенность
3. Резонатор, позволяющий получить достаточно мощное излучение.

Поскольку объектом изучения данного практикума являются полупроводниковые оптоэлектронные приборы, одним из которых является полупроводниковый лазер, имеет смысл рассмотреть более подробно с точки зрения введенных выше терминов как свойства самих полупроводников, так и условия генерации лазерного излучения на этих средах.

III. Полупроводники. Энергетические зоны. Полупроводники n- типа и p- типа.

Как было сказано во введении, полупроводники составляют большую часть массы земной поверхности и достаточно разнообразны по своим химическим составляющим. Основным

характерным свойством полупроводников является зависимость проводимости тока от внешних условий, в частности температуры и освещенности, а также наличия в веществе примесей. Рассмотрим



подробнее, чем вызваны такие свойства и опишем эти процессы с точки зрения модели энергетических состояний.

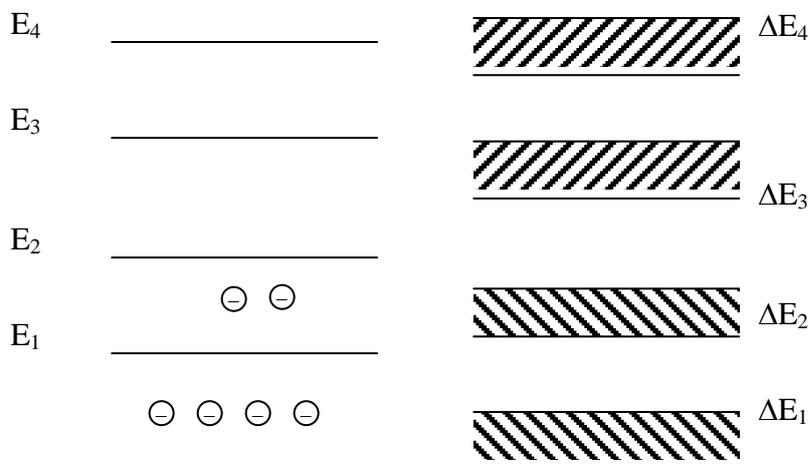
Характерным представителем полупроводников является кремний – элемент IV группы таблицы Менделеева, атомы которого образуют кристаллическую решетку за счет ковалентной неполярной

связи. Все четыре валентных электрона, находящиеся на внешней электронной оболочке, участвуют в образовании связей с соседними атомами, образуя кристаллическую решетку, схематически изображенную на рисунке

Валентные электроны указаны в виде точек на отрезках, соединяющие соседние атомы. Таким образом, в кристалле кремния при комнатных температурах и несильной освещенности нет свободных носителей зарядов и, следовательно, отсутствует возможность существования в среде электрического тока. Однако при передаче системе дополнительной энергии усиливается колебательное движение узлов кристаллической решетки, что приводит к нарушению парных связей и образованию свободных электронов. В области пространства, покинутого электроном, возникает при этом локализованный избыточный положительный заряд, который можно рассматривать как некую положительную квазичастицу называемую обычно дыркой. На место ушедшего электрона может перейти электрон соседнего атома, образовав на своем месте дырку. Таким образом, можно говорить о дрейфе дырок или о движении положительного заряда, наряду, естественно, с наличием свободных электронов. Возникает собственная проводимость полупроводника.

Попробуем описать данную ситуацию сточки зрения энергетических диаграмм.

До сих пор мы рассматривали атом с несколькими электронами как сложную систему с набором стационарных состояний, характеризующимися дискретными значениями энергии. Тем не менее оказывается, что для атома можно приближенно говорить о состояниях каждого электрона в отдельности с соответствующим им значениям энергии. Таким образом, появляется понятие энергетического уровня электрона. Качественно энергетическая схема соответствующая отдельному атому изображена на рис. а. Состояния, которым соответствуют уровни энергии E_1 и E_2 заполнены электронами, при чем наивысшее из заполненных состояний (уровень E_2) содержит валентные электроны, за счет которых осуществляется химическая связь данного атома с другими атомами. Состояние, соответствующее уровню E_3 является наинизшим из числа свободных, то есть не заполненным электронами. При этом любое состояние электрона с энергией между уровнями является запрещенным.



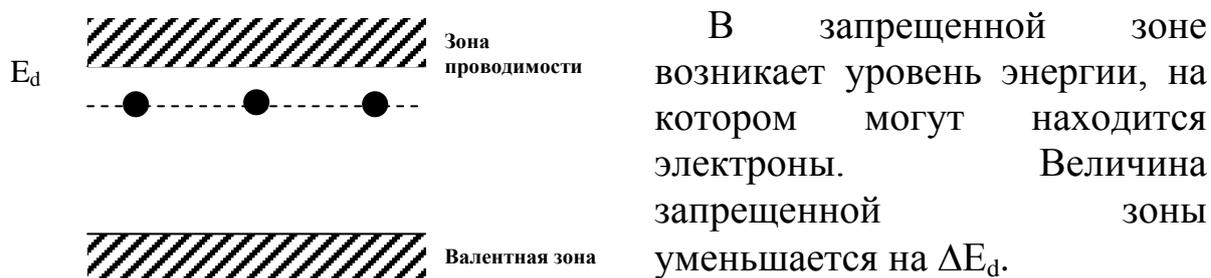
При объединении атомов в кристаллы картина меняется. За счет энергии взаимодействия между атомами разрешенное энергетическое состояние расширяется, превращаясь в интервал разрешенных состояний, имеющий конечную энергетическую ширину, называемый энергетической зоной.

Ближайшую к валентной зоне энергетическую зону ΔE , разрешенную совокупность состояний, соответственно не занятую электронами, называют зоной проводимости. Для унификации терминологии интервал энергий между валентной зоной и зоной проводимости называют запрещенной зоной. Энергетический интервал между нижним краем зоны проводимости и высшим краем валентной зоны называют шириной запрещенной зоны.

Если каким либо образом передать системе энергию, большую энергии запрещенной зоны, то электрон переходит в свободное состояние, или в зону проводимости. На его месте в валентной зоне образуется состояние с избыточным положительным зарядом, которое ведет себя как положительная квазичастица. Его принято называть дыркой. Образовавшиеся электрон и дырка являются носителями тока в полупроводнике. В чистом (беспримесном) полупроводнике устанавливается равновесная концентрация электронов и дырок, зависящая от температуры, освещенности и ширины запрещенной зоны. При низких температурах и при отсутствии сильного освещения все электроны находятся в валентной зоне, свободных носителей зарядов нет. Полупроводник является диэлектриком.

Однако, как было уже отмечено, проводимость полупроводника сильно зависит от наличия в них примеси, дефектов кристалла и других неоднородностей. Рассмотрим ситуацию, когда в кремний внесена небольшая примесь пентавалентного атома мышьяка As. При замещении атома кремния атомом мышьяка 4 его валентных электрона осуществляют химическую связь с четырьмя соседними атомами кремния, пятый же электрон оказывается очень слабо связанным со своим атомом. Уже при комнатной температуре энергии теплового движения атомов достаточно для отрыва этого электрона от атома и он становится свободным электроном проводимости. Число свободных электронов становится значительным, число же дырок остается таким же, как было до введения примеси. Концентрация электронов превышает концентрацию дырок, полупроводник становится проводником n-типа (n – negative – отрицательный). Примеси такого типа называются донорными примесями.

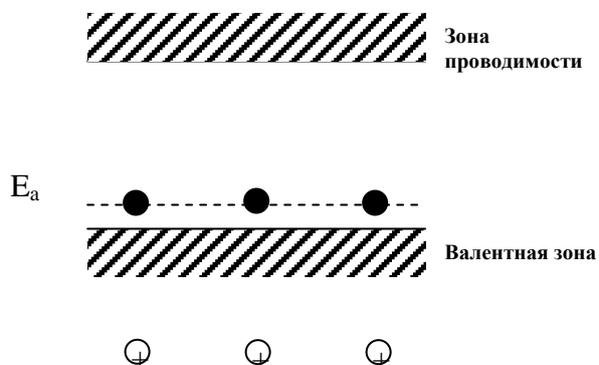
С точки зрения энергетических диаграмм это можно изобразить следующим образом.



Нетрудно догадаться, что при введении в кристаллы кремния трехвалентного атома бора В, картина преобразуется с перевесом в сторону дырочной проводимости. Действительно, три валентных электрона бора осуществляют ковалентную связь с тремя атомами кремния. С четвертым из соседних атомов кремния он ничем не связан. Один из ближайших атомов кремния может отдать свой валентный электрон и таким образом заполнить недостающую связь атома бора с четвертым атомом кремния. Тогда у атома кремния, от которого ушел валентный электрон окажется избыточный положительный заряд. Полупроводник становится проводником p-

типа (p – positive – положительный). Примеси такого типа называются акцепторными примесями.

С точки зрения энергетических диаграмм это можно изобразить следующим образом.

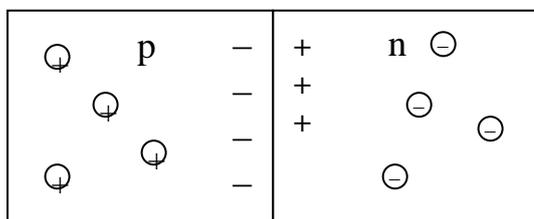


Электрон, находящийся на акцепторном уровне энергии не попадает в зону проводимости, но в валентной зоне на их месте образуется большое количество дырок, осуществляющих проводимость тока.

IV. p-n переход. Особенности контактного слоя. Условия генерации полупроводникового лазера.

Практическое значение для полупроводниковых приборов имеет на самом деле область контакта полупроводников разных типов, которую называют электронно-дырочным переходом или p-n переходом. Такой контакт двух полупроводников можно осуществить, если например, на пластинку германия с электронной проводимостью (n-типа) наплавить каплю трехвалентного индия. Поверхностный слой германия, в который на некоторую глубину проникают атомы индия, станет дырочным полупроводником (p-типа). Между областями германия с электронной и дырочной проводимостью возникает p-n переход. Рассмотрим свойства такого p-n перехода. Электроны в n-полупроводнике являются основными свободными носителями, участвующими в тепловом движении, диффундируют через границу в полупроводник p-типа, рекомбинируя там с дырками. Аналогично, дырки диффундируют в полупроводник n-типа. В результате диффузии и рекомбинации приконтактная область обедняется свободными основными носителями и на границе полупроводника n-типа возникает переизбыток положительного заряда, а на границе p-типа – отрицательного.

Возникшее электрическое поле препятствует дальнейшей диффузии зарядов.



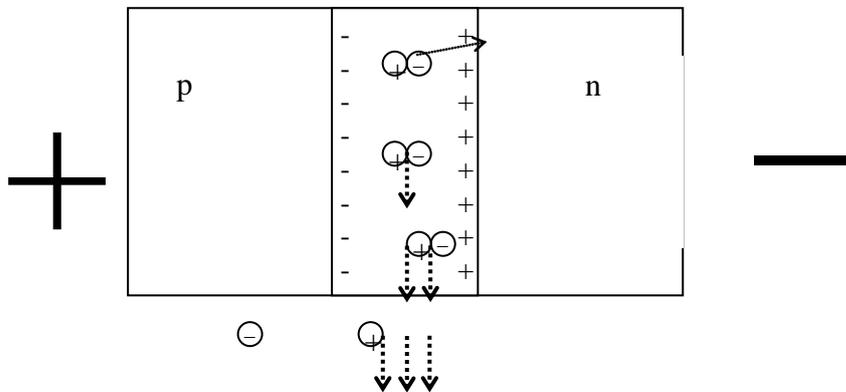
Создается область, обедненная носителями свободных зарядов, или двойной заряженный слой. Если подключить полупроводник, содержащий p-n переход, к источнику напряжения так, что к область p-типа будет приложен $+$, а к области n-типа $-$, то внешнее электрическое поле будет

перемещать основные носители зарядов в область p-n перехода. Через контактный слой будет идти ток, осуществляемый основными носителями. При этом электрическое сопротивление контактного слоя мало, ток может иметь большие значения, и такое подключение источника поля называют прямым. При изменении полярности источника тока ток через p-n переход осуществляется неосновными носителями. Сопротивление слоя велико, ток, называемый в этом случае обратным или темновым, мал. Свойство односторонней проводимости p-n перехода используют при создании полупроводниковых диодов и транзисторов.

Однако область p-n перехода обладает и другими интересными особенностями.

Вернемся назад и вспомним, что для образования пары электрон-дырка в определенных условиях достаточно энергии светового кванта. Логично было бы предположить, что рекомбинация пары электрон-дырка может происходить с излучением светового кванта (по аналогии с излучением атома переходящего из возбужденного состояния в стационарное). Действительно при прямом включении источника напряжения к полупроводнику в область p-n перехода переносятся основные носители зарядов, вероятность рекомбинации которых с излучением светового кванта достаточно велика. На этом принципе основано действие светодиодов. Однако при достаточно большом значении прямого напряжения (или прямого тока) в области контактного слоя возникает достаточно большая концентрация носителей зарядов (своего рода инверсная заселенность), приводящая

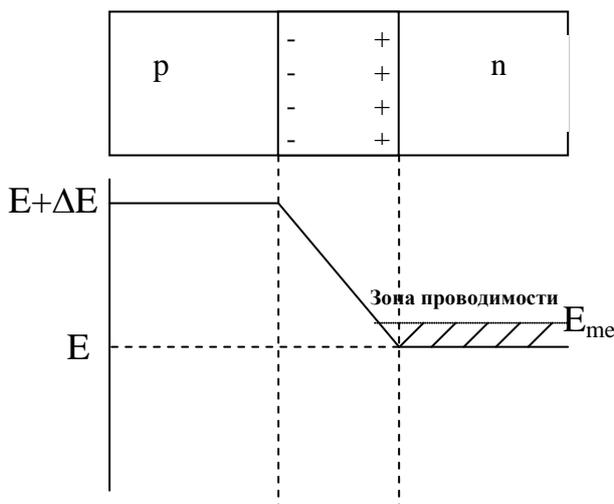
к появлению не просто хаотичных, несвязанных между собой квантов света, а к возникновению скореллированного по фазе поляризованного излучения, или когерентного лазерного излучения, вызванного в данном случае вынужденной рекомбинацией электронов и дырок.



Для реализации лазерного излучения кроме создания инверсной заселенности необходима также резонансная система, позволяющая осуществлять усиление такого излучения. В случае полупроводникового кристалла с р-п переходом отражающими поверхностями служат отполированные грани самого кристалла.

V. р-п переход. Особенности контактного слоя. Условия генерации полупроводникового лазера с точки зрения энергетических диаграмм.

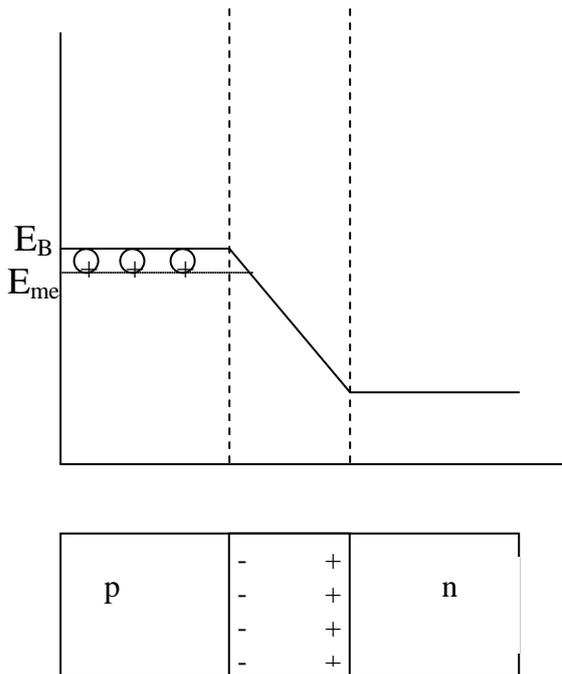
Рассмотрим сначала схему энергетических уровней для электронов полупроводника n-типа.



При комнатной температуре часть электронов полупроводника n-типа находится в зоне проводимости. Чтобы проникнуть через р-п переход в зону р-проводника им надо иметь дополнительную энергию чтобы преодолеть электрическое поле двойного

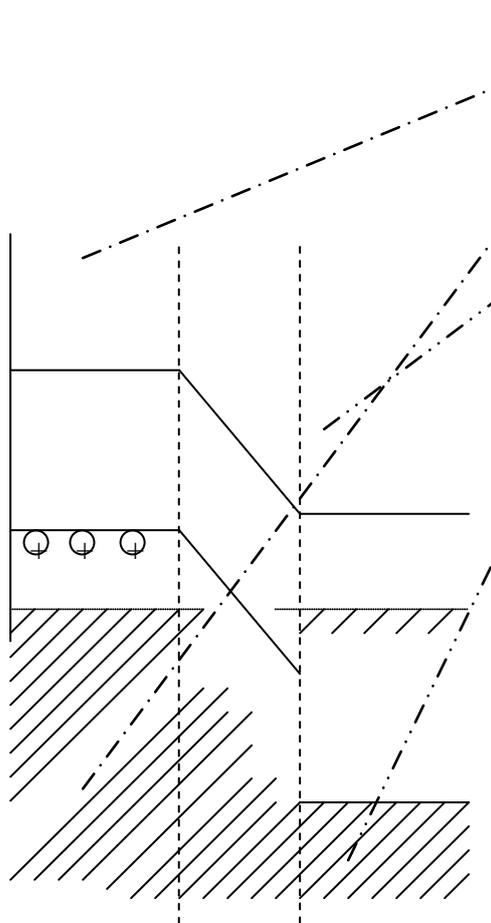
заряженного слоя. Следовательно, в р-области они должны иметь энергию $E + \Delta E$. Наклонный участок АВ называется энергетическим барьером.

Рассмотрим теперь валентную зону р-области полупроводника.



Так называемые дырки или носители положительных зарядов на самом деле означают отсутствие электрона. То есть чем меньше энергия дырки, тем ближе она находится к верхнему краю валентной зоны. Чем больше ее энергия, тем ниже будет реальный энергетический уровень электронов. Таким образом, при переходе через р-п переход реальный энергетический уровень валентной зоны понижается.

В равновесном состоянии в результате теплового движения максимальные уровни энергии электронов в р- и n-зонах выравниваются и в целом картина энергетических уровней выглядит следующим образом.

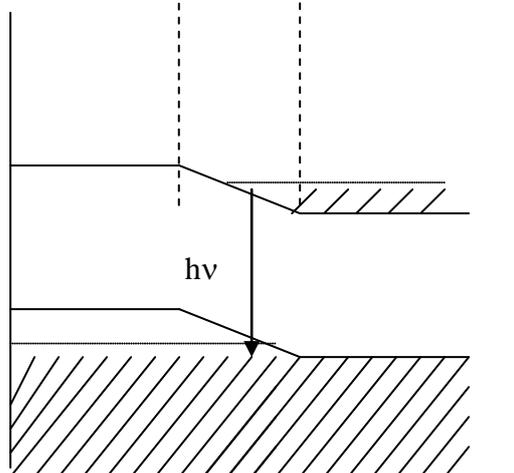


Зона проводимости в р-полупроводнике

Зона проводимости в n-полупроводнике

Уровни с максимальной энергией в р- и n-областях выравниваются

Уровни, заполненные электронами обозначены штриховкой.



При наложении прямого внешнего электрического поля происходит уменьшение энергетического барьера и смещение границ зон, заполненных электронами. Возникает возможность перехода электрона из зоны проводимости n-проводника в валентную зону р-проводника с излучением кванта света, что и соответствует ситуации рекомбинации дырка-электрон.

VI. Литература.

1. Степанов Б.И. Лазеры сегодня. Минск, Высшая школа, 1977.
2. Левинштейн М.Е., Симин Г.С. Барьеры. Москва, Наука, 1987.
3. Савельев И.В. Курс общей физики т.3.1982.
4. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б. Физика 10. 1978.
5. Волгин Ю.Н. и др. Оптика и атомная физика. Лабораторный практикум. Изд-во СПбГТУ, 1997.

Приложение 2

Терагерцовая область частот, находящаяся в пределах от 300 ГГц до 10 ТГц, представляет собой довольно значительную область спектра электромагнитного излучения, находящуюся между микроволновым и инфракрасным излучением (см. рис. 1) [1].

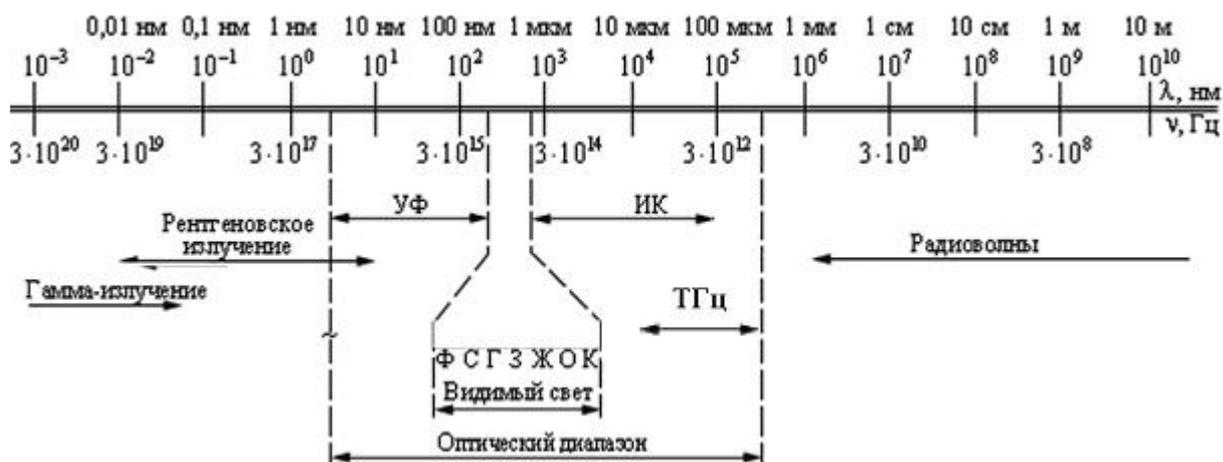


Рис.1. Шкала электромагнитных излучений.

Несмотря на сложности генерации терагерцового излучения, его уникальные свойства стимулируют освоение терагерцового диапазона. Перечислим некоторые отличительные особенности терагерцового излучения и вытекающие из них применения [2].

1. Терагерцовое излучение является неионизирующим, в отличие от рентгеновского излучения, используемого в медицинской диагностике. В то же время, различные биологические ткани обладают существенно различным поглощением в данном диапазоне, что позволяет обеспечить контрастность снимков. Однако высокое поглощение водой не позволяет терагерцовому излучению проникать глубоко в ткани, что ограничивает область его применения поверхностью тканей.

2. По сравнению с видимым и ИК излучением, терагерцовое излучение является длинноволновым, а значит, что оно менее подвержено рассеянию. В результате, в этом диапазоне прозрачны многие сухие диэлектрические материалы, такие как ткани, дерево, бумага, пластмассы. Поэтому терагерцовое излучение можно использовать для неразрушающего контроля материалов, сканирования в аэропортах, и пр. В то же время длина волны излучения достаточно мала, чтобы обеспечить субмикронное

пространственное разрешение при использовании свободно распространяющегося излучения. При использовании методов ближнего поля может быть достигнуто пространственное разрешение порядка нанометров.

3. В терагерцовом диапазоне лежат резонансы вращательных и колебательных переходов многих молекул. Это позволяет проводить идентификацию молекул по их спектральным «отпечаткам пальцев». В сочетании с получением изображения (имиджингом) в терагерцовом диапазоне это позволяет определить не только форму, но и состав исследуемого объекта.

4. Терагерцовое излучение может быть протектировано во временной области, т.е. может быть измерена как амплитуда, так и фаза поля. Это позволяет напрямую измерять вносимый исследуемым объектом сдвиг фаз, а значит, позволяет исследовать быстропротекающие процессы и даже управлять ими.

Таким образом, ультракороткие терагерцовые импульсы расширяют арсенал технических средств для оптоинформатики. Разработка терагерцовых технологий актуальна для усовершенствования внутренней и внешней связи в интегральных схемах (или чипах) [3], а также для создания радаров [1] для целей оптической томографии с разрешением во времени (T-ray imaging).

ТГц технологии в интегральных схемах

Метрология для полупроводниковой промышленности является одной из наиболее плодотворных и перспективных областей применения ТГц микроскопа. Требования все большей степени интеграции, более быстро функционирующих интегрально-дискретных элементов чипов, требование непрерывного увеличения объемов памяти и понижение потребления энергии показывают очевидные тенденции к насыщению. Решение возникающих проблем требуют инвестиций в поиски новых материалов и производственных технологий, что, в свою очередь, мотивирует дальнейшие изыскания и инновации в измерительных и диагностических технологиях [3]. Анализ существующих проблем и будущих измерительных технологий открывают широкие перспективы для ТГц микроскопии, прежде всего в применениях по анализу дефектов в подложках интегральных схем (ИС), межэлементных соединений внутри ИС, и контроля толщин и материальных различий в элементах ИС.

ТГц-локация

Наиболее перспективным направлением использования ТГц-технологий с использованием ультракоротких импульсов, по-видимому, является ТГц-томография и ТГц-локация. Принципиальная схема ТГц-локации приведена на рис. 2.

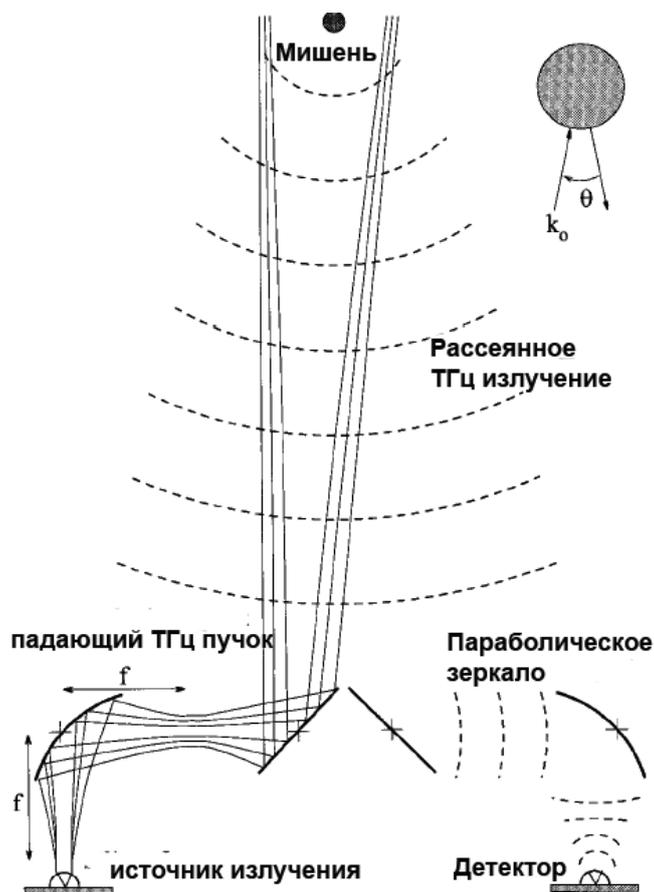


Рис. 2. Принципиальная схема ТГц-локации [4].

Источник ТГц излучения, с использованием параболического и простого металлических зеркал освещает цель, расположенную на удаленном расстоянии. Рассеянное и отраженное от цели ТГц излучение собирается оптической системой и попадает на детектор, включаемый в момент времени, соответствующий удвоенному проходу ТГц излучения до цели. В дальнейшем время включения детектора регулируется с использованием оптической линии задержки и регистрируется временная картина отраженного ТГц сигнала.

Следует отметить, что в реальной атмосфере присутствуют водяные пары, сильно ослабляющие ТГц-излучение, однако для космических применений ТГц-локация несомненно представляет интерес.

Литературные источники

1. Беспалов В.Г. Терагерцовая спектроскопия и тераграфия. – В кн. “Проблемы когерентной и нелинейной оптики: Сборник статей” Под редакцией И.П. Гурова и С.А. Козлова. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. С. 63.

2. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 75 с., 2011.

3. Трухин В.Н. и др. Взаимодействие терагерцового электромагнитного излучения с системой зонд-объект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе // Письма в ЖЭТФ, том 93, выпуск 3, стр. 134–138, 2011.

4. McGowan R. W., Grischkowsky D. Direct observation of Gouy phase shift in THz impulse ranging // Appl. Phys. Lett. 2000. V.76. P.670–672.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ

Кафедра фотоники и оптоинформатики готовит бакалавров и магистров по образовательному направлению 200700 «Фотоника и оптоинформатика».

В рамках указанного направления российские и иностранные преподаватели готовят специалистов для России и Евросоюза в одной из самых инновационных областей современной науки и техники.

В данной области разрабатываются и создаются:

- оптические и квантовые технологии сверхбыстрой передачи и записи информации;
- оптические системы искусственного интеллекта и сверхбыстродействующие процессоры;
- информационные оптические системы, строящиеся на основе новых физических принципов, в том числе на нанотехнологиях и метаматериалах.

Студенты кафедры участвуют в Международных конференциях, публикуют свои работы в ведущих мировых изданиях. Являются членами Российских и Международных научных сообществ. Среди студентов и аспирантов кафедры есть стипендиаты Президента и Правительства Российской Федерации.

Федерации, победители конкурсов научных работ проводимых Российской Академией наук, крупнейшими мировыми научными обществами, такими, как INTAS, SPIE, CRDF, OSA, IEEE Photonics Society.

В процессе обучения бакалавры и магистры получают глубокие знания и практические навыки, как в традиционных общих дисциплинах высшей школы, так и в таких профильных дисциплинах, как:

- оптическая физика,
- теория информации и информационных систем,
- архитектура вычислительных систем,
- системы и технологии фотоники,
- оптическая информатика,
- наноматериалы и нанотехнологии,
- квантовая информатика,
- языки программирования высокого уровня,
- технологии программирования на суперкомпьютерах,
- инновационный менеджмент в области высоких технологий.

В соответствии с учебными планами, уже со второго курса студенты кафедры имеют возможность набираться практического опыта в области фотоники и оптоинформатики. Они участвуют в работах Международных научных центров и лабораторий кафедры, а также в ведущих фирмах Санкт-Петербурга, которые работают в рамках Госзаказов Министерства Российской Федерации, по российским и международным грантам и контрактам.

Кафедра включает:

- Международный институт фотоники и оптоинформатики, который включает:
 - лабораторию квантовой информатики,
 - лабораторию фемтосекундной оптики и фемтотехнологий,
 - лабораторию ТГц биомедицины,
 - Международный центр Метаматериалов.

Кафедра располагает тремя компьютерными классами и двумя суперкомпьютерами.

Авторы:

Андреева Ольга Владимировна
Андреева Наталья Владимировна
Вовина Полина Алексеевна
Возианова Анна Викторовна
Парамонов Александр Александрович
Петров Николай Владимирович
Смолянская Ольга Алексеевна
Ходзицкий Михаил Константинович

Физические основы оптоинформатики

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

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

