

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

СХЕМОТЕХНИКА ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВОСП

Методические указания
к лабораторным работам

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017

Работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДИОДОВ

1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование вольт-амперных характеристик германиевого и кремниевого фотодиодов.

2. Задание на лабораторную работу

Перед выполнением работы должны быть изучены физические процессы в p-n структуре при прямом и обратном смещении освещенного и неосвещенного фотодиодов, особенности их вольт-амперных характеристик (зависимости тока через фотодиод от поданного на него напряжения) [2, с.272-277; 3, с.72-93].

Перед включением аппаратуры необходимо изучить описание лабораторной установки. Включение приборов производится с разрешения преподавателя.

В процессе выполнения лабораторной работы производится:

- изучение процессов в p-n структуре при прямом и обратном смещении освещенного и неосвещенного фотодиодов;
- изучение состава лабораторного оборудования;
- экспериментальное исследование вольт-амперных характеристик германиевой и кремниевой p-n структур.

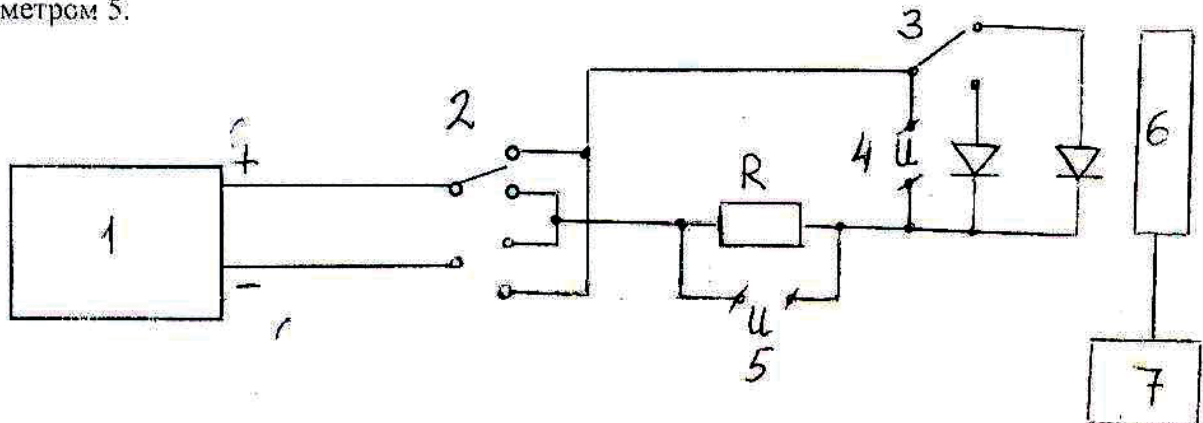
3. Описание лабораторной установки для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых фотодиодов.

Схема лабораторной установки приведена на рис.2.

Напряжение от источника питания 1 через резистор R подается на исследуемый фотодиод. Переключателем 3 осуществляется выбор одного из фотодиодов. Переключатель 2 позволяет изменить полярность напряжения и подавать на фотодиод прямое или обратное смещение.

Фотодиоды освещаются источником белого света 6; регулировка оптической мощности производится изменением напряжения блока питания источника излучения 7.

Напряжение на фотодиодах регистрируется вольтметром 4. Ток фотодиода определяется по величине напряжения на сопротивлении $R = 200 \text{ Ом}$, измеряемого вольтметром 5.



4. Методические указания к выполнению работы.

1.1. Изучить теоретические сведения по данной работе, изложенные в [2, с.272-277; 3, с.72-93].

При подготовке к лабораторной работе следует иметь в виду, что фотодиод представляет собой монокристаллическую полупроводниковую структуру, содержащую области с различными типами проводимости (n и p типа). На границе этих областей образуется область объемного пространственного заряда, называемая p-n переходом, которая обладает выпрямляющими свойствами. При приложении к неосвещенному p-n переходу внешнего электрического поля в прямом направлении высота потенциального барьера и ширина области пространственного заряда уменьшаются. Число носителей заряда, преодолевающих потенциальный барьер, увеличивается, и ток основных носителей заряда (электроны в n- области и дырки в p-области) возрастает.

При определенном значении обратного смещения диффузионный ток основных носителей становится равным нулю. Во внешней цепи протекает только небольшой обратный ток, образованный неосновными носителями.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) неосвещенного фотодиода, таким образом, определяется следующим выражением:

$$I = I_s \left[\exp\left(q \frac{U}{RT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где q – заряд электрона;

U – напряжение, приложенное к p-n переходу;

k – постоянная Больцмана;

T – температура в градусах Кельвина.

$$I_s = \frac{qD_n S}{L_n} n_{p0} + \frac{qD_p S}{L_p} p_{n0}$$

L_n, L_p – диффузионная длина для электронов и дырок соответственно;

D_n, D_p – коэффициенты диффузии для электронов и дырок соответственно;

S – площадь перехода.

При освещении фотодиода в обеих областях образуются пары носителей заряда. При этом дырки из n- области полем пространственного заряда переносятся в p-область, а электроны из p- области в n- область, т.е. p-n переход осуществляет пространственное разделение носителей заряда, возникших вследствие оптической генерации. Разделенные носители заряда уменьшают объемный пространственный заряд и создают между n и p областями разность потенциалов. ВАХ освещенного фотодиода имеет вид

$$I = I_s \left[\exp\left(q \frac{U}{RT}\right) - 1 \right] - I_{\phi}, \quad (3)$$

где I_{ϕ} – фототок.

$$I_{\phi} = \eta q \frac{P}{h\nu}, \quad (4)$$

η – квантовый выход (отношение числа носителей, созданных при воздействии света, к полному числу фотонов, падающих на фотодиод);

h – постоянная Планка;

ν – частота излучения;

P – мощность излучения.

Фототок начинает вносить существенный вклад в общий ток I при обратном смещении p-n перехода. При прямом смещении фототок становится слабозаметным на фоне большого прямого тока основных носителей.

Характеристики фотодиода в большой степени определяются используемым материалом полупроводника.

Одним из физических процессов, лежащих в основе работы фотодиода, является собственное поглощение оптического излучения. При этом оптическое излучение поглощается полупроводником, если ширина его запрещенной зоны меньше энергии кванта падающего излучения. Таким образом, существует длинноволновая граница поглощения полупроводника, которая для германия составляет 1,6 мкм, для кремния – 1,1 мкм. Ширина запрещенной зоны определяет темновые токи фотодиода (токи термически возбужденных из валентной зоны в зону проводимости электронов). Узкая запрещенная зона германия определяет больший в сравнении с кремниевыми фотодиодами темновой ток германиевого фотодиода.

1.2. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.

1.3. Произвести измерение вольт-амперной характеристики неосвещенного и освещенного кремниевое фотодиода при прямом и обратном смещении.

Для этого:

1. Включить вольтметры 4 и 5, источник питания фотодиода 1, предварительно убедившись, что регуляторы напряжения источника находятся в крайнем левом положении.
2. Установить переключатель 3 в положение «кремниевый фотодиод».
3. Установить переключатель 2 в положение «прямое смещение».

Необходимо учитывать, что прямой ток фотодиода не должен превышать 50 мА, что соответствует напряжению 10В на сопротивлении R. Величина тока в цепи определяется по результатам измерений напряжения на сопротивлении R=200 Ом вольтметром 5.

ВНИМАНИЕ! При измерении напряжения вольтметром 5 не следует допускать перегрузки прибора, для этого нужно своевременно переключить пределы измерений.

4. Произвести измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) неосвещенного кремниевое фотодиода при прямом смещении.
5. Установить переключатель 2 в положение «обратное смещение»
6. Снять ВАХ неосвещенного кремниевое фотодиода при обратном смещении.

ВНИМАНИЕ! Максимальное обратное смещение на фотодиоде не должно превышать - 10 В.

7. Включить блок питания 7 источника излучения 6 и установить ручку регулировки мощности излучения блока питания источника излучения в среднее положение (отмеченное риской).
8. Установить осветитель таким образом, чтобы приемное окно фотоприемника находилось в центре светового пятна.
9. Произвести измерения согласно пп.3-6.
10. Установить ручкой регулировки мощности максимальную мощность излучения.
11. Измерения повторить.

1.4. Произвести измерение ВАХ неосвещенного и освещенного германиевого фотодиода.

Для этого :

- установить переключатель 3 в положение «германиевый фотодиод»;
- произвести измерения согласно пп.3-11 раздела 4.3.

1.5. По полученным зависимостям определить: темновой ток фотодиодов, фототок, I_f при различных уровнях освещения.

Содержание отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Схему лабораторной установки.
2. Результаты измерения в виде графиков.
3. Величины фототоков и темновых токов для обоих фотодиодов.
4. Выводы по лабораторной работе и анализ полученных данных.

Контрольные вопросы.

1. Какова структура полупроводникового фотодиода?
2. Чем определяется фототок диода?
3. Что такое длинноволновая граница поглощения полупроводника?

Чем определяется темновой ток фотодиода?

Работа № 5.

Исследование диаграммы направленности полупроводниковых источников излучения.

1. Цель работы.

Целью работы является изучение принципа действия и конструкции светоизлучающего диода (СИД) и лазерного диода (ЛД), исследование диаграмм направленности СИД и ЛД.

2. Задание на лабораторную работу.

Перед выполнением работы должны быть изучены принцип действия, конструкция и основные характеристики полупроводниковых источников излучения /1, с. 125 - 127, 2, с. 184 - 200 /.

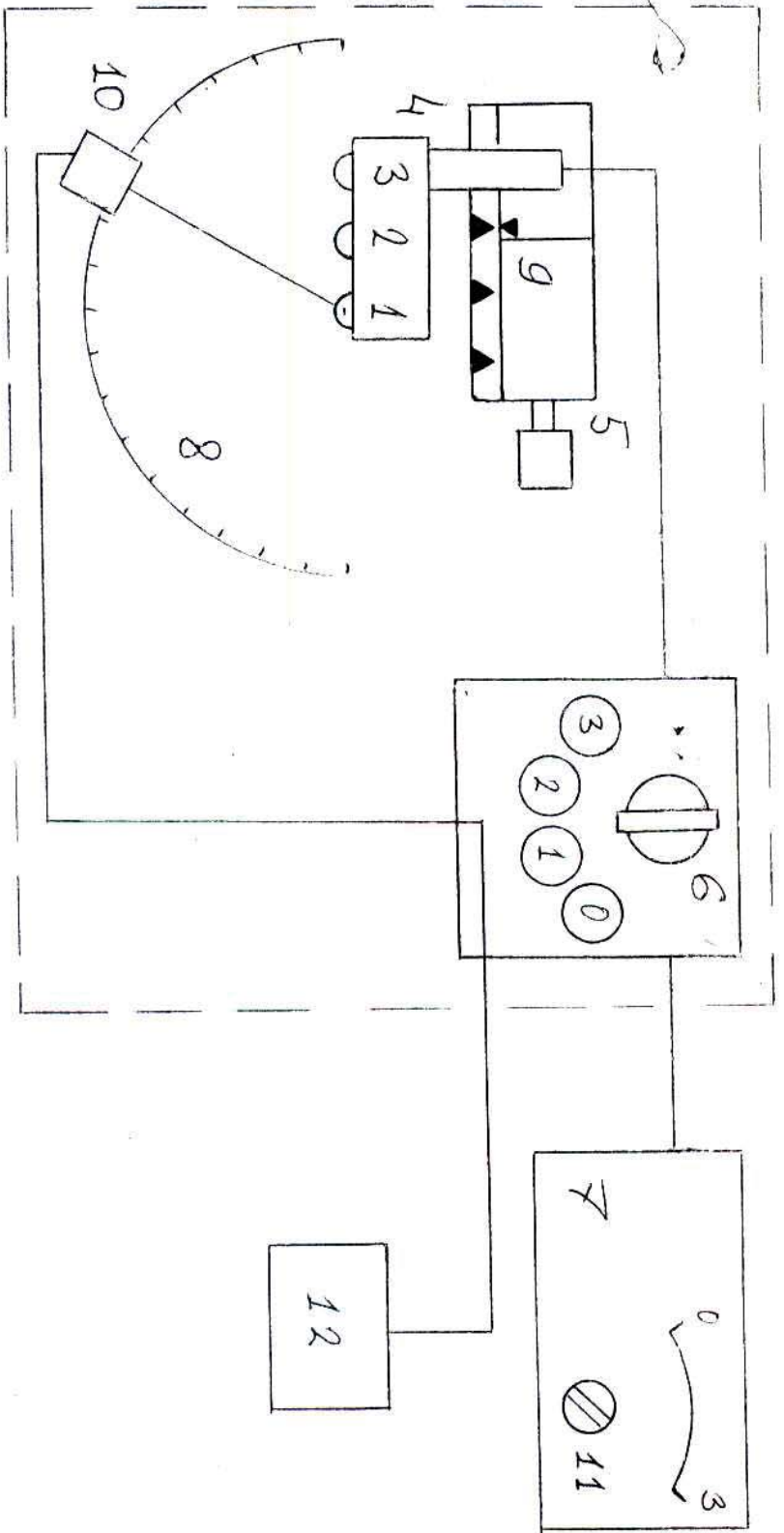
В процессе выполнения работы производится:

- измерение диаграммы направленности СИД и ЛД;
- определение полуширины и сравнение диаграмм направленности излучения СИД различных конструкций и ЛД.

3. Описание лабораторной установки.

Схема лабораторной установки изображена на рис. 1. Исследуемые СИД 1 и 2 и ЛД 3 укреплены в патроне 4 на микропозиционере (МП) 5. С помощью тумблера 6 осуществляется подача постоянного напряжения с блока питания 7 на исследуемый источник излучения (ИИ). Установка исследуемого ИИ в центр лимба 8 производится микропозиционером 5. Точное положение ИИ в центре окружности 8 соответствует совмещению указателей 9 на подвижной и неподвижной частях МП 5. При исследовании диаграммы направленности ЛД 3 в двух плоскостях патрон 4 необходимо повернуть на 90 градусов вокруг своей оси.

Интенсивность излучения источника измеряется с помощью фотодиода 10, работающего в фотогальваническом режиме. Сигнал с фотодиода измеряется



Pue. 1.

микроамперметром 12. Фотодиод может перемещаться по окружности с центром в точке размещения ИИ. Угол поворота отсчитывается по лимбу 8.

4. Методические указания к выполнению работы.

4.1. В лабораторной работе исследуются инжекционные поверхностные GaAs диоды ИК-диапазона и лазер на двойной гетероструктуре GaAlAs.

Следует помнить, что у диодов распределение спонтанного излучения из активной области носит изотропный характер. Поэтому распределение внешнего излучения после того, как оно преобразуется под действием рефракции при переходе из среды с большим показателем преломления в среду с малым показателем преломления, на передней поверхности будет приближенно ламбертовским, то есть

$$I = I_0 \cos \Theta,$$

Угол Θ отсчитывается от нормали к излучающей поверхности. Диаграмма направленности излучения такого СИД показана на рис. 2 (кривая 1).

Увеличения направленности излучения добиваются посредством встроенных в корпус СИД линз. Пример диаграммы направленности излучения такого СИД показан на рис. 2 (кривая 2). Степень направленности излучения определяется по ширине диаграммы направленности на заданном уровне интенсивности относительно максимального (например, на уровне $I = 0.5 I_0$).

В лазере с двойной гетероструктурой профилем усиления или профилем показателя преломления формируется полосковый световод в активном слое. Обычно толщина активного слоя $d_x \leq 1$ мкм, а ширина усиливающего слоя (полоскового волновода) $d_y \approx 5 \div 10$ мкм. В полупроводниковом лазере зеркалами резонатора служат плоские торцы кристалла и расходимость излучения определяется дифракционными эффектами. Так как $d_x \neq d_y$, то и диаграмма направленности излучения такого источника асимметрична (рис. 2, кривые 3 и 4).

4.2. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.

4.3. Измерить диаграммы направленности полупроводниковых источников излучения. Для этого с разрешения преподавателя включить вольтметр 10 и нажать клавишу I = (род работы) и клавишу АВП (пределы). Переключить тумблер 6 в положение "0". Ручку 11 плавной регулировки выходного напряжения

на лицевой панели блока питания 7 повернуть влево до упора. Включить блок питания 7.

Измерить диаграмму направленности СИД 1. Для этого переключить тумблер 6 в положение "1". Ручку 11 блока питания 7 повернуть вправо до упора. Микропозиционером 5 установить СИД 1 в центр лимба. Переместить фотодиод 10 в одно из крайних положений. Перемещая фотодиод по окружности измерить диаграмму направленности светодиода. Шаг измерения 10 градусов. Для определения углового положения фотодиода следует использовать риску под блендой фотоприемника. После окончания измерений повернуть ручку 11 блока питания влево до упора.

Тумблер 6 переключить в положение "2". Ручку 11 блока питания повернуть вправо до упора. Переместить СИД 2 в центр лимба и измерить его диаграмму направленности с шагом 5 градусов. По окончании измерений ручку 11 блока питания повернуть влево до упора.

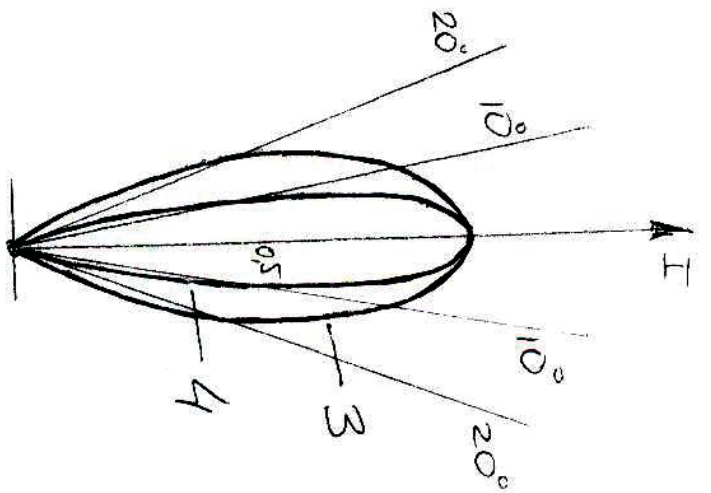
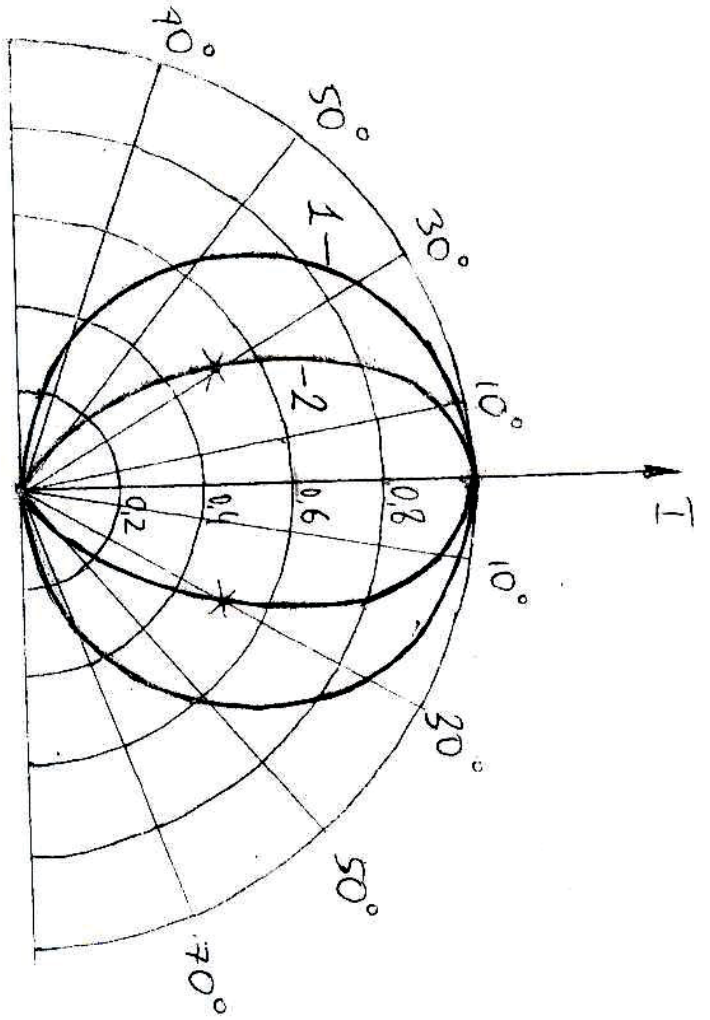
Повторить измерения для лазерного диода (источник излучения 3). Диаграмма направленности ЛД измеряется в двух плоскостях. Шаг измерения 5 градусов. По окончании измерений повернуть ручку 11 блока питания влево до упора и перевести тумблер 6 в положение "0".

4.4. По результатам измерения углового распределения интенсивности излучения построить нормированные ($I/I_0 = f(\Theta)$) диаграммы направленности исследуемых полупроводниковых источников излучения и определить их полуширину по уровню 0.5.

Содержание отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Схему лабораторной установки.
2. Таблицу результатов измерений.
3. Построенные диаграммы направленности излучения.
4. Выводы по лабораторной работе и анализ полученных результатов.



Pue. 2.

Контрольные вопросы.

1. Какое физическое явление является основой работы полупроводниковых источников излучения?
2. Какое пространственное распределение имеет спонтанное излучение из активной области?
3. Какими факторами определяется диаграмма направленности излучения полупроводникового лазера?
4. Какими путями можно увеличить эффективность ввода излучения светодиода в волоконный световод?

Литература.

1. Штернов А.А. "Физические основы конструирования, технологии РЭА и микроэлектроники" М., Радио и связь, 1981.
2. "Волоконная оптика и приборостроение" Под ред. М.М.Бутусова, Ленинград, Машиностроение, 1987.

5 Исследование конструкций полупроводниковых излучателей.

Цель работы

Изучить конструкцию полупроводниковых излучателей.

Задание на лабораторную работу

Изучить конструкцию полупроводникового лазера на основании технической документации изготовителя и визуального наблюдения с применением инструментального микроскопа.

Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета

цель работы,

краткие теоретические сведения о конструкции полупроводниковых излучателей

выполненный чертеж (схема) конструкции полупроводникового излучателя.

Теоретические сведения.

По конструкции различают светодиоды с поверхностным излучением и торцевым излучением.

При вводе излучения в волокно непосредственно с излучающей поверхности активного слоя, можно считать, что, по крайней мере, половина оптической мощности теряется, т. к. свет с активного слоя распространяется во всех направлениях. Небольшая часть оптической мощности может быть отражена путем базовой металлизации, внося тем самым часть оптической мощности в полезный световой поток. Другой простой путь решения заключается в ограничении излучения небольшой областью в нутрии кристалла большей площади. Этот подход впервые реализовали Баррас и Доусон и поэтому СИД такой геометрии обычно называют излучателями Барраса (рис. 2.2).

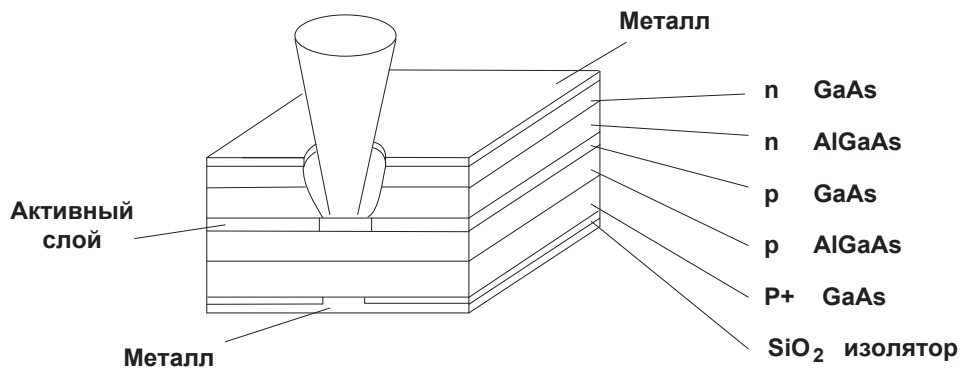


Рис. 2.2 Структура светодиода Барраса

В такой конструкции гравированная стенка позволяет минимизировать расстояние между активной зоной и волокном, а соответствующая форма контактов обеспечивает небольшую площадь излучения.

Большинство СИД с поверхностным, близким к ламбертовскому, излучением имеют большую цифровую апертуру, равную приблизительно 0.9. Для ее уменьшения во многих случаях используется особая форма линз, доводя NA до 0.2, но даже в этом случае излучающая поверхность достаточно велика для эффективного ввода излучения в одномодовое волокно. Уровень мощности света, вводимого в волокно, в лучшем случае обычно составляет 20 мкВт для градиентного волокна и 2 мкВт для одномодового волокна.

Лучшей эффективностью ввода излучения в волокно характеризуется СИД с торцевым излучением, обеспечивающим ввод около 50 мкВт (30% доступной оптической мощности) в градиентное волокно и 20 мкВт в одномодовое волокно. Конструкция диода приведена на рис. 2.3.

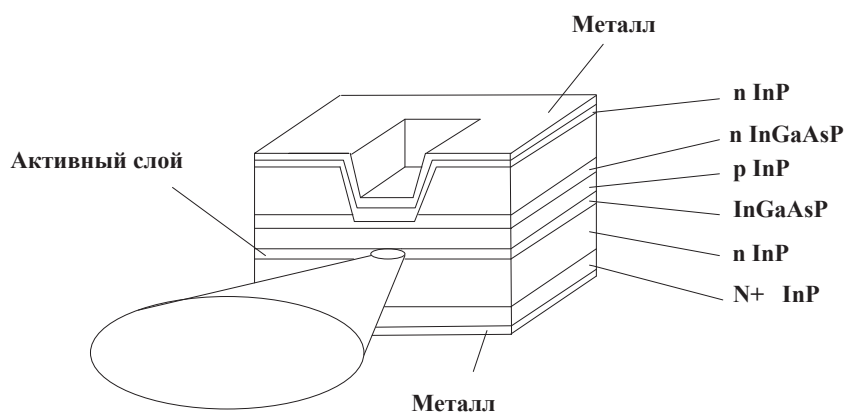


Рис. 2.3. Структура светодиода с торцевым излучением.

Один из путей построения СИД с торцевым излучением основан на технологии V-образных канавок, которая была разработана для создания лазерных диодов со световодом, сформированным путем распределения усиления. В этом случае обычная двойная гетероструктура покрывается двумя слоями типа n, которые образуют отрицательно смещенный p-n переход, а для создания проводящей полосы p типа в V-образной канавке напыляется цинк. Наконец, на переднюю грань наносится антиотражательное покрытие, а электрический контакт выполняется короче длины кристалла с тем, чтобы избежать вынужденной эмиссии. Плотность тока и качество оптического резонатора достаточно высоки для создания эмиссии, близкой к вынужденной. Результатом является более узкая ширина спектра (около 20 нм) и более высокая выходная мощность, но при более сильной температурной зависимости. Как правило, с точки зрения спектрального состава излучения СИД имеет достаточно большую ширину спектра, составляющую обычно от 40 до 80 нм на длине волны чистого GaAs, равной 870 нм. Излучение в дальней зоне СИД с торцевым излучением в этом случае эллиптическую форму. Типовые значения углов дальней зоны составляют 50° в вертикальном направлении и 100° в горизонтальном направлении.

При использовании СИД для передачи данных они характеризуются рядом недостатков, основными из которых являются:

- 1) сравнительно низкая полоса частот, равная 100 МГц, хотя достигнуты значения полосы частот до 1 ГГц, поэтому быстродействие СИД как минимум в 5 раз ниже по сравнению с лазером;
- 2) широкий спектр излучения, составляющий около 60 нм, что также снижает полосу частот вследствие монохроматической дисперсии;
- 3) низкая эффективность ввода излучения в оптическое волокно, даже для диодов с торцевым излучением.

При постоянном токе возбуждения СИД, имеет отрицательный температурный коэффициент выходной мощности, типовое значение которого находится в пределах от -0.5 до -1.5 %/°C для GaAlAs с $\lambda_0=850$ нм и InGaAs с $\lambda_0=1300$ нм. Поэтому для стабилизации мощности излучения и повышения надежности LED можно использовать термоэлектрические охладители, однако в большинстве случаев необходимость в электронной обратной связи не требуется.

Одной из разновидностей LED являются суперлюминесцентные диоды (SLED), которые отличаются большей по сравнению с лазерными диодами стабильностью, имеют меньший уровень шумов, а большая ширина спектра решает все проблемы, связанные с оптической интерференцией. Дополнительными преимуществами SLED в этом случае являются: высокая линейность, меньшее потребление энергии и вследствие низкой плотности тока, высокая надежность. Кроме этого, так как SLED не очень чувствительны к перегрузке, для управления ими можно использовать простые схемы управления. По своим характеристикам SLED занимают промежуточное место между СИД и лазерными диодами [3].

1.1 Лазерный диод

Принципиальным отличием лазерного диода (ЛД) от СИД является наличие в них встроенного оптического резонатора. Лазерный диод работает при значительно

больших значениях токов накачки, чем светодиод. Генерацию света в лазерном диоде определяют два механизма: спонтанная и стимулированная эмиссия. Спонтанная эмиссия имеет место в результате рекомбинации возбужденных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, аналогично генерированию излучения в СИД. Из-за высокого показателя преломления активного слоя свет, достигая границ активного слоя, отражается от них и не выходит в другие слои структуры. Фотоны, созданные в результате спонтанной эмиссии, вызывают генерацию дополнительных фотонов путем стимулирования дополнительных рекомбинаций, а те в свою очередь создают дополнительные фотоны, т. е. происходит стимулированная эмиссия. Локализованный таким образом свет усиливается, и, когда сопутствующая этому процессу добавка энергии становится выше потерь, возникает лазерное излучение. Следовательно, при протекании через структуру полупроводникового лазера электрического тока, вначале, аналогично СИД, возникает естественное излучение, по мощности пропорциональное силе тока, но стоит току возрасти до некоторого порогового значения, мощность излучения резко возрастает, а само излучение становится лазерным.

Так как стимулированные фотоны когерентны с генерирующими фотонами, т. е. имеют одну и ту же длину волны и фазу, такое излучение имеет узкий спектр, а длина волны определяется свойствами материала лазерной структуры. В типовых лазерных диодах высота активной зоны составляет 5-10 мкм, ширина 0.1-0.2 мкм, а длина 300 мкм, при этом грани представляют собой полупрозрачные зеркала, ограничивающие объем резонатора. Эмиссия происходит с обеих граней и имеет идентичные характеристики излучения. Типовые значения порогового тока составляют от единиц до сотен миллиампер, а мощность лазерного излучения несколько десятков милливатт.

Таким образом, для возникновения лазерного излучения необходимо обеспечить определенный уровень тока, а так же выполнить условия электрического и оптического ограничений.

Наибольшее распространение получили лазеры с резонатором Фабри-Перо (FPL), лазер с распределенной обратной связью (DFB) и лазер с распределенным брэгговским отражением (DBR), с внешним резонатором.

В лазерных диодах с резонатором Фабри-Перо (FP лазеры, Fabry-Perot) резонатор образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетерогенный переход. Одна из сторон отражает свет с коэффициентом отражения близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу. В спектре FP лазера наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Этот эффект отсутствует у перечисленных трех других типов лазеров (DFB, EC, DBR)

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер) имеют схожий резонатор с FP лазером, в который добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью (рис. 2.4), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис. 5). Периодическая структура влияет на условия распространения и характеристики излучения. Преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100-процентная глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 нм/°C, в то время как для DFB лазера порядка 0.07-0.09 нм/°C [3]. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

В лазерном диоде с внешним резонатором (ECL) один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг полупроводниковой структуры. На рис. 2.6 показан пример EC лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на 4 порядка, в то время

как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным слоем устанавливается линза. Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, это эквивалентно изменению шага решетки – можно плавно изменять длину волны излучения, причем диапазон настройки достигает 120 нм. В силу этого, ЕС лазеры являются незаменимыми при разработке аппаратуры волнового уплотнения и измерительной аппаратуры для ВОЛС. По характеристикам они схожи с DFB и DBR лазерами.

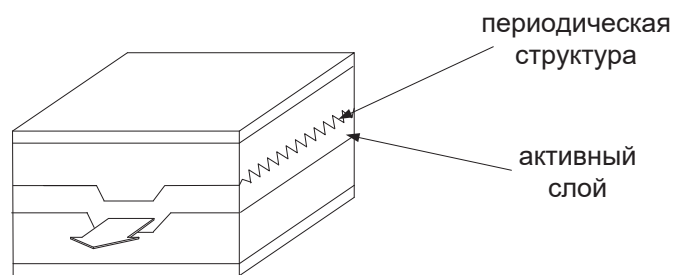


Рис. 2.4. Структура DFB лазера.

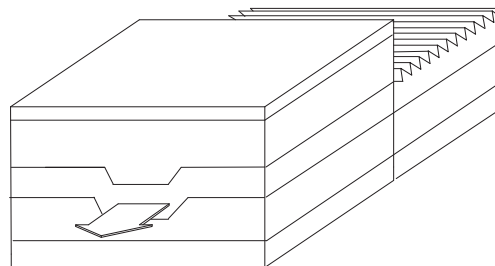
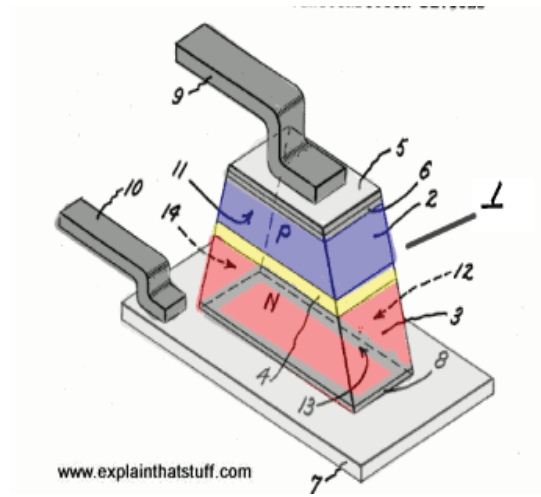
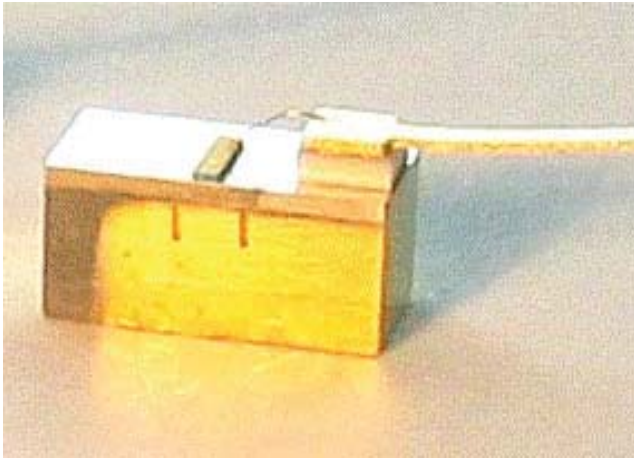


Рис. 2.5. Структура DBR лазера.



Исследование характеристик электрооптического модулятора света

1. Цель работы

Целью работы является исследование модуляционных характеристик электрооптического модулятора света (ЭОМ) – т.е. зависимости интенсивности света на выходе модулятора от напряжения, приложенного к модулятору, при различных конфигурациях оптической схемы модулятора.

2. Задание на лабораторную работу

Перед выполнением работы должны быть изучены свойства поляризованного света в двулучепреломляющих кристаллах, закономерности электрооптического эффекта и основные схемы построения электрооптических амплитудных и фазовых модуляторов света [3, с.352-357; 4, с.231-154].

Перед включением аппаратуры необходимо изучить описание лабораторной установки.

В процессе выполнения лабораторной работы производится:

- изучение состава лабораторного оборудования ;
- измерение модуляционных характеристик электрооптического модулятора света для различных состояний поляризации входного светового пучка (5 зависимостей);
- расчет теоретической зависимости интенсивности света на выходе модулятора от приложенного к электрооптическому кристаллу напряжения.

3. Описание лабораторной установки для исследования характеристик электрооптического модулятора

Схема экспериментальной установки показана на рис.1.

В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер (1), работающий в непрерывном режиме на длине волны 0,6328 мкм. Выходное излучение лазера линейно поляризовано, причем направление поляризации (направление вектора E световой волны) составляет угол 45° с главными диэлектрическими осями X и Y электрооптического кристалла модулятора (направление P на рис.2). Световой пучок лазера поступает на входную апертуру электрооптического кристалла (2), на противоположные боковые поверхности которого нанесены электроды (3). Из выходной апертуры модулятора световой пучок направляется на анализатор (4), ось пропускания которого повернута на 90° относительно исходного направления поляризации излучения лазера. Свет, прошедший через анализатор (4), поступает на фотоприемник (5), работающий в фотогальваническом режиме. Фототок, генерируемый фотодиодом, пропорционален интенсивности световой волны, падающей на светочувствительную площадку фотодиода. Величина фототока измеряется прибором В7-40 (6), работающим в режиме измерения постоянных токов. На электроды (3) электрооптического кристалла подается постоянное напряжение от регулируемого источника (7). Величина постоянного напряжения может изменяться от 0 до 299 вольт.

Между лазером (1) и электрооптическим модулятором (2) располагается четвертьволновая фазовая пластинка (8), размещенная в гнезде (9) и входной поляризатор (10), смонтированный на подвижке (11). Поляризатор (10) закреплен во вращающейся оправке таким образом, что направление оси пропускания его может поворачиваться относительно главных диэлектрических осей электрооптического кристалла. Направление оси пропускания поляризатора показано меткой на вращающейся обойме поляризатора. Направление плоскости поляризации входного излучения лазера (P) оси Y кристалла и оси пропускания поляризатора (A) обозначены метками на неподвижной части оправки поляризатора. Четвертьволновая пластинка (8) и поляризатор (10) в процессе выполнения лабораторной работы могут выводиться из траектории луча. Когда четвертьволновая пластинка введена в оптический тракт установки, линейно поляризованный свет лазера, проходя через фазовую пластинку, становится циркулярно поляризованным. Циркулярно поляризованный свет, проходя через поляризатор,

превращается в линейно поляризованный свет, направление плоскости поляризации которого соответствует направлению оси пропускания поляризатора и может изменяться путем вращения поляризатора.

Поперечное сечение эллипсоида показателя преломления электрооптического кристалла до и после приложения внешнего электрического поля E в направлении оси Y показано на рис.2 соответственно сплошной и пунктирной линиями. На этом же рисунке показаны направления плоскости поляризации исходного лазерного излучения P и оси пропускания анализатора A .

4. Методические указания к выполнению работы

В работе исследуются модуляционные характеристики электрооптического модулятора, изготовленного на кристалле метаниобата лития. Электрическое поле, приложенное к кристаллу, изменяет размеры полуосей и положение в пространстве эллипсоида показателя преломления. В данном случае, если поле приложено к кристаллу параллельно оси Y , y -полуось эллипсоида уменьшается на величину Δn , а x -полуось увеличивается на эту же величину, так что показатели преломления для соответствующих компонент вектора напряженности электрического поля оптической волны составят $n_x = n_0 + \Delta n$, $n_y = n_0 - \Delta n$. И для случая линейного электрооптического эффекта, т.е. эффекта Поккельса, изменение показателя преломления прямо пропорционально напряженности внешнего модулирующего поля E .

$$\Delta n = \frac{n_0^3}{2} r_{22} E, \quad (1)$$

где $n_0 = 2,286$ – показатель преломления обыкновенного луча; $r_{22} = 6,8 \cdot 10^{-12}$ м/В – электрооптический коэффициент ниобата лития для данной ориентации поля.

Изменение показателей преломления n_x и n_y приводит к изменению взаимной разности фаз между компонентами E_x и E_y электромагнитного поля световой волны, распространяющейся в электрооптическом кристалле.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) l, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения, l – расстояние, пройденное электромагнитной волной в кристалле. Считая, что поле между электродами однородно, можно записать разность фаз в виде

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_0^3 r_{22} U l}{\lambda d}, \quad (3)$$

где d – расстояние между электродами, l – длина кристалла ($d/l = 0,05$ для данного модулятора), U – напряжение, приложенное к модулятору.

Величина

$$U = \frac{\lambda d}{2n_0^3 r_{22} l} \quad (4)$$

обеспечивает фазовый сдвиг, равный π , и называется полуволновым напряжением.

Для преобразования модуляции поляризации в модуляцию интенсивности света после прохождения электрооптического кристалла световую волну пропускают через выходной поляризатор, называемый анализатором. Оси пропускания входного поляризатора и анализатора обычно скрещены под углом 90° , и в этом случае интенсивность света на выходе анализатора изменяется по закону

$$I = I_{\max} \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (5)$$

где I_{\max} – максимальная интенсивность света, прошедшего через модулятор. Зависимость $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{мод}})$ называется модуляционной характеристикой модулятора по интенсивности.

Порядок выполнения лабораторной работы

4.2. Ознакомьтесь с описанием лабораторной установки, с расположением и назначением органов управления.

4.3. Экспериментально исследовать основную модуляционную характеристику модулятора. Для этого, с разрешения преподавателя, включить блок питания лазера, источник постоянного напряжения, вольтметр.

Удалить из оптического тракта четвертьволновую пластинку (вынуть стойку с пластинкой из гнезда) и входной поляризатор (выдвинуть поляризатор из луча, пользуясь винтом подвижки, на которой закреплена оправка поляризатора). Изменяя напряжение, приложенное к модулятору, с помощью цифрового набирателя на передней панели источника постоянного напряжения, измерять величину фототока фотодиода, соответствующую каждому напряжению. Диапазон изменения напряжения – от 0 до 299 В, шаг – 10 В. Построить график

зависимости

$$f(U_{\text{мод}}) = \frac{I_{\text{фд}}(U_{\text{мод}})}{I_{\text{фд max}}}$$

где $I_{\text{фд max}}$ - максимальное значение фототока при данной конфигурации оптической схемы.

По графику определить величину напряжения, соответствующего максимальному пропусканию модулятора.

4.4. Ввести в оптический тракт установки четвертьволновую пластинку – установить стойку с пластинкой на оптической плите. Повторить измерения модуляционной характеристики в диапазоне от 0 до 299 В при наличии фазовой пластинки в оптическом тракте.

4.5. Ввести в оптический тракт входной поляризатор. Для этого необходимо, вращая ходовой винт подвижки, установить поляризатор таким образом, чтобы луч лазера проходил примерно через центр поляризатора. Поворачивая вращающуюся оправку поляризатора, совместить метку на оправке с меткой 1 на обойме. При этом направление плоскости поляризации света, прошедшего через поляризатор, составляет $+45^\circ$ с осью Y кристалла и 90° с осью пропускания анализатора. Измерить модуляционную характеристику модулятора при данном положении входного поляризатора.

Совместить метку на оправке поляроида с меткой 2 на обойме. При этом направление плоскости поляризации света, прошедшего поляризатор, параллельно оси Y у кристалла. Измерить модуляционную характеристику модулятора при данном положении входного поляризатора.

Совместить метку на оправке поляроида с меткой 3 на обойме. При этом направление плоскости поляризации света, прошедшего через поляризатор, составляет -45° с осью Y кристалла и параллельно оси пропускания анализатора. Измерить модуляционную характеристику модулятора при данном положении входного поляризатора.

Построить графики экспериментальных зависимостей, измеренных по пп. 4.3, 4.4, 4.5. (Все зависимости нормировать к соответствующему максимальному значению).

4.6. Построить теоретическую зависимость модуляционной характеристики по формулам (3), (5). Рассчитать полуволновое напряжение для данного модулятора по формуле (4). Сравнить теоретически рассчитанное значение полуволнового напряжения с напряжением максимального пропускания модулятора, определенным по графику зависимости, измеренной в п. 4.3.

4.7. Объяснить поведение экспериментальных зависимостей, измеренных в п. 4.5 при различных ориентациях входного поляризатора.

5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Схему лабораторной установки.
2. Результаты проведенных измерений в виде таблицы.
3. Графики теоретической зависимости модуляционной характеристики и экспериментально измеренные зависимости по пунктам 4.3, 4.4, 4.5 в нормированном виде (всего 6 зависимостей на одном графике).
4. Расчетное значение полуволнового напряжения.
5. Выводы по лабораторной работе и анализ полученных данных.

Контрольные вопросы

1. Что такое эллипсоид показателя преломления?
2. Как меняется эллипсоид показателя преломления одноосного электрооптического кристалла во внешнем электрическом поле?
3. Расскажите о методах регистрации фазовой модуляции.
4. Расскажите о методах преобразования фазовой модуляции в модуляцию интенсивности.
5. Что такое полуволновое напряжение?
6. Какие типы электрооптических модуляторов Вы знаете?
7. Преимущества и недостатки схем продольного и поперечного электрооптического модулятора.

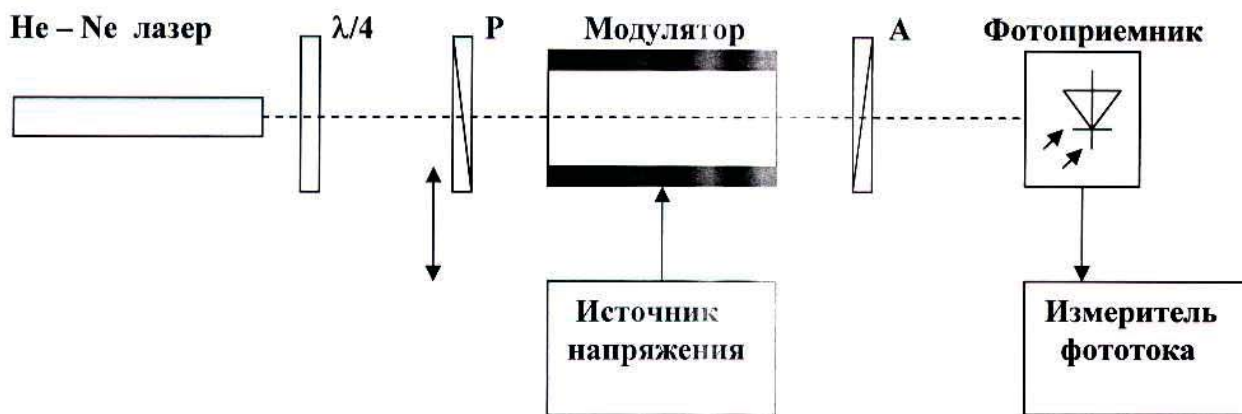


Рис. 1

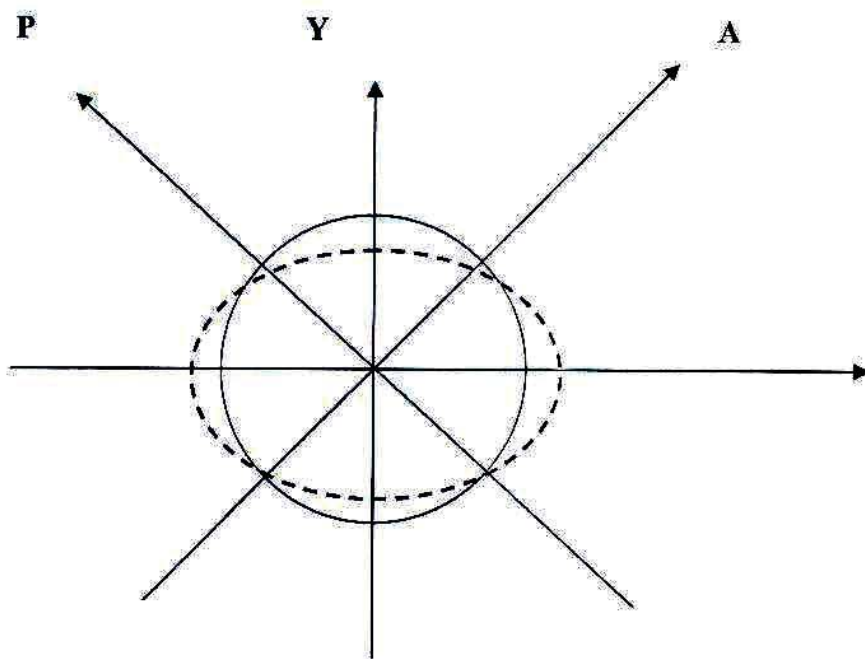


Рис. 2

Исследование акустооптического модулятора светового потока

1. Цель работы

Целью работы является исследование характеристик акустооптического модулятора (АОМ), осуществляющего пространственную и временную модуляцию светового потока в соответствии с управляющим ВЧ – сигналом.

2. Задание на лабораторную работу

Перед выполнением работы должны быть изучены основные принципы модуляции света акустическими волнами и особенности дифракции света на объемных фазовых решетках [1, с.200-214; 2, с.5-13].

Перед включением аппаратуры необходимо изучить описание лабораторной установки.

Лабораторная работа состоит из двух этапов:

1. Исследование процессов дифракции света на ультразвуке в режиме Рамана-Ната.
2. Исследование процессов дифракции света на ультразвуке в режиме Брэгга.
- 3.

В процессе выполнения работы производится:

- изучение принципов работы АОМ светового потока;
- изучение состава лабораторного оборудования;
- измерение углов дифракции света в режиме Рамана-Ната;
- исследование зависимости эффективности дифракции от мощности акустического сигнала в режиме Рамана-Ната;
- исследование зависимости эффективности дифракции от угла падения световой волны на звукопровод модулятора в режиме Рамана-Ната;
- определение оптимального угла падения света на звукопровод модулятора в режиме Брэгга;
- исследование зависимости дифракционной эффективности от мощности акустического сигнала в режиме Брэгга при оптимальном угле падения света;
- исследование зависимости эффективности дифракции от угла падения света на звукопровод в режиме Брэгга.

3. Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки изображена на рис.1. Источником монохроматического света служит газовый гелий-неоновый лазер ЛГН-208Б с длиной волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм (1). Лазерный луч, отраженный поворотным зеркалом (2), падает на прозрачный звукопровод акустооптического модулятора (3), закрепленного на поворотном столике (4) таким образом, что можно изменять угол падения света на звукопровод модулятора вращением юстировочного винта. Пройдя через звукопровод АОМ и отразившись от поворотного зеркала (5), продифрагированный луч направляется на фотоприемник (6), закрепленный на подвижном столике (7). Высокочастотный электрический сигнал подается на АОМ от генератора ВЧ-колебаний Г4-143 (8). Пьезопреобразователь АОМ возбуждает в звукопроводе бегущую акустическую волну, на которой и происходит дифракция световой волны, падающей на звукопровод. Картина дифракции света на ультразвуковой волне наблюдается на экране, размещенном на лицевой поверхности измерительной головки фотоприемника.

Интенсивность света, прошедшего через АОМ, регистрируется с помощью фотоприемника и цифрового измерителя тока (9), которым измеряется фототок на выходе фотодиода, включенного в фотогальваническом режиме.

ВНИМАНИЕ! Измеритель включать в режим измерения постоянного тока (I_–) с автоматическим выбором пределов измерения (АВП).

4. Методические указания к выполнению работы

1. Изучить теоретические сведения по данной работе, изложенные в [1, с.200-214; 2, с.5-13].

При изучении явления дифракции света на акустических волнах следует обратить внимание на отличительные особенности дифракции света на фазовых решетках в режимах Рамана-Ната и Брэгга. Акустическая волна, распространяющаяся в прозрачном звукопроводе АОМ, вызывает периодическую модуляцию показателя преломления материала звукопровода. При этом в звукопроводе формируется фазовая дифракционная решетка, период которой Λ равен длине акустической волны в материале звукопровода. При нормальном падении световой волны на АОМ и сравнительно невысокой частоте звуковой волны наблюдается симметричная картина дифракции Рамана-Ната. При наклонном падении световой волны и более высокой частоте звуковой волны симметрия дифракционных порядков нарушается, и при выполнении условия Брэгга

$$2 \sin \varphi_b = \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

где φ_b - угол падения света на звукопровод, интенсивность света в первом порядке дифракции может превысить интенсивность света во всех остальных дифракционных порядках. Картина дифракции становится резко несимметричной, и при достаточно высокой частоте акустической волны f (т.е. при малых значениях Λ), дифракционная картина содержит только два порядка: нулевой порядок I_0 , т.е. свет, прошедший звукопровод без отклонения, и первый порядок I_1 - дифрагировавшую под некоторым углом θ волну.

2. Ознакомиться с описанием лабораторной установки, расположением оптических элементов и юстировочных винтов.

3. Исследовать зависимость углов дифракции от частоты акустического сигнала в режиме Рамана-Ната. Для этого включить источник питания лазера, генератор ВЧ - сигнала и измеритель фототока. Установить АОМ так, чтобы луч лазера падал на звукопровод перпендикулярно к нему. Для этого необходимо, вращая винт поворотного столика (4), совместить отраженный от звукопровода луч с падающим лучом, контролируя совмещение лучей по положению пятна отраженного луча на миллиметровой сетке измерительной шкалы, размещенной на торцевой поверхности излучателя лазера.

Измерить интенсивность света $I_{вх}$, прошедшего через АОМ, в отсутствии на АОМ высокочастотного сигнала. Для этого с помощью винта подвижного столика (7) совместить риску на подвижной платформе столика с нулевым делением шкалы на столике. При этом луч света, прошедший через АОМ, должен точно попадать в центр апертуры фотоприемника. Произвести измерение фототока на выходе фотоприемника с помощью измерителя тока. Величина мощности оптического излучения пропорциональна величине фототока: $I_{ФД} = S P_{изл}$, где S - чувствительность фотодиода. Записать измеренное значение интенсивности $I_{вх}$ (оно будет использоваться в дальнейшем для нормировки всех измеренных значений фототока).

Подать на АОМ высокочастотный сигнал от генератора (8). Для этого установить на генераторе частоту 50 МГц, включить клавишу «Выход 50» и вращением ручек «Уровень» установить максимальный уровень выходного сигнала, контролируя его по измерителю уровня. При этом на измерительном экране, размещенном на лицевой поверхности измерительной головки фотоприемника, будет наблюдаться картина дифракции света на ультразвуковой волне в режиме Рамана-Ната (рис.2).

Картина имеет вид яркого центрального пятна - нулевого порядка дифракции I_0 и расположенных **симметрично** относительно него менее ярких первого I_{+1} и минус первого I_{-1} , а также второго и минус второго I_{+2} порядков дифракции. Измерив по миллиметровой шкале расстояния a_1, a_{-1}, a_2, a_{-2} между центрами пятен нулевого порядка и соответствующими высшими порядками дифракции (рис.2), вычислить углы дифракции θ_m по формуле

$$\theta_m = \arctg \frac{a}{R} \quad m \quad (2)$$

где $m = \pm 1, \pm 2$ (порядок дифракции); $R = 40$ см, расстояние от АОМ до экрана.

Рассчитать соответствующие теоретические значения углов дифракции по формуле

$$\theta_m = \arcsin \left(m \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \quad (3)$$

где $\lambda = 0,6328$ мкм – длина волны света.

Λ - длина звуковой волны в звукопроводе АОМ, определяемая для данной частоты акустического сигнала f по формуле

$$\Lambda = \frac{V}{f} \quad (4)$$

где V - скорость звуковой волны в материале звукопровода, для стекла ТФ-7 $V = 3,63 \cdot 10^5$ см/сек. Сравнить величины углов дифракции, измеренные на опыте (формула 2) и вычисленные теоретически (формула 3).

4. Измерить зависимость эффективности дифракции в первом порядке дифракционной картины от мощности акустического сигнала. Для этого с помощью винта подвижного столика (7) переместить измерительную головку фотоприемника в область нахождения первого дифракционного порядка, совместив пятно первого порядка с центром апертуры фотоприемника. Точность попадания в фотоприемник контролировать по максимуму показаний измерителя фототока. Произвести калибровку шкалы индикатора уровня ВЧ - сигнала, для чего установить ручкой калибровки показания индикатора, равные 100 при крайнем правом положении ручек регулировки уровня. Используя ручку точной регулировки уровня, снять зависимость интенсивности света в первом порядке I_1 , от уровня мощности ВЧ – сигнала $P_{\text{вых}}$. Измерение $P_{\text{вых}}$ производится в делениях шкалы индикатора в относительных единицах (100 делений шкалы соответствует 1 Вт акустической мощности, подаваемой на пьезопреобразователь модулятора).

По результатам измерений построить график зависимости дифракционной эффективности $\eta = I_1 / I_{\text{вх}}$ от $P_{\text{вых}}$. (величина $I_{\text{вх}}$ измерена ранее и представляет собой интенсивность света, прошедшего через АОМ в отсутствие акустического сигнала).

5. Исследовать зависимость эффективности дифракции в первом порядке от угла падения света на звукопровод АОМ. Для этого, вращая юстировочный винт поворотного столика (4), изменять угол падения света на звукопровод АОМ в обе стороны от первоначального положения, при котором звукопровод перпендикулярен световому лучу, одновременно измеряя интенсивность света I_1 в первом дифракционном порядке.

Для определения угла падения света на звукопровод необходимо измерить отклонение a отраженного луча от падающего луча по миллиметровой сетке измерительной шкалы, расположенной на торце излучателя лазера (рис.3). Угол падения луча света на звукопровод АОМ при этом вычисляется по формуле:

$$\varphi_{\text{пад}} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{a}{b} \quad (5)$$

где b - расстояние между торцом излучателя и АОМ, $b = 33$ см.

Построить график зависимости дифракционной эффективности $\eta = I_1 / I_{\text{вх}}$ от угла φ падения света в режиме Рамана-Ната.

6. Произвести определение оптимального угла падения света на звукопровод АОМ в режиме Брэгга. Для этого необходимо установить частоту ВЧ – сигнала 80 МГц, переместить измерительную головку фотоприемника в область первого дифракционного максимума I_1 , введя дифракционное пятно в апертуру фотоприемника. Затем, изменяя угол падения света на звукопровод АОМ винтом поворотного столика, добиться максимальной величины I_1 .

Измерить угол падения $\varphi_{\text{опт}}$, соответствующий максимальной эффективности дифракции I_1 .

При оптимальном угле падения измерить по шкале на измерительной головке фотоприемника расстояние между центрами пятен нулевого и первого порядков дифракции a_1 . Рассчитать угол дифракции θ_1 первого порядка по формуле:

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{a_1}{R} \right) - \varphi_{\text{опт}}$$

Рассчитать период фазовой решетки Λ , образованной акустической волной в звукопроводе по формуле (4). Рассчитать угол Брэгга $\varphi_{\text{в}}$ для решетки с периодом Λ по формуле (1). Сравнить рассчитанные значения $\varphi_{\text{в}}$ с измеренными значениями $\varphi_{\text{опт}}$.

7. Исследовать зависимость эффективности дифракции в первом порядке от мощности акустической волны в режиме Брэгга при оптимальном угле падения света на звукопровод. Построить график зависимости $\eta = I_1 / I_{\text{вх}}$ от $P_{\text{вых}}$ при $\varphi_{\text{пад}} = \varphi_{\text{опт}}$.

8. Исследовать зависимость эффективности дифракции в первом порядке в режиме Брэгга от угла падения света на звукопровод. Для этого, установив оптимальный угол падения и измерив соответствующую ему интенсивность $I_{1\text{max}}$, вращением поворотного столика АОМ изменять угол падения света в обе стороны от оптимального, измеряя при этом углы падения и соответствующие им значения интенсивности дифрагированного света I_1 . Построить зависимость отношения $I_1 / I_{1\text{max}}$ от угла падения света на звукопровод.

9. Повторить измерения углов дифракции и оптимальных углов падения света на звукопровод при частоте акустического сигнала 240 МГц.

5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Функциональную схему лабораторной установки (рис.1).
2. Результаты проведенных измерений в виде таблиц и графиков.
3. Результаты расчетов по формулам 1 – 6.
4. Выводы по работе и анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Поясните механизм образования фазовой решетки в звукопроводе модулятора.
2. Назовите отличительные особенности дифракции света на фазовых решетках в режимах Рамана-Ната и Брэгга.
3. Какова максимально достижимая эффективность дифракции АОМ в режимах Рамана-Ната и Брэгга?
4. Может ли используемый в работе АОМ применяться для анализа спектра ВЧ – сигнала?
5. Дайте определение понятия «дифракционная эффективность».
6. Каким образом в АОМ создается режим бегущей волны?
7. Почему в качестве источника излучения при работе с АОМ используется лазер?
8. Как изменится дифракционная эффективность АОМ в режиме Брэгга при увеличении толщины звукового столба?
9. Дайте качественное пояснение картины дифракции при подаче на вход АОМ двух гармонических сигналов близких частот, трех и т.д.
10. Какие параметры оптической волны может модулировать АОМ?

Литература

1. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. – Методы модуляции и сканирования света. – М.: Наука, 1970.
2. Магдич Л.Н., Молчанов В.М. – Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов.Радио, 1978.

Рис.1 Схема лабораторной установки.

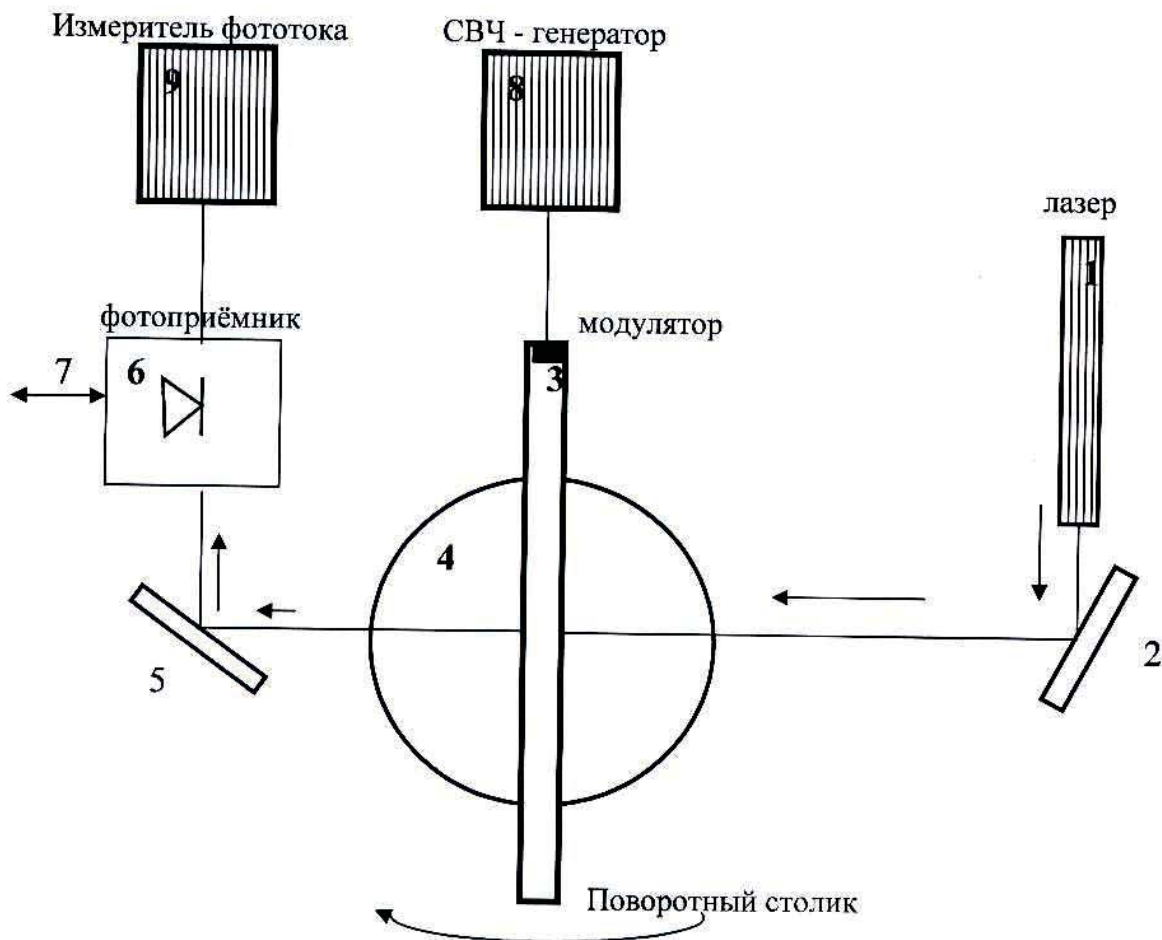
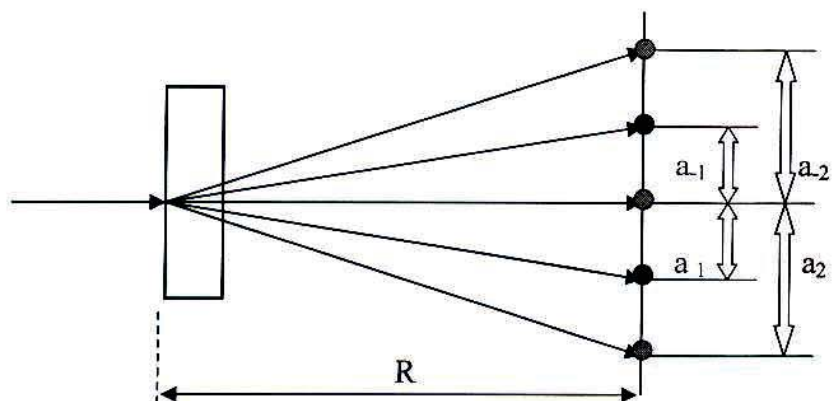


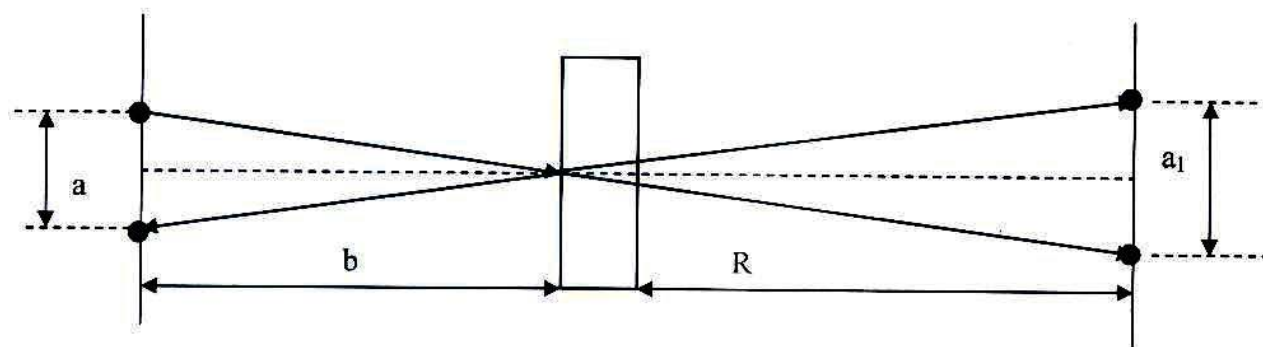
Рис.1

Рис.2. Картина дифракции в режиме Рамана – Ната.



Дифракция Рамана – Ната наблюдается на ТОНКОЙ ФАЗОВОЙ решётке, для которой параметр $Q = 2 \pi \lambda d / \Lambda^2 \ll 1$ (малые d , большие Λ , то есть малые частоты СВЧ – сигнала). Картина симметрична относительно нулевого порядка и слабо зависит от угла падения света.

Рис.3. Картина дифракции в режиме Брэгга.



Дифракция Брэгга наблюдается на **ТОЛСТОЙ ФАЗОВОЙ** или амплитудной решётке, для которой параметр $Q = 2\pi\lambda d/\Lambda^2 \gg 1$ (большие d , малые Λ , то есть большие частоты СВЧ – сигнала). Картина несимметрична относительно нулевого порядка и **сильно** зависит от угла падения света. Максимум дифракции наблюдается при угле падения света равном углу Брэгга.