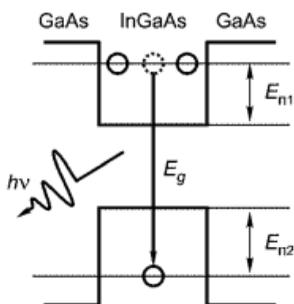


ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Оптоэлектронные микро- и наноструктуры»
для студентов направления подготовки
11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»
(магистерская программа «Приборы и устройства
в микро- и нанoeлектронике»)
очной формы обучения



Воронеж 2016

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.38

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Оптоэлектронные микро- и наноструктуры» для студентов направления подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» (магистерская программа «Приборы и устройства в микро- и наноэлектронике») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2016. 60 с.

Методические указания содержат лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с физическими основами работы оптоэлектронных и нанофотонных приборов; основными типами излучающих, фотоприемных и индикаторных приборов, их параметрами и характеристиками и применением их в аналоговых и цифровых устройствах.

Методические указания предназначены для студентов-магистрантов первого курса.

Издание подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD и содержится в файле «Му лаб раб ОЭМиНС.pdf».

Табл. 11. Ил. 23. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н.Н. Кошелева

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Оптоэлектронные микро- и наноструктуры» предназначен для изучения физических и топологических основ оптоэлектронных микро- и наноструктур на основе элементарных и сложных полупроводников; формирования на этой основе современных представлений о физике и технике сложных полупроводниковых материалов и структур; ознакомления студентов с видами перспективных оптоэлектронных материалов и структур.

Современные электронные компоненты позволяют создавать малогабаритную, экономичную и надежную электронную аппаратуру. В общей номенклатуре изделий электронной техники оптоэлектронные приборы, устройства и системы являются самыми перспективными.

Изделия оптоэлектроники используют электромагнитное излучение оптического диапазона для приема, обработки, передачи, а также отображения информации. Оптоэлектронные приборы чувствительны к электромагнитному излучению в спектральном диапазоне - от инфракрасного до ультрафиолетового. В этом диапазоне они широко применяются как излучатели и фотоприемники электромагнитной энергии.

В настоящее время оптоэлектроника возглавляет список полупроводниковых приборов с наибольшим объемом продаж. Значительный объем продаж приходится на рынок световылучающих диодов (СИД). СИД выполняются на основе гетероэпитаксиальных структур и обеспечивают световую отдачу более 25 лм/Вт (лампы накаливания 15 лм/Вт). На основе суперярких СИД создаются крупноформатные цветные уличные экраны.

Оптоэлектронные приборы являются перспективными элементами сотовых телефонов, а именно портативных дисплеев. Переход к цветным дисплеям с высоким разрешением и

быстродействием возможен при их производстве на основе органических СИД.

Полупроводниковые излучатели «белого света» успешно заменяют лампы накаливания. В настоящее время ведется разработка полноцветных (кластерных) ламп, состоящих из нескольких СИД красного, зеленого и синего цветов свечения.

Интенсивно ведется разработка высокоэффективных фотоприемников УФ- и ИК-диапазона волн.

Развитие оптоэлектронных ИМС позволяет повысить быстродействие и надежность функционирования современных волоконно-оптических линий передачи информации, электронно-вычислительных машин нового поколения, заменить в электронной технике малонадежные и неэкономичные электромагнитные реле, разработать и создать системы промышленной автоматики и телемеханики, а также системы защиты от несанкционированного доступа.

Использование квантовых эффектов в наноструктурах позволяет создавать компактные, экономичные и долговечные полупроводниковые лазеры.

Налажено производство суперярких СИД и функционально законченных изделий на их основе. Проводятся работы по замене ламп накаливания полупроводниковыми излучателями.

Специалисты в области разработки и эксплуатации электронной аппаратуры должны знать как физические основы оптоэлектроники и нанофотоники, так и возможности оптоэлектронной элементной базы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: исследование явления преобразования оптического излучения в электрическую энергию в солнечных элементах.

Используемое оборудование и материалы: фотоэлектрические преобразователи на основе кремния (Si), люксметр, лампа накаливания, магазин сопротивлений, вольтметр, амперметр.

Теоретическая часть

Глобальные энергетические проблемы уже давно поставили в повестку дня вопрос о поиске нетрадиционных альтернативных технологий получения электроэнергии. К числу таких альтернативных технологий относится гелиоэнергетика на основе фотопреобразования солнечного излучения в электрическую энергию с использованием полупроводниковых солнечных элементов (СЭ).

В ряде областей применения (системы с автономными источниками питания) энергетические установки на основе СЭ уже давно заняли прочное место. В настоящее время продолжают интенсивные исследования, направленные на создание эффективных СЭ на основе широкого круга полупроводниковых материалов, так как полупроводники оказались наиболее перспективным классом материалов, которые могут непосредственно преобразовывать солнечную энергию в электрическую.

Солнечные фотопреобразователи (элементы, батареи) представляют собой полупроводниковые фотодиоды, оптимизированные для прямого преобразования излучения Солнца в электрическую энергию. В работе преобразователей солнеч-

ной энергии используется фундаментальное физическое свойство полупроводников, а именно то, что фотон способен при поглощении генерировать электронно-дырочные пары в кристаллах, которые могут затем разделяться внутренним электрическим полем, и затем собираться на паре внешних контактов.

Для работы СЭ необходим хотя бы один p - n -переход, как показано схематически на рис. 1.1. Обычный n + p -кремниевый солнечный элемент состоит из мелкого перехода, сформированного вблизи фронтальной поверхности, переднего омического контакта, изготовленного в виде полосок и штырей, и тыльного омического контакта, закрывающего всю обратную поверхность элемента. При освещении элемента носители заряда генерируются во всем его объеме, и тогда полный фототок можно рассчитать, зная плотность фототока в эмиттере, базе и обедненной области.

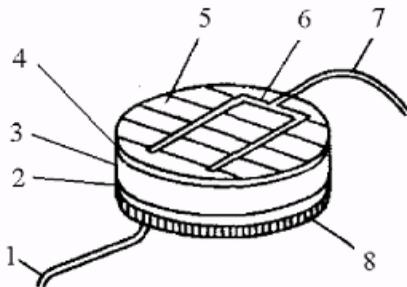


Рис. 1.1. Типичная структура солнечного элемента с p - n -переходом: 1 - контакт от лицевой поверхности предыдущего элемента; 2 - добавочный потенциальный барьер p^+ 0,2 мкм; 3 – слой p 250 - 400 мкм; 4 – слой n^+ 0,2 - 1,0 мкм; 5 - противоотражательное покрытие; 6 - лицевой контакт; 7 - к тыльному контакту следующего элемента; 8 - металлический контакт с тыльной стороны.

Преобразование энергии в фотоэлементе (ФЭ) основывается на фотовольтаическом эффекте. ФЭ представляет собой систему из двух полупроводников с проводимостями p - и n -типа, находящихся в тесном контакте друг с другом. Переходная зона между областями с противоположными типами проводимости располагается внутри полупроводникового материала и называется p - n - (электронно-дырочным) переходом.

Благодаря тому, что по одну сторону от p - n -перехода в избытке находятся свободные электроны (n -область), а по другую – дырки (p -область), каждый тип этих свободных носителей тока будет иметь тенденцию диффундировать в ту часть полупроводникового материала, где имеется их недостаток (тепловая самодиффузия). Таким образом, дырки будут стремиться диффундировать из p -области в n -область, а электроны – наоборот.

Однако эта диффузия основных носителей тока не будет продолжаться до бесконечности. Диффузия электронов в p -область заряжает ее отрицательно, причем n -область вследствие ухода из нее некоторой части электронов заряжается положительно. Самодиффузия дырок действует в том же направлении, т.е. p -область заряжается отрицательно, а n -область – положительно. Диффундирующие дырки и электроны в виде двух слоев объемных зарядов скапливаются у p - n -перехода, создавая разность потенциалов между этими слоями. При этом в темноте вблизи от p - n -перехода со стороны p -области сосредотачивается отрицательный, а со стороны n -области – положительный объемный заряды. Электрической поле, образованное этими объемными зарядами, будет препятствовать дальнейшей самодиффузии основных носителей тока через p - n -переход.

Под действием света атомы полупроводника возбуждаются и в кристалле как в n -, так и p -областях возникают дополнительные пары электрон-дырка. Образовавшиеся электроны и дырки, участвуя в тепловом движении, перемещают-

ся в различных направлениях, в том числе и по направлению к p - n -переходу.

Благодаря наличию потенциального барьера электронно-дырочный переход будет разделять главным образом диффундирующие к нему неосновные избыточные носители тока. В результате такого разделения в n -области кристалла будут накапливаться избыточные электроны, а в p -области – избыточные дырки. Скопление избыточных разделенных переходом электронов в n -области и дырок в p -области фотопреобразователя будет приводить к компенсации объемного заряда, сосредоточенного у p - n -перехода, т.е. к созданию электрического поля, направленного в сторону, противоположную тому полю, которое уже имелось там раньше. Энергетические диаграммы полупроводникового фотоэлемента показаны на рис. 1.2.

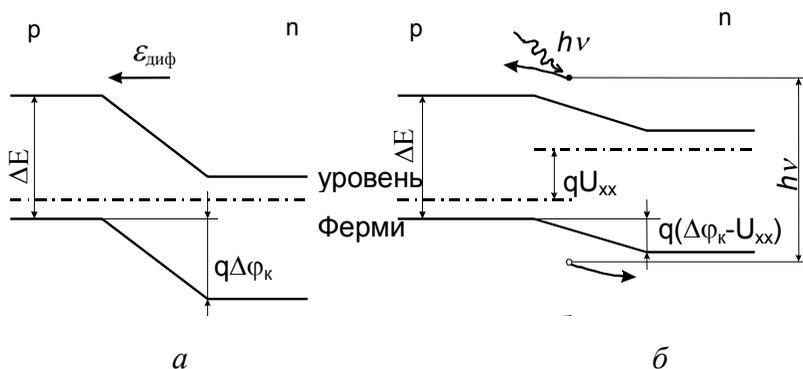


Рис. 1.2. Энергетические диаграммы полупроводникового фотоэлемента: а - без освещения; б - при освещении, но без подключения к нагрузке

Образованное светом электрическое поле заряжает слой p -типа положительно, а слой n -типа – отрицательно. Между p - и n -областями возникает фотоэдс. Концентрация образованных светом избыточных носителей тока у p - n -перехода, а,

следовательно, и величина фотоэдс. зависят от интенсивности светового потока и величины нагрузочного сопротивления, включенного во внешнюю цепь ФЭ.

Если цепь ФЭ разомкнута (сопротивление нагрузки равно бесконечности), то все избыточные, разделенные переходом носители тока скапливаются у p - n -перехода и на максимально возможную величину компенсируют потенциальный барьер на переходе, создавая максимальное значение **фотоэдс**, равное **напряжению холостого хода** U_{xx} .

Если ФЭ замкнут накоротко (сопротивление нагрузки равно нулю), то часть разделенных переходом избыточных носителей тока будут иметь возможность передвигаться через эту короткозамкнутую цепь, создавая максимальное значение тока – ток короткого замыкания. При этом у p - n -перехода никакого скопления избыточных носителей не будет. Потенциальный барьер имеет ту же высоту, что и в темноте, фотоэдс ФЭ равна нулю.

Если ФЭ замкнут на какое-то конечное сопротивление, то часть разделенных переходом избыточных носителей заряда затратит свою энергию на снижение потенциального барьера у p - n -перехода, а оставшаяся часть носителей создаст ток через нагрузку (**ток короткого замыкания**).

По своей сути СЭ представляют собой фотодиод с большой площадью p - n -перехода, спроектированный таким образом, чтобы обеспечить максимальный ввод света и его наиболее эффективное преобразование.

Для изготовления СЭ диодного типа применяется целый ряд материалов: 1) элементарные полупроводники (Si, Ge); 2) полупроводники типа $A^{III}B^V$ (например, GaAs); 3) полупроводники типа $A^{II}B^{VI}$ (например, CdS); 4) органические материалы.

В зависимости от структуры используемого полупроводника солнечные элементы подразделяются на СЭ на основе кристаллических, поликристаллических, микрокристаллических, аморфных материалов.

В зависимости от используемой технологии СЭ диодного типа могут быть разделены на три больших класса: 1) на основе объемных кристаллических подложек (кремниевых, GaAs, Ge); 2) на основе тонких пленок кристаллического, аморфного и микрокристаллического кремния, CdTe, CuInSe₂, (CIS), Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂, (CIGS); 3) фотоэлектрические ячейки, в которых используется сенсбилизация красителями.

Основным материалом для изготовления солнечных элементов в настоящее время является кристаллический кремний. На рынке фотовольтаики доля солнечных элементов и модулей, произведенных на основе кристаллического кремния, сейчас превышает 90 %, из которых примерно 2/3 приходится на поликристаллический кремний и 1/3 - на монокристаллический. Столь широкое применение кристаллического кремния в фотовольтаике обусловлено развитой кремниевой технологией вообще и возможностью изготовления на его основе солнечных элементов наземного использования с наиболее приемлемым отношением эффективность/стоимость. Остальная часть рынка фотовольтаики приходится на пленочные элементы на основе других материалов, в том числе более 5 % составляют СЭ на основе тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния.

Солнечные элементы на основе объемных монокристаллических и поликристаллических материалов обладают высоким КПД, стабильностью, но имеют высокую стоимость.

При тонкопленочной технологии на основе материалов с высоким коэффициентом поглощения, таких как CdTe, Cu(In, Ga)Se₂, которые применяются в виде поликристаллических пленок, аморфный гидрогенизированный кремний (α -Si:H) позволяет значительно снизить расход и стоимость используемого материала. Подобная технология является высокоэффективной при использовании таких материалов, менее энергозатратной и дешевой. К недостаткам таких СЭ можно отне-

сти более низкий коэффициент полезного действия (кпд) и нестабильность параметров.

Достоинствами тонкопленочных ФЭ на основе α -Si:H является более высокая проработанность технологии, отсутствие экологических проблем, как в случае CdTe (Cd – токсичный материал), и использование дорогих материалов, как в случае Cu(In, Ga)Se₂. Кроме того, следует отметить, что ФЭ на основе α -Si : H благодаря характеристикам аморфного кремния (температурный коэффициент и спектральная зависимость коэффициента поглощения) обеспечивают более высокую эффективность преобразования солнечной энергии при температурах 40 – 60 °C и в условиях облачности.

Еще один из материалов, из которых можно изготавливать СЭ – нанопроводы оксида цинка (ZnO). Такие СЭ – гибкие батареи на основе красителей, созданные на пластиковой подложке. Технология производства заключается в нанесении тонкой пленки пористого материала (например, TiO₂ или ZnO) с последующей пропиткой «губки» различными красителями (высокое содержание красителя обеспечивает более высокое значение КПД устройства). Применение наночастиц на поверхности нанопроводов позволило увеличить общую эффективность работы СЭ.

Основными параметрами солнечного элемента являются:

- максимальная отдаваемая в нагрузку электрическая мощность P_{max} ;
- коэффициент полезного действия фотоэлемента - это отношение максимальной мощности, которую можно получить от фотоэлемента, к лучистой энергии, падающей на рабочую поверхность фотоэлемента

$$\eta = \frac{P_{max}}{\Phi} ; \quad (1.1)$$

- эдс холостого хода (разомкнутой цепи) U_{xx} ;
- ток короткого замыкания (максимальный фототок) $I_{кз}$;
- последовательное сопротивление $R_{п}$;
- коэффициент формы

$$a = P_{max}/(U_{xx} \cdot I_{кз}), \quad (1.2)$$

характеризующий отклонение вида функции $U = f(I)$ от идеального прямоугольника.

Основными характеристиками полупроводниковых фотоэлементов является спектральная, вольт-амперная и световая.

Вольт-амперная характеристика - зависимость тока от напряжения. Режиму работы фотоэлемента (режиму генерации фотоэдс) соответствует часть вольт-амперной характеристики освещенного $p-n$ -перехода. Зависимость тока одного элемента солнечной батареи типа БСК-2 от напряжения на нем показана на рис. 1.3. Этот график снят при оптимальном освещении солнечного элемента. Этот график типичен и для других солнечных элементов. Конечно, значение максимального тока будет зависеть от мощности солнечного элемента. Для снятия этого графика к освещенному солнечному элементу подключают переменный резистор. Изменяют сопротивление переменного резистора, и измеряют ток, поступающий в резистор и напряжение на солнечном элементе.

Точки пересечения кривых с осью напряжений соответствуют значениям фотоэдс или напряжениям холостого хода U_{xx} при известном значении освещенности E .

Точки пересечения кривых с осью токов соответствуют значениям токов короткого замыкания ($I_{кз}$). Величина фотоэдс (U_{xx}) зависит от освещенности перехода и не зависит от его площади, а величина тока короткого замыкания ($I_{кз}$) зависит от площади перехода. Поэтому сравнивают и оценивают фо-

тоэлементы по плотностям тока короткого замыкания ($j_{кз}$). У кремниевых фотоэлементов при средней освещенности солнечным светом $j_{кз} = 20 - 25 \text{ мА/см}^2$.

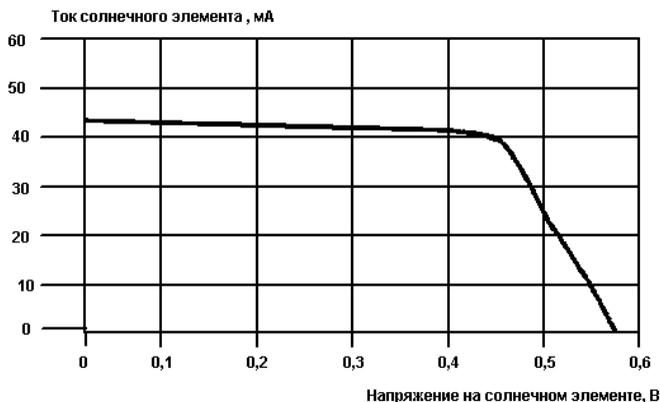


Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента при оптимальном освещении

По вольт-амперным характеристикам при известном значении освещенности выбирают оптимальный режим работы фотоэлемента, т.е. находят оптимальное сопротивление нагрузки, при котором на нагрузке выделяется наибольшая мощность. Оптимальному режиму работы соответствует наибольшая площадь прямоугольника с вершиной на вольт-амперной характеристике (рис. 1.4).

Световые характеристики фотоэлемента — это зависимости фотоэдс. (U_{xx}) и тока короткого замыкания ($j_{кз}$) от светового потока или освещенности фотоэлемента. При слабых световых потоках и фотоэдс, и ток короткого замыкания возрастают пропорционально световому потоку. Эта пропорциональность лежит в основе измерительных приборов типа люксметров. Однако при дальнейшем возрастании светового потока пропорциональность нарушается. Это связано с

уменьшением заряда фотоэлектронов в n - области и фотодырок в p -области. Значение фотоэдс не может расти до сколь угодно больших значений, оно при любом освещении не может превысить значение контактной разности потенциалов $\Delta\varphi_k$ и ширину запрещенной зоны полупроводника.

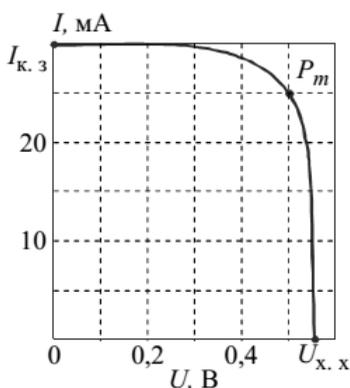


Рис. 1.4. Оптимальный режим работы фотоэлемента

Спектральная характеристика отражает характер зависимости величины фототока короткого замыкания от воздействия на него лучистых потоков различных длин волн $I_{кз} = f(\lambda)$.

Порядок выполнения работы

1. Исследование вольт-амперных характеристик СЭ $U_n = f(I_n)$ при $E = \text{const}$.

Схема для снятия вольт-амперной характеристики солнечного элемента приведена на рис. 1.5. Исследуемый фотоэлемент (ФЭ) (рис. 1.6) и чувствительный элемент люксметра закреплены на общем держателе. Люксметр предназначен для измерения освещенности. В качестве источника света используется лампа накаливания мощностью 60 Вт. Изменяя высоту

расположения лампы, меняем освещенность исследуемых образцов. С помощью ключа К исследуемый полупроводниковый фотоэлемент подключается к высокоомному цифровому вольтметру V, миллиамперметру A и магазину сопротивлений R.

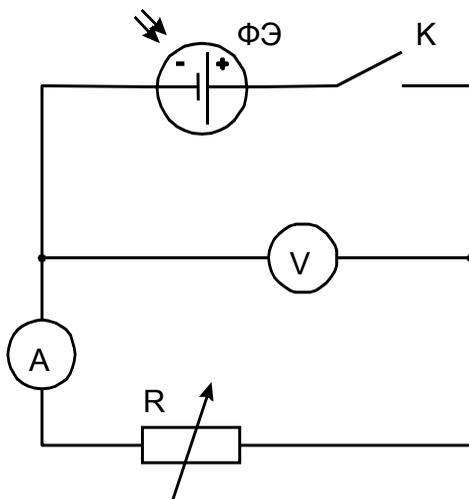


Рис. 1.5. Схема для снятия вольт-амперной характеристики солнечного элемента

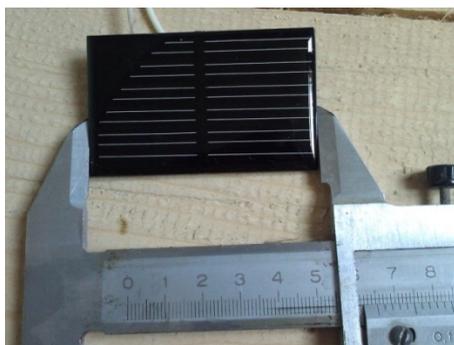


Рис. 1.6. Полупроводниковый преобразователь солнечной энергии

Для снятия вольт-амперной характеристики к освещенному солнечному элементу подключают переменный резистор. Изменяют сопротивление переменного резистора, и измеряют ток, поступающий в резистор и напряжение на солнечном элементе.

Подаем напряжение питания на лампу накаливания лабораторного стенда. Устанавливаем сопротивление нагрузки R в положение, соответствующее минимальному сопротивлению. Изменяя сопротивление нагрузки R от минимального до максимального значений, заносим показания вольтметра (напряжение на нагрузке U) и амперметра (ток нагрузки I) при различных значениях освещенности (2 - 3 значения) в табл. 1.1. Изменение сопротивления рекомендуется производить таким образом, чтобы изменение напряжения находилось в пределах $1 \pm 0,1$ В.

Таблица 1.1
Вольт-амперная характеристика СЭ

Сопротивление R , Ом	E , лк		
	Сила тока I_n , мА	Напряжение U_n , В	Мощность P , Вт

Для всех снятых показаний по формуле $P = U_n I_n$ вычислить мощность, отдаваемую батареей солнечных элементов в нагрузку. По полученным данным построить вольт-амперную и нагрузочную характеристики батареи солнечных элементов. По графику вольт-амперной характеристики найти ток, соответствующий максимальной мощности, отдаваемой батареей солнечных элементов в нагрузку.

2. Исследование световых характеристик.

Исследовать зависимость тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от освещенности. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Световые характеристики СЭ

Освещенность E , лк	Ток короткого замыкания $I_{кз}$, мА	Напряжение холостого хода $U_{хх}$, В

3. Определение максимальной мощности, вычисление оптимального сопротивления нагрузки

Для схемы измерения тока солнечного элемента (см. рис. 1.5) построить график зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки солнечного элемента или график зависимости рассеиваемой мощности от напряжения (рис. 1.7). Этот график снят при оптимальном освещении солнечного элемента. Для постройки графика измерялось нагрузочное сопротивление солнечного элемента при различных напряжениях на нем. Затем, исходя из значения сопротивления нагрузки, и тока, протекающего через нагрузку, был построен график мощности, рассеиваемой в нагрузке.

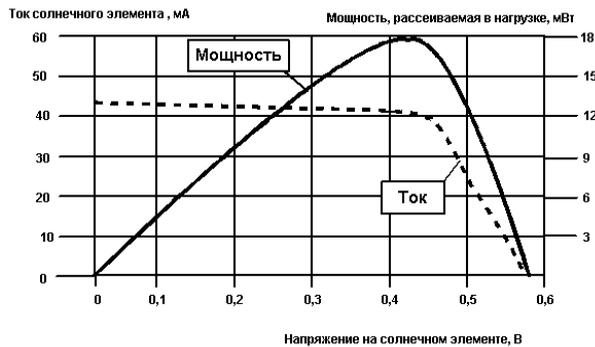


Рис. 1.7. График зависимости рассеиваемой мощности в сопротивлении нагрузки от напряжения на ней

В каждой точке вольт-амперной характеристики вычисляем полезную мощность, выделяемую на нагрузке, по формуле $P = IU$ и строим график зависимости полезной мощности от сопротивления нагрузки. По графику определяется оптимальное сопротивление нагрузки, при котором полезная мощность максимальна и само значение максимальной мощности при данной освещенности.

4. Определение коэффициента полезного действия

Коэффициент полезного действия определяется по формуле (1.1).

Световой поток (в люменах) равен произведению освещенности E на площадь фотоэлемента S

$$\Phi^* = E^* \cdot S. \quad (1.3)$$

Чтобы найти поток (в ваттах), умножим световой поток Φ_{ce} на так называемый механический эквивалент света A

$$\Phi = \Phi^* \cdot A = AE^* \cdot S, \quad (1.4)$$

где $A = 0,015$ Вт/лк (для длины волны $\lambda = 0,555$ мкм).

По формуле (1.4) вычисляется значение потока энергии, а по формуле (1.1) - значение коэффициента полезного действия.

5. Вычислить коэффициент формы по формуле (1.2).

Контрольные вопросы

1. Поглощение оптического излучения и световая генерация носителей заряда в полупроводниковом $p-n$ -переходе.
2. Полупроводниковые фотоэлементы. Принцип действия.
3. Вольт-амперная характеристика фотодиода при освещении.

4. Особенности конструкции солнечных элементов.
5. Основные параметры и характеристики солнечных элементов.
6. Зависимость предельного КПД солнечных элементов от ширины запрещенной зоны используемых полупроводников.
7. Влияние концентрации солнечного излучения на характеристики фотопреобразователей.
8. Солнечные элементы на $p-n$ -переходах.
9. Солнечные элементы с гетеропереходами.
10. Поверхностные и тонкопленочные солнечные элементы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗКОГО АНИЗОТИПНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

Цель работы: исследование параметров резкого анизотипного гетероперехода, построение энергетической диаграммы идеального гетероперехода по правилу электронного средства; исследование вольт-амперной характеристики гетероперехода.

Используемое оборудование и материалы: характериограф, осциллограф, структура с гетеропереходом.

Теоретическая часть

Полупроводниковые гетероструктуры лежат в основе конструкций современных транзисторов, приборов квантовой электроники, СВЧ-техники, электронной техники для систем связи, телекоммуникаций, вычислительных систем и светотехники.

Основным элементом гетероструктур различного типа является гетеропереход.

Под гетеропереходом понимается контакт двух различных по химическому составу полупроводников, при котором кристаллическая решетка одного материала без нарушения периодичности переходит в решетку другого материала.

Различают изотипные и анизотипные гетеропереходы. Если гетеропереход образован двумя полупроводниками одного типа проводимости, то говорят об изотипном гетеропереходе. Анизотипные гетеропереходы образуются полупроводниками с разным типом проводимости.

Существует три модели гетероперехода:

- идеальный гетеропереход;
- неидеальный гетеропереход;
- гетеропереход с промежуточным слоем.

В идеальном гетеропереходе, в отличие от неидеального, на границе раздела материалов отсутствуют локальные энергетические состояния для электронов. Гетеропереход с промежуточным слоем формируется через слой конечной толщины, и локальные энергетические состояния могут существовать как в самом промежуточном слое, так и на границах его раздела.

Энергетическая диаграмма идеального гетероперехода. Для построения энергетической диаграммы часто применяют простое «правило электронного сродства» (в англоязычной литературе – правило Андерсона), согласно которому разрыв зоны проводимости равен разности электронного сродства двух материалов. Но следует иметь в виду, что данный подход далеко не всегда справедлив, так как разрыв зон зависят еще и от деталей формирования связей на гетерогранице и деформационного потенциала.

Для построения энергетической диаграммы идеального гетероперехода должны быть известны следующие характеристики полупроводников:

- ширина запрещенной зоны (E_{g1} , E_{g2}). **При построении считаем, что $E_{g2} > E_{g1}$;**

- термодинамическая работа выхода (Φ_1 , Φ_2) – расстояние от уровня Ферми полупроводника до уровня вакуума. Следует учитывать, что термодинамическая работа выхода зависит от положения уровня Ферми, то есть от уровня легирования материала;

- сродство к электрону (χ_1 , χ_2) – расстояние от дна зоны проводимости до уровня вакуума.

При построении диаграммы считаем, что

- ширина запрещенной зоны и внешняя работа выхода неизменны до плоскости контакта, на которой они скачком изменяют свою величину;

- в приконтактном слое каждого из полупроводников происходит изменение потенциальной энергии электрона.

Полное изменение потенциальной энергии равно разности работ выхода, что обеспечивает неизменное положение уровня Ферми вдоль гетероперехода.

До «приведения в контакт» двух полупроводников потенциальная энергия электронов в них разная из-за разной термодинамической работы выхода. При «соприкосновении» двух полупроводников, как и в случае обычного *p-n*-перехода, электроны начнут «переходить» из полупроводника с меньшей работой выхода в полупроводник с большей. Это будет происходить до тех пор, пока диффузионный ток не будет скомпенсирован дрейфовым током носителей заряда под воздействием поля, созданным избыточными носителями. При этом возникнет контактная разность потенциалов

$$\varphi_0 = \Phi_2 - \Phi_1. \quad (2.1)$$

и образуется область пространственного заряда шириной d (рис. 2.1).

При таком построении видно, что из-за различия электронного сродства в контактирующих полупроводниках дно зоны проводимости первого полупроводника выходит на плоскость контакта в точке, не совпадающей в общем случае с точкой выхода на эту плоскость дна зоны проводимости второго полупроводника – формируется разрыв зоны проводимости ΔE_c . Он равен

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2. \quad (2.2)$$

Аналогично формируется и разрыв валентной зоны. Он равен:

$$\Delta E_v = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_c. \quad (2.3)$$

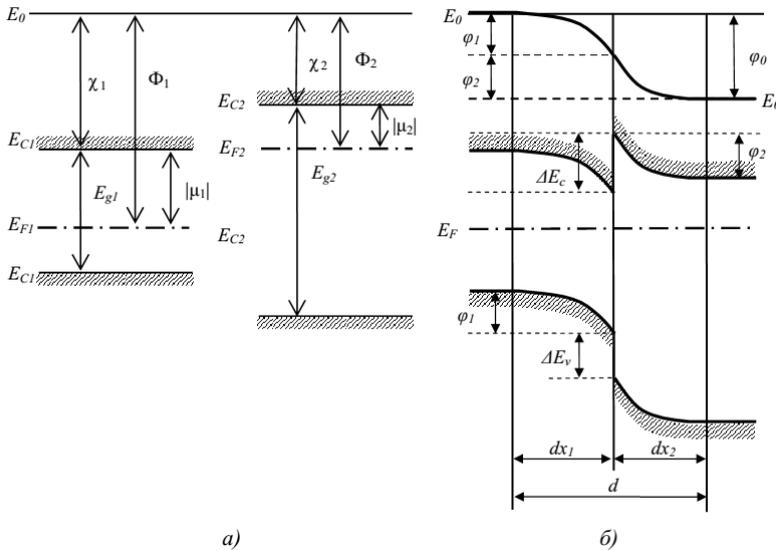


Рис. 2.1. Энергетические диаграммы полупроводников (а) и диаграмма идеального гетероперехода (б)

Следует заметить, что разрывы зон могут быть как положительными, так и отрицательными. Можно выделить следующие разновидности гетеропереходов:

1) охватывающий переход возникает, когда разрыв зоны проводимости ΔE_c и разрыв валентной зоны ΔE_v положительны. Такой случай реализуется, например, в гетеропереходе GaAs - AlGaAs. В литературе данный тип гетероперехода называют гетеропереходом I типа, или стандартным.

2) в случае же, когда один из разрывов зон положителен, а другой отрицателен - говорят о переходе II типа, или ступенчатом. Данный случай реализуется в гетеропереходе InP - In_{0,52}Al_{0,48}As.

3) также возможен вариант, когда запрещенные зоны вообще не перекрываются по энергии. Данный гетеропереход

называет гетеропереходом III типа или разрывным гетеропереходом. Классический пример – гетеропереход InAs - GaSb.

Экспериментально измеренные параметры основных типов гетеропереходов изображены на рис. 2.2.

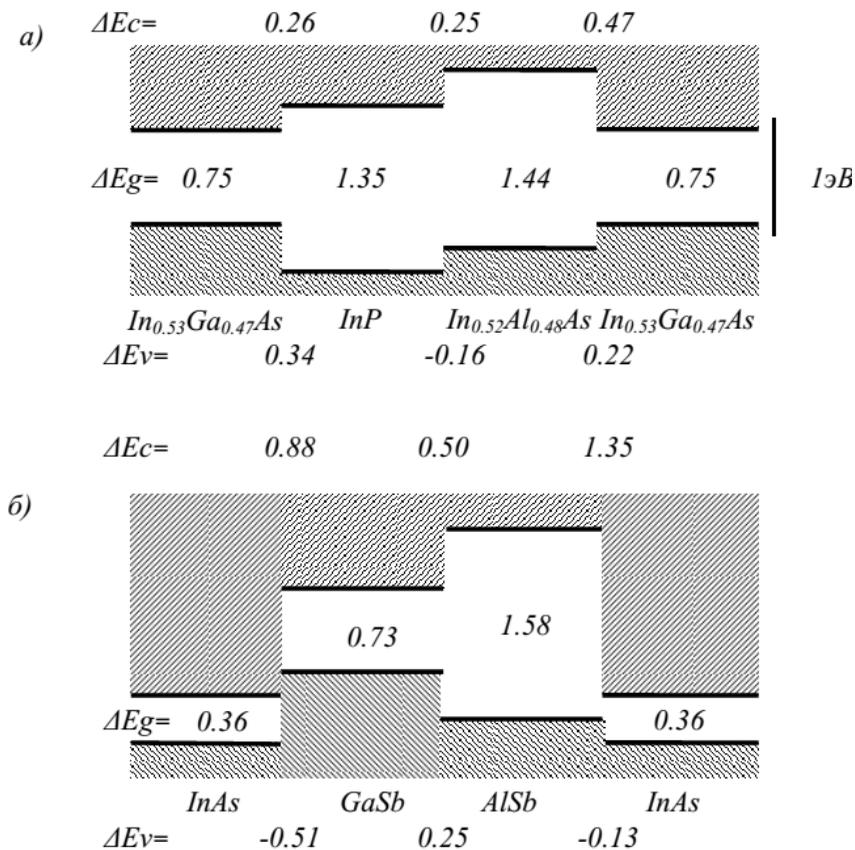


Рис. 2.2. Экспериментально определенные разрывы валентной зоны и зоны проводимости двух наиболее близких по параметрам решетки гетеропар:

- a) $In_{0.53}Ga_{0.47}As - In_{0.52}Al_{0.48}As - In_{0.53}Ga_{0.47}As - InP$
и б) $InAs - GaSb - AlSb$

Для характеристики гетероперехода также применяют параметр Q , показывающий долю разрыва зоны проводимости или разрыва валентной зоны от разности $E_{g2} - E_{g1}$.

$$Q_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_g}, \quad Q_v = \frac{\Delta E_v}{\Delta E_g}, \quad (2.4)$$

где

$$\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}. \quad (2.5)$$

Для построения энергетической диаграммы конкретного гетероперехода, нужно вычислить контактную разность потенциалов φ_0 . Для этого необходимо сначала рассчитать положение уровня Ферми в каждом из материалов гетеропары.

Для вычисления положения уровня Ферми относительно дна зоны проводимости ($\mu = F - E_c$) потребуется знать температуру, концентрацию основных носителей и плотность состояний в зонах N_c и N_v .

Для невырожденного примесного полупроводника n -типа положение уровня Ферми относительно зоны проводимости находится из выражения

$$\mu = -kT \ln \frac{N_c}{N_d}, \quad (2.6)$$

для дырочного:

$$\mu = kT \ln \frac{N_v}{N_a} - E_g, \quad (2.7)$$

где N_a , N_d – концентрации акцепторов и доноров, которые мы считаем полностью ионизованными.

В справочниках обычно приведены величины эффективных масс плотности состояний для электронов m_{dn} и дырок m_{dp} . Тогда N_c и N_v вычисляются по формулам

$$N_C = \frac{2(2\pi m_{dn} kT)^{3/2}}{h^3}, N_V = \frac{2(2\pi m_{dp} kT)^{3/2}}{h^3}, \quad (2.8)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана;

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,14 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – постоянная Планка;

T – абсолютная температура, $T = 300$ К.

Если приведены поперечная m_{\perp} и продольная m_{\parallel} составляющая эффективных масс, число эквивалентных эллипсоидов M , то плотность состояний в этом случае рассчитывается по формуле

$$m_d = M^{2/3} (m_{\perp}^2 m_{\parallel})^{1/3}. \quad (2.9)$$

В полупроводниках p -типа необходимо также учесть вклад двух подзон от легких и тяжелых дырок:

$$m_h^{3/2} = m_{lh}^{3/2} + m_{hh}^{3/2}. \quad (2.10)$$

Далее по формулам (2.6), (2.7) вычисляем положение уровня Ферми и контактную разность потенциалов:

$$\varphi_0 = |\Phi_1 - \Phi_2| = |(\chi_1 + |\mu_1|) - (\chi_2 + |\mu_2|)|. \quad (2.11)$$

Для вычисления распределения потенциала в области пространственного заряда требуется решить совместно уравнение Пуассона и уравнение плотности тока, при условии, чтобы в равновесии диффузионный ток через переход уравновешивался дрейфовым током.

В приближении Шоттки в случае равномерного легирования полупроводников для анизотипного гетероперехода получается линейная зависимость поля и параболическая зависимость потенциала:

в области - $d_1 \leq x \leq 0$:

$$E = -\frac{en_1}{\varepsilon_0\varepsilon_1}(x + d_1), \quad (2.12)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{e^2n_1}{2\varepsilon_0\varepsilon_1}(x + d_1)^2 \quad (2.13)$$

В области $0 \leq x \leq d_2$:

$$E = -\frac{en_2}{\varepsilon_0\varepsilon_2}(d_2 - x), \quad (2.14)$$

$$\varphi = \frac{e^2n_2}{2\varepsilon_0\varepsilon_2}(d_2 - x)^2. \quad (2.15)$$

n_1, n_2 – концентрации легирующих примесей в соответствующих областях.

А размер области пространственного заряда получается равным:

$$d_1 = \left(\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1}{e^2n_1}\varphi_1\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.16)$$

$$d_2 = \left(\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_2}{e^2n_2}\varphi_2\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.17)$$

где φ_1, φ_2 – контактные разности потенциалов, приходящиеся на n - и p -области, которые для идеального гетероперехода равны:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_1 n_1}{\varepsilon_2 n_2}}, \quad \varphi_2 = \varphi_0 \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_2 n_2}{\varepsilon_1 n_1}}. \quad (2.18)$$

Полная длина ОПЗ:

$$d = d_1 + d_2 = \left[\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2(n_1+n_2)}{e^2n_1n_2(\varepsilon_1n_1+\varepsilon_2n_2)}\varphi_0 \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

Распределение поля и потенциала показано на рис. 2.3.

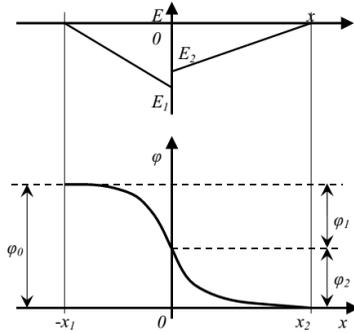


Рис. 2.3. Распределение поля и потенциала в резком анизотипном гетеропереходе

Следует также принимать во внимание, что материалы гетеропары могут иметь минимумы зоны проводимости в разных точках зоны Брюллиена. К примеру, минимум зоны проводимости GaAs находится в точке Γ , в то время как наименьший минимум в AlAs близок к точке X. Таким образом, природа низшего минимума зоны проводимости меняется при изменении доли Al в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (рис. 2.4).

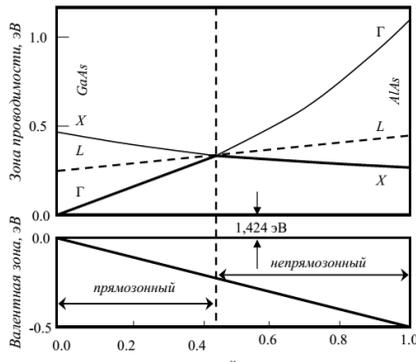


Рис. 2.4. Расположение валентной зоны и зоны проводимости в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Низший минимум в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ изменяется от прямого расположения (минимум в Γ) зон до непрямой зонной структуры (минимум в X) при содержании Al $x \approx 0,45$. Обычно твердый раствор $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ получают с долей Al, меньше 0.4, чтобы получить прямое расположение зон.

На рис. 2.5 приведены зонные диаграммы для различных типов гетеропереходов. Обращает на себя внимание тот факт, что «пик» и «разрыв» для энергетических уровней E_V , E_C в области металлургического перехода могут наблюдаться в различных комбинациях.

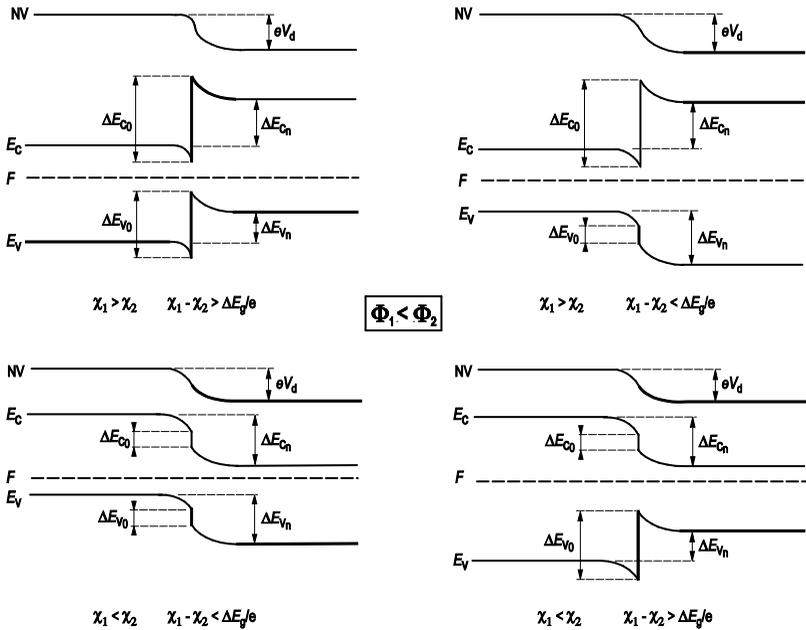


Рис. 2.5. Зонные диаграммы для различных типов гетеропереходов при условии, что термодинамическая работа выхода первого слоя меньше, чем второго ($\Phi_1 < \Phi_2$), и при различных комбинациях для электронного средства

Требования к материалам, образующим гетеропереход. Для того чтобы в кристаллической решетке двух материалов, составляющих гетеропереход, не было дефектов, необходимо как минимум, чтобы два материала имели одну и ту же кристаллическую структуру и близкие периоды решеток. В этом случае структура получается без напряжений. Ясно, что не все материалы могут быть использованы для создания гетероперехода. На рис. 2.6 представлены наиболее часто применяемые материалы для создания гетеропереходов. Руководствуясь приведенным рисунком, можно создавать гетеропереходы «на заказ» с желаемой величиной разрыва зон или квантовую яму с заданной формой потенциала.

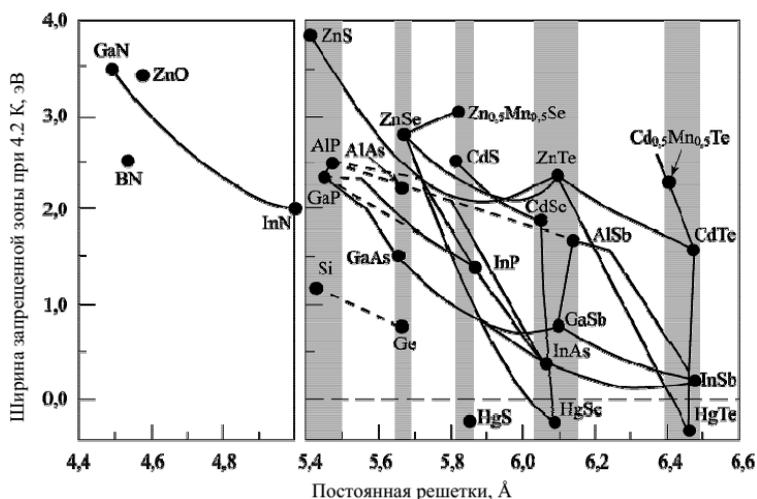


Рис. 2.6. График зависимости энергии запрещенной зоны при низкой температуре от постоянной решетки для ряда полупроводников со структурой алмаза и цинковой обманки

Затененные области объединяют группы полупроводников с близкими значениями постоянных решеток. Полупроводники, соединенные сплошными линиями, образуют между

собой стабильные твердые растворы. Отрицательное значение, приведенное для энергии запрещенной зоны HgSe, является спорным. Штриховые линии указывают на непрямые запрещенные зоны.

При определении свойств тройных и четверных соединений можно пользоваться обобщенным правилом Вегарда. В этом случае тройной состав $A_xB_{1-x}C$ можно описать как сочетание двух, а четверной $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$, как сочетание трех или четырех двойных соединений. При этом значения физических параметров (θ_{ABC} или θ_{ABCD}) сложного соединения представляют собой средние значения параметров двойных соединений, взятых с весом, пропорциональным их доле:

$$\theta_{ABC} = (1 - x) \theta_{AC} + \theta_{BC} , \quad (2.20)$$

$$\theta_{ABCD} = xy\theta_{AC} + x(1 - y) \theta_{AD} + y(1 - x) \theta_{BC} + (1 - x)(1 - y) \theta_{BD} \quad (2.21)$$

Для согласования эмпирических зависимостей с экспериментальными данными в правую часть этих соотношений вводят члены, квадратичные по x и y . В табл. П1 приложения приведены некоторые параметры наиболее распространенного тройного соединения AlGaAs.

Из правила Вегарда следует, что можно подобрать такой состав тройного соединения, при котором будут совпадать параметры решеток, но зонные параметры будут различны. Таким образом, можно получать гетеропереходы с заданными зонными параметрами. Так на подложке GaAs может быть выращен без значительных напряжений AlAs, а также твердый раствор $Al_xGa_{1-x}As$ практически любого состава. Как видно из графика y твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ период решетки меняется менее чем на 0,15 % при изменении x от 0 до 1. Существует очень мало материалов, которые образуют гетеропереход с GaAs без напряжений.

Альтернативой подложки арсенида галлия является InP. Но на данной подложке могут быть без напряжений выращены только два твердых раствора: $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ и $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$.

Порядок выполнения работы

Используя данные своего варианта, приведенные в таблице, и параметры полупроводниковых материалов, используемых для создания гетеропереходов (см. приложение), рассчитать для идеального гетероперехода:

1. Разрывы зон проводимости ΔE_c и разрыв валентной зоны ΔE_v , используя правило Андерсена, формулы (2.2), (2.3).

Данные для расчета идеального гетероперехода

Вариант	Гетеропереход	Концентрация доноров, см^{-3}	Концентрация акцепторов, см^{-3}
1	n-Si - p-Ge	$5 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$
2	p-GaAs – n-AlAs	$3 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{16}$
3	n-InAs – p-GaSb	$2 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{16}$
4	n -GaAs – p-AlAs	$2 \cdot 10^{16}$	10^{17}
5	p-InAs – n-GaSb	$2 \cdot 10^{15}$	10^{16}
6	p-Si - n-Ge	$5 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$
7	p-GaSb - n-AlSb	10^{16}	10^{15}
8	p-AlSb - n-InAs	$2 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{16}$
9	n-GaSb - p-AlSb	$3 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{15}$
10	p-Ge - n-GaAs	10^{17}	10^{18}
11	n-Ge - p-GaAs	10^{18}	10^{17}

2. Определить тип гетероперехода, считая, что $E_{g2} > E_{g1}$.

3. Определить, какая доля от разности $E_{g2} - E_{g1}$ приходится на ΔE_c и ΔE_v , формула (2.4).

4. Определить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости, формулы (2.6), (2.7), (2.8)

5. Диффузионный потенциал ϕ_0 , используя формулу (2.11)

6. Рассчитайте контактные разности потенциалов, проходящие на каждый материал (2.18), толщину обедненных слоев (2.16), (2.17), напряженности полей на границе раздела (2.12), (2.14) при $x = 0$.

7. Постройте энергетическую диаграмму гетероперехода, используя рассчитанные параметры (см. рис. 2.1).

8. Определите, какой высоты потенциальные барьеры стоят на пути встречного движения через переход основных носителей.

Контрольные вопросы

1. Гетероструктуры в современной микроэлектронике.
2. Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов.
3. Энергетическая диаграмма идеального гетероперехода.
4. Физические явления в классических гетероструктурах.
5. Односторонняя инжекция.
6. Сверхинжекция.
7. Диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле.
8. Электронное ограничение.
9. Оптическое ограничение.
10. Эффект широкозонного окна.
11. Диагональное туннелирование через гетерограницу.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Цель работы: изучение явления генерации света в полупроводниках и исследование характеристик светодиодов.

Используемое оборудование и материалы: зеленый светодиод ARL-5513 PGC, красный светодиод ARL-5213 URC, люксметр, источник питания ИПД-1, вольтметр, амперметр или мультиметр.

Теоретическая часть

Светоизлучающим диодом называется полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения. При протекании через диод прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда в базовую область диодной структуры. Процесс самопроизвольной рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда, происходящий как в базовой области, так и в самом *p-n*-переходе, сопровождается их переходом с высокого энергетического уровня на более низкий; при этом избыточная энергия выделяется путем излучения кванта света. Длина волны излучения λ связана с изменением энергии электрона ΔE соотношением: $\lambda = hc/\Delta E$, где h - постоянная Планка; c - скорость света.

Диапазон длин волн видимого глазом света составляет 0,45 - 0,68 мкм, а ΔE почти равно ширине запрещенной зоны E_g полупроводника, на основе которого изготовлен светоизлучающий диод. Чтобы фотоны, образовавшиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой ($E_g > 1,8$ эВ). Исходя из этого ограничения, для изготовления светоизлучающих диодов используются

следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP), карбид кремния (SiC), твердые растворы (GaAsP, Al-GaAs), а также нитрид галлия (GaN), который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны ($E_g = 3,4$ эВ), что позволяет получать излучение в коротковолновой части видимого спектра вплоть до фиолетового. Добавлением в полупроводниковый материал активаторов можно изменять в некоторых пределах цвет излучения диода.

По конструктивному признаку выпускаемые светодиоды подразделяются на приборы в металлических корпусах со стеклянной линзой (обладают весьма острой направленностью излучения), в пластмассовых корпусах из оптически прозрачного, чаще цветного компаунда, создающего рассеянное излучение; и бескорпусные, во избежание механических повреждений и загрязнения поверхности, поставляемые в специальной таре-спутнике (при монтаже их приклеивают).

Светоизлучающие диоды в основном применяются как элементы индикации включения, готовности аппаратуры к работе, наличия напряжения питания в блоке, аварийной ситуации и других состояний. Дискретные светодиоды в пластмассовых корпусах применяются так же для набора матриц и линейных шкал, служащих средствами отображения крупноразмерной цифровой и линейно изменяющейся информации.

Основными параметрами промышленных светоизлучающих диодов являются:

1. Сила света I_v - излучаемый диодом световой поток на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла. Указывается при заданном значении прямого тока и измеряется в канделах.

2. Яркость B - величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности. Измеряется в канделах на квадратный метр при заданном значении прямого тока через диод.

3. Постоянное прямое напряжение $U_{\text{пр}}$ - значение напряжения на светодиоде при протекании прямого тока.

4. Максимально допустимый постоянный прямой ток $I_{\text{пр. макс.}}$ - максимальное значение постоянного прямого тока, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе диода.

5. Максимальное допустимое обратное постоянное напряжение $U_{\text{обр макс}}$ - максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к диоду, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе.

6. Максимальное допустимое обратное импульсное напряжение $U_{\text{обр и макс}}$ - максимальное пиковое значение обратного напряжения на светодиоде, включая как однократные выбросы, так и периодически повторяющиеся.

7. Максимум спектрального распределения $\lambda_{\text{мах}}$ - длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной характеристики излучения.

К основным характеристикам светодиодов относятся:

- ***спектральная характеристика*** – это зависимость интенсивности светового потока (яркости или мощности, или силы света, или энергии) от длины волны. На рис. 3.1, а представлены спектральные характеристики, дающие зависимость относительной мощности от длины волны излучения, для светодиода из фосфида галлия (кривая 1) и фосфида арсенида галлия (кривая 2);

- ***яркостная характеристика*** - это зависимость яркости B от тока через p - n -переход, т.е. $B = f(I)$, или зависимость силы света от прямого тока, $I_v = f(I)$ - световая характеристика. Вид яркостной характеристики зависит от структуры p - n -перехода и области, в которой происходит преимущественная рекомбинация носителей заряда. При малых токах и, соответственно, малых напряжениях излучение отсутствует. Излучение возникает при напряжениях, соответствующих энергии излучаемого фотона, приблизительно равной ширине запре-

щенной зоны, то есть при $U = U_{\text{пор}}$ (напряжению $U_{\text{пор}}$ соответствует $I_{\text{пор}}$ на рис. 3.1, б). Рост напряжения (тока) увеличивает число рекомбинирующих с излучением носителей, и яркость возрастает. При больших токах начинает сильно проявляться безизлучательная рекомбинация из-за заполнения ловушек, в результате уменьшается квантовый выход и наклон характеристики к оси абсцисс становится меньше;

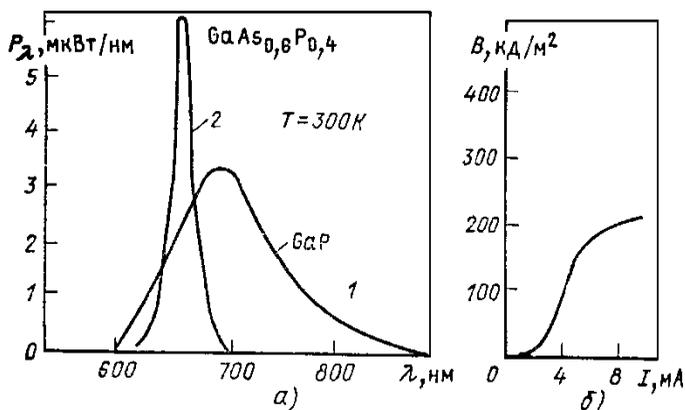


Рис. 3.1. Спектральная (а) и яркостная (б) характеристики светодиодов

- *вольт-амперная характеристика $I = f(U)$* – совпадает с вольт-амперной характеристикой обычного диода.

Излучение диода так же характеризуется диаграммой направленности, которая определяется конструкцией диода, наличием линзы, оптическими свойствами защищающего кристалл материала.

Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторный стенд по схеме, представленной на рис. 3.2

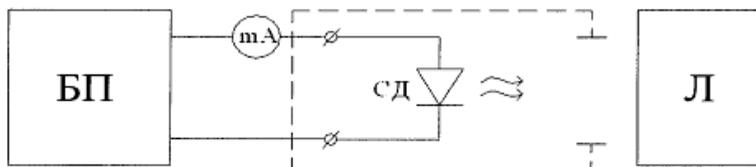


Рис. 3.2. Схема измерительной установки: БП - источник питания (ИПД-1), СД - светодиод, Л – люксметр

2. Произвести измерения зависимости освещенности E площадки люксметра от тока I и напряжения U через светодиод красного цвета свечения до максимального значения $I = 20$ мА. Результаты измерений занести в таблицу.

Исследование характеристик светодиода

$I, \text{мА}$	$U, \text{В}$	$E, \text{лк}$	$I_v, \text{мкд}$

3. Построить вольт-амперную характеристику светодиода

4. Рассчитать значение силы света светодиода по формуле: $I_v = E \cdot S/\pi$, где S - площадь приемной площадки люксметра. Рассчитанные значения занести в таблицу.

5. Построить графики зависимости силы света светодиодов от рабочего тока (световые характеристики).

6. Повторить измерения для светодиода зеленого цвета свечения.

Контрольные вопросы

1. Электролюминесценция в p - n -переходах. Внутренний квантовый выход.
2. Зависимость генерируемого светодионом светового потока от приложенного напряжения и температуры.
3. Спектральные характеристики и быстродействие светодиодов.
4. Потери на поглощение и отражение в инжекционных излучающих диодах.
5. Материалы и конструкции инжекционных излучающих диодов.
6. Применение инжекционных излучающих диодов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: изучить методики измерения основных параметров и характеристик полупроводникового лазера.

Используемое оборудование и материалы: лазерный диод типа DL-3147-021; фотодиоды ФД-263-01 и ФД-24К с фоточувствительным элементом круглой формы диаметром 10 мм, вольтметр, амперметр или мультиметр; установка для измерения характеристик и параметров лазера.

Теоретическая часть

Полупроводниковые лазеры составляют особую группу среди лазеров на основе твердого тела. Важнейшим преимуществом использования полупроводников в качестве активных сред лазеров является возможность прямого преобразования электрической энергии в энергию когерентного электромагнитного излучения. При этом теоретически возможно получение коэффициента полезного действия приборов этого типа, близкого к 100 %.

В отличие от других активных сред, используемых для создания лазеров, энергетический спектр полупроводника имеет широкие полосы разрешенных состояний электронов (зону проводимости и валентную зону), которые разделены запрещенной зоной. При этом состояния электронов в зоне проводимости и в валентной зоне описываются не локализованными волновыми функциями, а блоховскими функциями, «размазанными» в пространстве. Соответственно, каждый из электронов в кристалле нельзя рассматривать как принадлежащий отдельному атому. Поэтому условие инверсии, записанное в обычном виде ($N_m > N_n$ при $E_m > E_n$), для полупроводников неприемлемо.

Условие усиления электромагнитной волны в полупроводнике можно получить, если рассмотреть полное число переходов с поглощением и испусканием фотонов. Если учитывать только переходы зона–зона, то число испущенных в результате индуцированного испускания фотонов будет превышать число поглощенных фотонов при выполнении условия

$$F_{n^*} - F_{p^*} > E_g, \quad (4.1)$$

где F_{n^*} и F_{p^*} – квазиуровни Ферми для электронов и дырок, а E_g – ширина запрещенной зоны.

Это соотношение по существу определяет условие инверсии населенности в полупроводнике для переходов зона–зона. Его физический смысл вполне очевиден: для того чтобы обеспечить преобладание усиления за счет процессов вынужденного испускания над процессами собственного поглощения, необходимо создать такие избыточные неравновесные концентрации носителей в зоне проводимости и в валентной зоне, при которых расстояние между квазиуровнями Ферми будет превышать ширину запрещенной зоны полупроводника. Это означает, что один или оба квазиуровня Ферми должны находиться внутри разрешенных зон, т. е. возбуждение должно быть настолько интенсивное, чтобы создать вырождение в зоне проводимости и в валентной зоне.

В общем случае для любых типов излучательных переходов с испусканием фотонов $\hbar\omega$ условие инверсии записывается в виде

$$F_{n^*} - F_{p^*} > \hbar\omega. \quad (4.2)$$

Условия (4.1), (4.2) являются необходимыми, но не достаточными для получения усиления или генерации в системе в целом. Достаточным условием здесь, как и в прочих типах усилителей и генераторов, является превышение усиления над

всеми потерями. В полупроводниках с непрямой структурой энергетических зон выполнение этого условия затруднено. Поэтому в подавляющем большинстве случаев для получения лазерного эффекта используются полупроводники с прямой структурой энергетических зон, в которых вероятность излучательных переходов существенно превышает вероятность неактивного поглощения на свободных носителях заряда. Необходимым условием достижения лазерной генерации является также наличие положительной обратной связи в системе. Как и в других типах лазеров, эта задача может быть решена с помощью открытых резонаторов. Наиболее широко в полупроводниковых лазерах используется плоский резонатор (резонатор Фабри–Перо), поскольку его удобно изготовить сколами по кристаллографическим плоскостям, перпендикулярным плоскости p - n -перехода лазерной структуры.

В инжекционном лазере для получения состояния с инверсией населенностей используется инжекция носителей заряда через p - n -переход, смещенный в прямом направлении. При достаточно большом напряжении, приложенном в прямом направлении, вблизи p - n -перехода возникает область с инверсной населенностью, как это показано на рис. 4.1 слева. При малых плотностях тока имеет место рекомбинационное излучение, связанное со спонтанными переходами. По мере возрастания плотности тока коэффициент усиления растет до тех пор, пока не будет достигнуто пороговое значение, при котором возникнет лазерный эффект. В этом случае наблюдается резкое увеличение интенсивности и сужение спектра излучения лазерного диода.

Пороговое значение плотности тока может быть определено из соотношения

$$j_{\text{пор}} = \frac{eBd}{A_0^2 \xi^2} \cdot \left(\alpha_0 \xi + \beta_\omega + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right), \quad (4.3)$$

где L – длина резонатора, d – толщина активной области p - n -перехода; $\beta\omega$ – показатель объемных потерь; B – коэффициент рекомбинации; ξ – коэффициент удержания света; $R1$ и $R2$ – коэффициенты отражения зеркал резонатора.

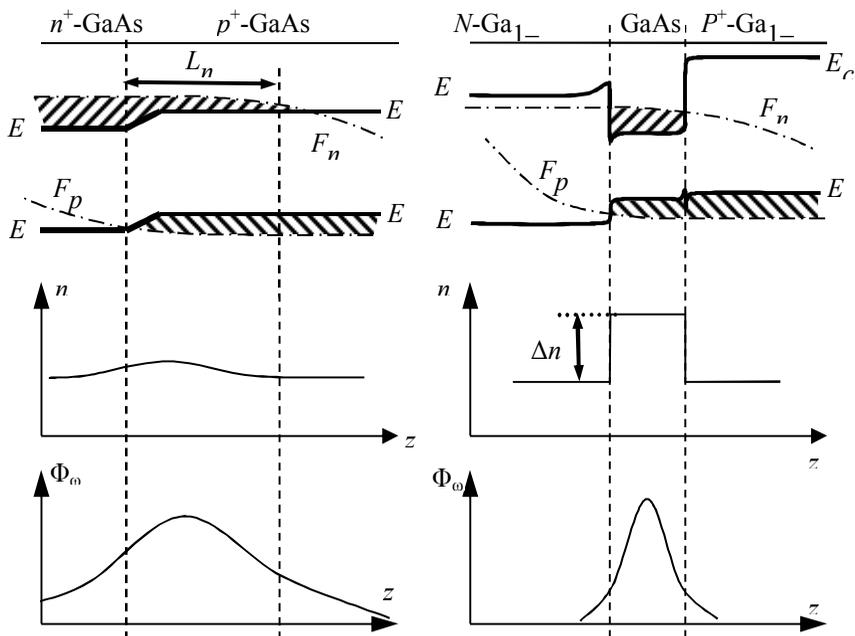


Рис. 4.1. Энергетические диаграммы, профиль показателя преломления n и распределение интенсивности электромагнитного поля Φ_ω в диодах с гомоструктурой и двойной гетероструктурой

Пороговая плотность тока, как видно из (4.3), снижается по мере уменьшения размеров активной области d . В обычных p - n -переходах с гомоструктурой размер этой области в основном определяется диффузионной длиной инжектируемых носителей заряда и не может быть искусственно ограничен. Как видно из рис. 4.1, существует перепад показателя преломле-

ния в области объемного заряда, что приводит к некоторой локализации электромагнитного поля вследствие волноводного эффекта. Однако этот перепад невелик (менее 1 %) и практически не может управляться извне, поэтому его влияние на снижение порогового тока не столь существенно.

Использование гетеропереходов для создания инжекционных лазеров дает целый ряд преимуществ по сравнению с гомопереходами, особенно в случае использования двойных гетероструктур (ДГС-лазеры). Для изготовления гетеролазеров в основном применяются полупроводниковые соединения A^3B^5 и твердые растворы на их основе, в частности арсенид галлия и твердые растворы типа $Ga_{1-x}Al_xAs$. Диаграммы, поясняющие принцип и особенности работы таких лазеров, приведены на рис. 4.1 справа. Активная область инжекционного гетеролазера на основе арсенида галлия представляет собой тонкий слой GaAs с $d \approx 0,3$ мкм. Электроны и дырки инжектируются в него из широкозонных $N-Ga_{1-x}Al_xAs$ и $P-Ga_{1-x}Al_xAs$ -областей, выполняющих функцию эмиттеров. Это позволяет создавать в активной области концентрацию избыточных носителей заряда, превышающую равновесную концентрацию этих носителей в широкозонном эмиттере (**эффект сверхинжекции**), что снимает необходимость сильного легирования эмиттера. Кроме того, имеются потенциальные барьеры, препятствующие диффузии инжектированных носителей из слоя GaAs – возникает **эффект электронного ограничения**.

Важно, что у $Ga_{1-x}Al_xAs$ показатель преломления существенно меньше, чем у GaAs, причем разница показателей преломления может достигать величины $\Delta n \approx -0,4$. Это означает наличие диэлектрического волновода, обеспечивающего сильную локализацию поля (**эффект оптического ограничения**). Таким образом, пороговый ток снижается не только за счет уменьшения толщины активной области, но и за счет уменьшения коэффициента потерь ξ , из-за того что ограничивается проникновение поля в соседние p - и n - области с

большими потерями. Оптимизация параметров гетероструктуры по электронному и оптическому ограничениям позволяет снизить величину порогового тока при комнатной температуре до значения $j_{\text{пор}} \leq 1 \text{ кА/см}^2$ по сравнению с $j_{\text{пор}} \leq 100 \text{ кА/см}^2$, характерного для гомоструктур. Для дальнейшего уменьшения $j_{\text{пор}}$ применяют структуры с отдельным электронным и оптическим ограничением (РО ДГС-лазеры), содержащие в активной области квантово-размерные наноструктуры (квантовые ямы и точки).

Рабочие характеристики инжекционных лазеров. Электрические характеристики, выходная мощность и спектры излучения определяются особенностями конструкции и материалом активной области. Типичная **вольт-амперная характеристика** ДГС-лазера с широким контактом на основе приведена на рис. 4.2. Напряжение, при котором ток равен 1 мА, обычно составляет 1,1 - 1,2 В. Если при таком напряжении ток прямого смещения значительно превосходит 1 мА, то это свидетельствует о наличии дополнительных паразитных каналов избыточного тока, приводящих к увеличению $J_{\text{пор}}$. Напряжение пробоя при обратном смещении зависит от уровня легирования. Характерное значение – около 6 В.

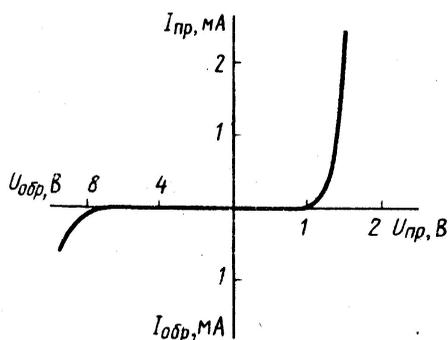


Рис. 4.2. Типичная вольт-амперная характеристика ДГС лазера с широким контактом

Ток в прямом направлении при его изменении от 10^{-10} до 10^{-3} А хорошо описывается известным соотношением $I_{\text{пр}} \sim \exp(eU/2kT)$. При больших токах на вольт-амперную характеристику начинают влиять разогрев и падение напряжения на контактах и в приконтактных областях.

Типичные *спектры излучения* ДГС-лазера приведены на рис. 4.3.

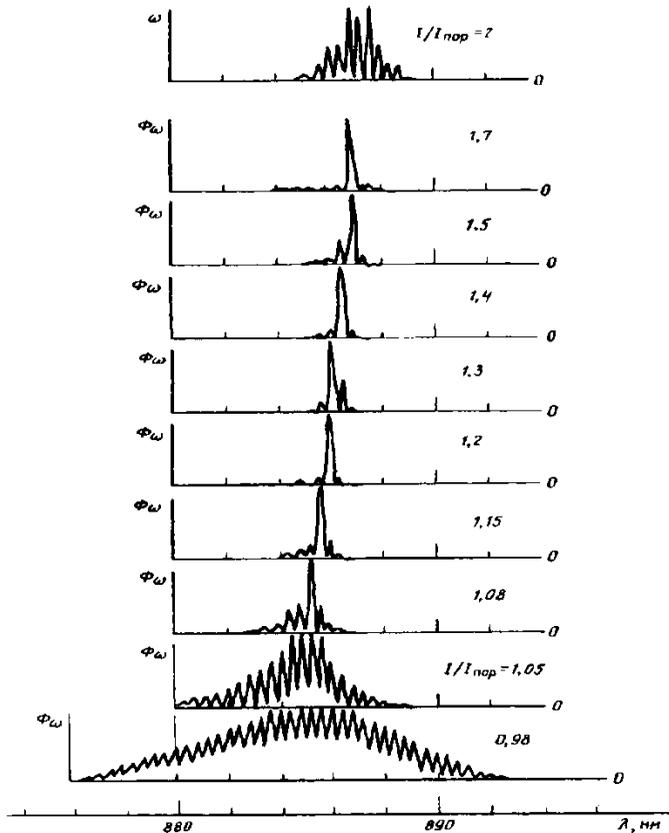


Рис. 4.3. Изменение спектра излучения ДГС – лазера с изменением тока накачки.

Ширина полоски 0,3 мкм; $I_{\text{пор}} = 50$ мА

В лазерах с широким контактом или с большой шириной полоски в зависимости выходной мощности от тока накачки могут наблюдаться характерные изломы, вызванные нестабильностью работы. В полосковых лазерах с узким контактом эти неприятности отсутствуют.

Спектр излучения при токах ниже порогового представляет собой сравнительно широкую полосу, обусловленную межзонными или квазимежзонными спонтанными переходами в активной области гетеролазера. При приближении к порогу в спектре излучения возникает модовая структура, которая при токе вблизи порогового проявляется очень отчетливо (рис. 4.3). Этот режим работы называется сверхлюминесценцией или суперлюминесценцией: в активной области создана инверсия населенности, но ее еще не хватает для начала генерации, т.е. еще не выполнено условие самовозбуждения. При $J > J_{\text{пор}}$ спектр излучения сужается, увеличивается направленность и когерентность излучения. При изменении плотности тока накачки возможен перескок с одной моды на другую. При увеличении тока накачки максимум спектральной зависимости показателя усиления сдвигается в коротковолновую область. Одновременно при больших J происходит нагрев кристалла, за счет чего спектр сдвигается в длинноволновую область. Часто второй эффект преобладает над первым.

На рис. 4.4 приведена ***ватт-амперная характеристика лазера*** на гетероструктуре и спектры излучения в разных ее точках. Если в активной области лазера имеются факторы, приводящие к неоднородному уширению спектральной линии люминесценции (например, неоднородность состава по площади активного слоя), то даже в полосковом РОДГС-лазере велика вероятность генерации в многомодовом режиме с участием нескольких продольных мод.

По ватт-амперной характеристике, возможно, определить значение порогового тока. На начальном участке характеристики, соответствующем спонтанной эмиссии, интенсивность

излучения (пропорциональная току детектора) медленно растет с увеличением тока, протекающего через диод, а после возбуждения лазерной генерации резко возрастает. Экстраполяция этой кривой к нулевому значению мощности, дает значение порогового тока (рис. 4.5).

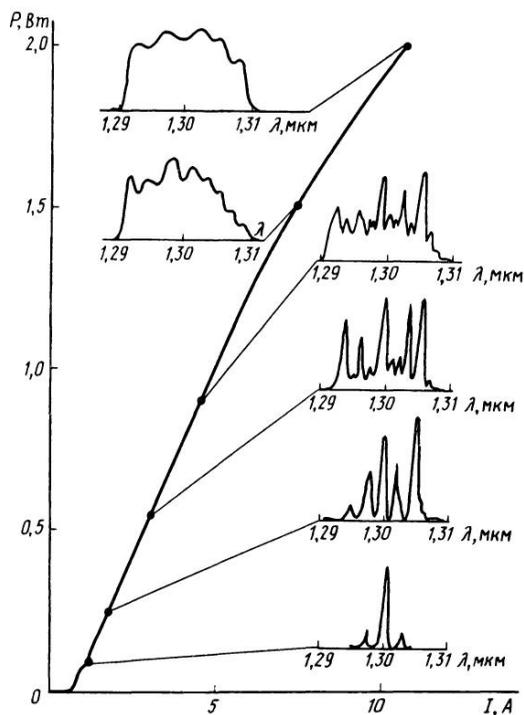


Рис. 4.4. Ватт-амперная характеристика ДГС-лазера

Диаграмма направленности инжекционного лазера (рис. 4.6) определяется теми же факторами, что и у лазеров других типов. Для основной моды угол расходимости дается соотношением

$$\theta_D = \lambda\beta/d, \quad (4.4)$$

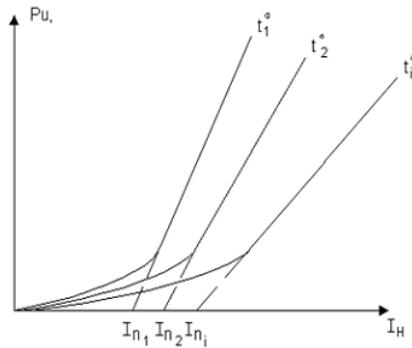


Рис. 4.5. Определение порогового тока по ватт-амперной характеристике

где β – числовой коэффициент порядка единицы; его точное значение зависит от распределения амплитуды поля, а также от способа, которым определены θ_D и d . Так как поперечные размеры активной области в полупроводниковых лазерах очень малы, то дифракционная расходимость будет велика.

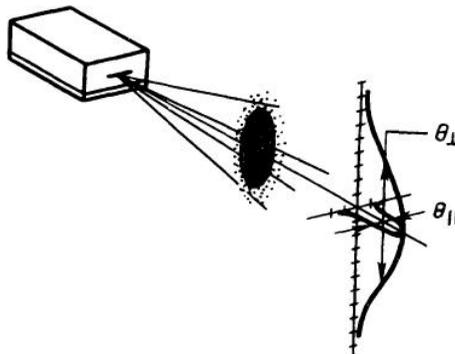


Рис. 4.6. Диаграмма направленности и картина дальнего поля ДГС-лазера

В плоскости, перпендикулярной активному слою, она будет определяться толщиной области оптического ограничения D , а в плоскости p - n -перехода – шириной области генерации или шириной полоски W в полосковом лазере. Так как $D < W$, то угол расходимости излучения в плоскости p - n -перехода θ_{\parallel} будет меньше, чем в перпендикулярной плоскости θ_{\perp} . Картина излучения полоскового гетеролазера работающего в одномодовом режиме, в дальней зоне представляет собой эллипс, расширяющийся в направлении, перпендикулярном поверхности слоя. Типичные значения $\theta_{\perp} = 30 - 60^{\circ}$ и $\theta_{\parallel} = 10 - 30^{\circ}$. Для его фокусировки могут быть использованы цилиндрические линзы.

Важное влияние на характеристики лазера оказывает **температура**. Наиболее сильно она влияет на пороговый ток и мощность излучения, что вызвано в основном двумя причинами. Во-первых, с увеличением температуры происходит «размазывание» носителей по энергии. Во-вторых, с увеличением температуры обычно происходит снижение эффективности люминесценции в активной области (температурное гашение люминесценции), приводящее к уменьшению квантового выхода и времени жизни неравновесных носителей заряда в активном слое. Поэтому в полупроводниковых лазерах следует самое серьезное внимание уделять теплоотводу. Обычно температурная зависимость пороговой плотности тока в области $T > 250$ К приближенно описывается экспоненциальной функцией.

Изменение ширины запрещенной зоны с температурой вызывает сдвиг спектра лазерного излучения. Если лазер работает в многомодовом режиме, то увеличение температуры приводит к плавному смещению огибающей спектра в длинноволновую область. Если лазер работает в одномодовом режиме, то увеличение температуры будет приводить к скачкообразным изменениям $\lambda_{\text{ген}}$, определяемым перескоком с одной моды на другую при изменении ширины запрещенной зоны.

Описание установки

Установка для измерения характеристик и параметров лазерных диодов имеет вид, приведенный на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Установка для измерения характеристик и параметров лазерных диодов

Питание осуществляется от зарядного устройства для телефона 5 В через usb-интерфейс. Есть кнопка отключающая питание. Регулировка напряжения осуществляется переменными резисторами V^+ .

Mult – гнезда для подключение мультиметра.

A1, A2, A3 – кнопки, позволяющие включить мультиметр в цепь как амперметр или отключить его от цепи полностью и замкнуть место разрыва. A1 – измерение тока на лазерном диоде, A2 - измерение тока на фотодиоде ФД1, A3 - измерение тока на фотодиоде ФД2.

V – кнопка, позволяющая включить мультиметр в цепь как вольтметр и измерить напряжение на лазерном диоде.

FD1, FD2 – кнопка выбора фотодиода 1 или 2, позволяющая отключить не используемый фотодиод от потенциала.

6 гнезд рядом с мультиметром LD, FD1, FD2 - выходы на осциллограф, которые подходят непосредственно к элементам. К гнездам LD можно подключить вольтметр для измерения напряжения на лазерном диоде, к гнездам FD1, FD2 амперметры для измерения тока на фотодиодах. Ток на лазерном диоде измеряется при подключении амперметра к гнездам Mult и включении кнопки A1.

Основные технические параметры фотодиода ФД-263-01:

- размер фоточувствительного элемента: диаметр 3 мм;
- область спектральной фоточувствительности: 0,4...1,1 мкм;
- длина волны максимума спектрального распределения фоточувствительности: 0,8...0,9 мкм;
- номинальное рабочее напряжение: 12 В;
- темновой ток: не более 0.1 нА;
- токовая фоточувствительность: не менее 0,12 А/Вт.

Основные технические параметры фотодиода ФД-24К:

- размер фоточувствительного элемента: диаметр 10 мм;
- токовая фоточувствительность, при рабочем напряжении 27 В и освещенности 1000 лк: не менее 0,47 мкА/лк;
- темновой ток: не более 2,5 мкА;
- постоянная времени фотоприемника: не более 10 мкс;
- емкость фотодиода: 600 пФ;
- область спектральной фоточувствительности: 0,4...1,1 мкм;
- длина волны максимума спектрального распределения фоточувствительности: 0,75...0,85 мкм;
- наибольшее постоянное рабочее (обратное) напряжение: 30 В;
- наибольшая рабочая освещенность: 1100 лк;
- максимальная кратковременная (не более 2 мин) освещенность: 11000 лк;

- рабочий интервал температуры окружающей среды: - 60...+ 75 °С

Порядок выполнения работы

ЗАПРЕЩАЮТСЯ ЛЮБЫЕ ДЕЙСТВИЯ, ПРИВОДЯЩИЕ К ПОПАДАНИЮ В ГЛАЗА ПРЯМОГО ИЛИ ОТРАЖЕННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. Исследование энергетической и вольтамперной характеристик.

Энергетическая характеристика измеряется с помощью фотодиода ФД1, который конструктивно размещен напротив полупроводникового AlGaInP лазера типа DL-3147-021.

Собрать схему лабораторного стенда в соответствии с рис. 4.8. При этом миллиамперметр РА2 подключить к фотодиоду ФД1. Измерить значение темнового тока $I_{ФТ1}$ фотодиода ФД1.

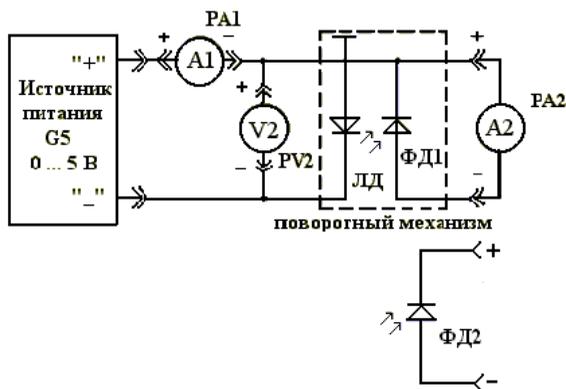


Рис. 4.8. Схема лабораторного стенда

Регуляторами напряжения источника питания V^+ установить минимальное напряжение. Для этого ручку регулятора повернуть против часовой стрелки до упора. Включить источник питания.

С помощью регулятора плавно увеличивать напряжение от нуля до максимума. При этом измерять ток через лазерный диод $I_{\text{Л}}$ с помощью милиамперметра РА1 (кнопка А1, гнезда Mult), напряжение на лазерном диоде $U_{\text{Л}}$ с помощью вольтметра PV2 (кнопка V, гнезда Mult или вольтметр к гнездам LD) и ток через фотодиод ФД1 $I_{\text{Ф1}}$ с помощью милиамперметра РА2 (кнопка А2 гнезда Mult или амперметр к гнездам FD1). Результаты измерений занести в табл. 4.1.

Выключить источник питания. По измеренным значениям рассчитать потребляемую лазерным диодом мощность: $P_{\text{Л}} = I_{\text{Л}} U_{\text{Л}}$ и мощность излучения: $P_{\text{и}} = K(I_{\text{Ф1}} - I_{\text{ФТ1}})$ (мВт). Значение коэффициента K определено при калибровке фотодиода ФД1 и равно 20.

Таблица 4.1

Измерение вольт-амперных и ватт-амперных характеристик.

Сводная таблица измеренных и расчетных величин

Измеренные			Расчитанные			
$I_{\text{Л}}$	$U_{\text{Л}}$	$I_{\text{Ф1}}$	$P_{\text{Л}}$	$P_{\text{и}}$	η	$K_{\text{ВНЕШ}}$

2. Отобразить на графиках вольт-амперную характеристику $I_{\text{Л}} = f(U_{\text{Л}})$ и энергетическую характеристику $P_{\text{и}} = f(I_{\text{Л}})$. По энергетической характеристике определить значение порогового тока $I_{\text{пор}}$.

3. Рассчитать коэффициент полезного действия лазера: $\eta = P_{\text{и}}(I_{\text{Л}})/P_{\text{Л}}(I_{\text{Л}})$. Отобразить на графике зависимость $\eta = f(I_{\text{Л}})$;

4. Рассчитать значение внешнего квантового выхода $K_{\text{внеш}}$ по формуле:

$$K_{\text{внеш}} = \frac{N_{\text{Ф}}}{N_{\text{рек}}}, \quad (4.5)$$

где $N_{рек}$ - количество электронов, рекомбинировавших за одну секунду; N_{Φ} – количество излучаемых за одну секунду фотонов. $N_{рек}$ определяется отношением тока через лазерный диод $I_{Л}$ к заряду электрона q :

$$N_{рек} = \frac{I_{Л}}{q}, \quad (4.6)$$

где N_{Φ} определяется отношением мощности излучения лазера $P_{И}$ к энергии одного кванта:

$$N_{\Phi} = \frac{P_{И}}{h\nu} = \frac{P_{И}\lambda}{hc}, \quad (4.7)$$

h – постоянная Планка, $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; c – скорость света, $3 \cdot 10^8$ м/с; λ - длина волны излучения, в нашем случае $\lambda = 647$ нм.

Отсюда

$$K_{внеш}(I_{Л}) = \frac{\lambda P_{И}(I_{Л})q}{I_{Л}hc}. \quad (4.8)$$

Отобразить на графике зависимость $K_{внеш} = f(I_{Л})$.

5. Измерение диаграммы направленности излучения проводится с помощью фотодиода ФД2 типа ФД-24К (фотодиоды ФД-24К имеют фоточувствительный элемент круглой формы диаметром 10 мм), расположенного на удалении от полупроводникового лазера (кнопка FD1, FD2 включена).

Подключить к фотодиоду ФД2 микроамперметр РА2 (кнопка А3, гнезда Mult или амперметр к гнездам FD2) и измерить значение темнового тока $I_{ФТ2}$.

Включить источник питания и установить ток через лазерный диод $I_{Л} = 35$ мА. С помощью поворотного механизма и

транспортира на лабораторном стенде изменять угол поворота φ от -20° до $+20^\circ$ с шагом 5° и для каждой точки заносить в табл. 2.2 значения тока фотодиода ФД2. Выключить источник питания.

Рассчитать отсчеты диаграммы направленности излучения в относительных единицах и заполнить табл. 4.2

$$G_{\text{отн}}(\varphi) = \frac{I_{\text{Ф2}}(\varphi) - I_{\text{ФТ2}}}{I_{\text{Ф2}}(\varphi=0) - I_{\text{ФТ2}}}. \quad (4.9)$$

Отобразить на графике диаграмму направленности $G_{\text{отн}}(\varphi)$. Определить угол расходимости излучения.

Таблица 4.2

Измерение диаграммы направленности

$\varphi, ^\circ$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$I_{\text{Ф2}}$									
$G_{\text{отн}}$									

Контрольные вопросы

1. Пояснить особенности создания инверсной населенности в полупроводниках.
2. Перечислить и пояснить методы возбуждения, используемые в полупроводниковых лазерах.
3. Почему диаграммы направленности инжекционного лазера различны в разных плоскостях?
4. Дать описание экспериментальной установки и пояснить назначение отдельных ее элементов.
5. Пояснить влияние плотности тока на спектр излучения лазерного диода.
6. В чем заключаются преимущества гетероструктур перед обычными p - n -переходами при создании инжекционных лазеров?

7. Пояснить эффекты односторонней инжекции, сверхинжекции и волноводный эффект в двойной гетероструктуре.

8. Чем определяются оптимальные размеры активной области лазера в двойной гетероструктуре (толщина, ширина и длина)?

9. В чем состоит принцип раздельного электронного и оптического ограничений и как он реализуется в РО ДГС-лазерах?

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В табл. П1, П2, П3 приведены некоторые параметры полупроводников, наиболее часто используемых для создания гетероструктур. Здесь применены следующие обозначения:

a - период кристаллической решетки;

$\hbar\omega_{LO}$ - энергия продольного фонона;

$\hbar\omega_{TO}$ - энергия поперечного фонона;

E_g^Γ - прямой разрыв зон в точке Γ ;

E_g^X - прямой разрыв зон в точке X ;

E_g^L - прямой разрыв зон в точке L ;

Δ - величина спин-орбитального отщепления валентной зоны;

χ - сродство к электрону;

m_Γ - эффективная масса электронов в Γ -долине;

m_Γ^X - поперечная эффективная масса электронов в X -долине;

m_L^X - продольная эффективная масса электронов в X -долине;

m_{lh} - эффективная масса легких дырок;

m_{hh} - эффективная масса тяжелых дырок;

m_{so} - эффективная масса спин-отщепленных дырок;

$\varepsilon(\omega = 0)$ - относительная диэлектрическая проницаемость.

Эффективные массы электронов и дырок приведены в m/m_0 , где m_0 - масса покоя электрона.

Таблица П1

Некоторые параметры твердого раствора AlGaAs
при комнатной температуре

Параметр	GaAs	AlAs	Al _x Ga _{1-x} As
a , нм	0.56533	0.56611	$0.56533+0.00078x$
$\hbar\sigma_{LO}$, мэВ	36.2	50.1	не интерполируется
$\hbar\sigma_{TO}$, мэВ	33.3	44.9	не интерполируется
E_g^r , эВ	1.424	3.018	$1.424+1.247x$, $x<0.45$ $1.656+0.215x+0.143x^2$, $x>0.45$
E_g^x , эВ	1.900	2.168	$1.900+0.125x+0.143x^2$
E_g^L , эВ	1.708	2.350	$1.708+0.642x$
ΔE_C^r , эВ	0	1.12	$0.773x$, $x<0.45$ $0.232-0.259x+1.147x^2$, $x>0.45$
ΔE_C^x , эВ	0.476	0.270	$0.476-0.349x+0.143x^2$
ΔE_C^L , эВ	0.284	0.452	$0.284+0.168x$
ΔE_V , эВ	0	0.474	$0.474x$
χ , эВ	4.07	3.5	$4.07-1.1x$, $x<0.45$ $3.65-0.14x$, $x>0.45$
m_r	0.067	0.150	$0.067+0.083x$
m_r^x	0.23	0.19	
m_l^x	1.3	1.1	
m_{hh}	0.082	0.153	$0.082+0.071x$
m_{hh}	0.5	0.5	
m_{so}	0.15	0.24	$0.15+0.09x$
$\varepsilon_h(\vartheta=0)$	13.18	10.06	$13.18-3.12x$

Разрывы ΔE_C^r , ΔE_C^x , ΔE_C^L в зоне проводимости отсчитываются от низа валентной зоны GaAs (Γ^6).

Таблица П2

Некоторые параметры наиболее часто используемых
для создания гетеропереходов материалов

Параметр	Si	Ge	GaAs	AlAs	InAs	GaP	InP	GaSb	AlSb	InSb
a , нм	0.5431	0.5658	0.5653	0.5660	0.6058	0.5451	0.5869	0.6096	0.6136	0.6479
$\hbar\omega_{LO}$, мэВ	64	37	36	50	30	51	43	29	42	24
$E_g^{(300K)}$, эВ	1.12	0.66	1.42	2.15	0.35	2.27	1.34	0.75	1.62	0.18
$E_g^{(0K)}$, эВ	1.17	0.74	1.52	2.23	0.42	2.35	1.42	0.81	1.69	0.23
$E_c^{(min)}$	X	L	Г	X	Г	X	Г	Г	X	Г
E_g^r , эВ	3.5	0.80	-	3.02	-	2.78	-	-	2.30	-
Δ , эВ	0.044	0.29	0.34	0.28	0.38	0.08	0.11	0.75	0.67	0.98
χ , эВ	4.01	4.13	4.07	3.51	4.92	4.3	4.38	4.06	3.65	4.59
m_{hh}	0.54	0.28	0.5	0.5	0.41	0.67	0.6	0.28	0.4	0.4
m_{lh}	0.15	0.044	0.082	0.15	0.026	0.17	0.12	0.050	0.11	0.02
m_Γ			0.067	0.150	0.022		0.077	0.04		0.014
m_L	0.92	1.64	1.3	1.1		4.8			1.0	
m_T	0.19	0.082	0.23	0.19		0.25			0.26	
ϵ	11.9	16.2	13.2	10.1	15.1	11.1	12.6	15.7	12.0	16.8
μ_n , $M^2 B^{-1} c^{-1}$	0.15	0.39	0.92		3.3	0.02	0.5	0.77	0.02	8
μ_p , $M^2 B^{-1} c^{-1}$	0.045	0.19	0.04		0.05	0.012	0.01	0.1	0.04	0.13

Таблица ПЗ

Эффективные массы электронов и дырок
для некоторых полупроводников

Материал	Эффективная масса электронов	Эффективная масса дырок
Si	1,08	0,56
Ge	0,55	0,37
GaAs	0,067	0,45
InSb	0,013	0,6
ZnSe	0,17	1,44
ZnO	0,19	1,44
AlAs	0,15	0,4
InAs	0,026	0,82
GaP	0,13	0,56
InP	0,072	1,0
GaSb	0,046	0,71
AlSb	0,011	1,3

Эффективные массы электронов и дырок приведены в m/m_0 , где m_0 - масса покоя электрона, $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

В табл. ПЗ приведены эффективные массы электронов у дна зоны проводимости. Приведенные в литературе данные об эффективных массах электронов и дырок значительно расходятся между собой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранский П.И. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов [Текст]: справочник / П.И. Баранский, В.П. Клочков, И. В. Потыкевич. - Киев: Наукова думка, 1975. - 704 с.
2. Berger L. I. Semiconductor Materials [Текст] / L. I. Berger. - CRC Press, 1996. - 496 с.

3. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника [Текст] / О.Н. Ермаков. - М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
4. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника [Текст]: учеб. пособ. / А.Н. Игнатов. - СПб.: Лань, 2011. - 544 с.
5. Мартинес-Дуарт Дж.М. Нанотехнологии для микро - и оптоэлектроники [Текст] / Дж.М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. - М.: Техносфера, 2007. – 368 с.
6. Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур [Текст]: учеб. пособ. / А.В. Федоров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 195 с.
7. Щука А.А. Наноэлектроника [Текст] / А.А. Щука. - М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
Лабораторная работа № 1	3
Лабораторная работа № 2	18
Лабораторная работа № 3	32
Лабораторная работа № 4	38
Приложение	56
Библиографический список	59

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Оптоэлектронные микро- и наноструктуры»
для студентов направления подготовки
11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
(магистерская программа «Приборы и устройства
в микро- и наноэлектронике»)
очной формы обучения

Составитель
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 25.03.2016
Уч.-изд. л. 3,7.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14