



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физический факультет

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Твердотельная электроника

Кафедра физической электроники

Образовательная программа
11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

Профиль подготовки:
Физическая электроника

Уровень высшего образования:
Магистратура

Форма обучения:
Очная

Статус дисциплины:
Вариативная

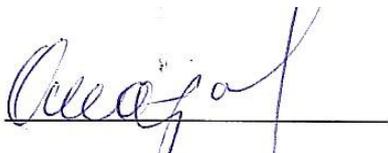
Рабочая программа дисциплины Твердотельная электроника составлена в 2018 году в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04. –Электроника и наноэлектроника (уровень магистратуры) от 30 октября 2015 г. № 1407.

Разработчик: кафедра физической электроники,

к.ф.-м.н., доцент Исмаилов А.М. 

Рабочая программа дисциплины одобрена: на заседании кафедры физической электроники от «18» июня 2018г., протокол № 11

Зав.кафедрой



Омаров О.А.

на заседании Методической комиссии физического факультета от «29» июня 2018г., протокол № 11.

Председатель



Мурлиева Ж.Х.

Рабочая программа дисциплины согласована с учебно-методическим управлением «30» июня 2018 г.

Начальник УМУ



Гасангаджиева А.Г

Аннотация рабочей программы дисциплины

Дисциплина «Твердотельная электроника» входит в вариативную часть образовательной программы магистратуры, по направлению подготовки 11.04.04. – Электроника и наноэлектроника. Дисциплина реализуется на физическом факультете кафедрой физической электроники.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с физической процессов, протекающих в твердотельных электронных элементах и устройствах, применяемых в промышленной и медицинской электронике, в технике радиосвязи и физическом эксперименте. Изучаются принципы действия и функционирования твердотельных электронных приборов: диодов, МДП-структур, варисторов, полевых транзисторов, полупроводниковых датчиков (сенсоров).

Дисциплина нацелена на формирование компетенций выпускника: ОПК-1, ПК-4, ПК-6, ПК-19.

Преподавание дисциплины предусматривает проведение следующих видов учебных занятий: *лекции, практические занятия, самостоятельная работа*.

Рабочая программа дисциплины предусматривает проведение следующих видов контроля успеваемости: *контрольные работы, курсовые работы, устный опрос, итоговый контроль в форме зачета*.

Объем дисциплины - 2 зачетные единицы, в том числе в академических часах по видам учебных занятий

Семестр	Учебные занятия							Форма промежуточной аттестации (зачет, дифференцированный зачет, экзамен)	
	в том числе:								
	всего	Контактная работа обучающихся с преподавателем					СРС, в том числе экзамен		
		всего	из них						
		Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	КСР	консультации			
10	72	32	10	-	22	-	-	40	зачет

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Твердотельная электроника» является теоретическая и практическая подготовка магистров в области твердотельной (полупроводниковой) электроники, знание которой необходимо при конструировании, производстве и эксплуатации электронных приборов и устройств промышленной электроники.

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- получение магистрами знаний об основных физических процессах и явлениях, происходящих в полупроводниках и полупроводниковых структурах;
- приобретение магистрами необходимых сведений и знаний об измерениях и анализе характеристик и параметров полупроводников и полупроводниковых элементов;

- применение полученных знаний магистрами при решении практических задач по применению электронных средств.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП магистратуры

Дисциплина *«Твердотельная электроника»* входит в вариативную часть образовательной программы магистратуры по направлению 11.04.04-*«Электроника и наноэлектроника»*.

Дисциплина *«Твердотельная электроника»* относится к профессиональному циклу магистратуры по программе *«Физическая электроника»*, направленной на изучение физических основ работы полупроводниковых приборов и элементов, которые являются основой современной микроэлектроники, с целью выработки умений и навыков их использования в профессиональной деятельности.

Твердотельная электроника - раздел электроники, изучающий физические принципы работы, функциональные возможности электронных приборов, в которых движение электронов или иных носителей заряда, обуславливающих электрический ток, происходит в объёме твёрдого тела. В ней изучаются явления переноса в твердых телах, явления на контактах металл - полупроводник и металл - диэлектрик - полупроводник (МДП); электронно - дырочный переход; изотипные и анизотипные гетеропереходы; полупроводниковые диоды, полевые транзисторы с управляющим переходом, полупроводниковые излучатели и фотоприемники, полупроводниковые датчики, сенсорные устройства и преобразователи, принцип действия и характеристики указанных приборов.

Дисциплина *«Твердотельная электроника»* логически и содержательно-методически связана с такими дисциплинами как *«Физика конденсированного состояния»*, *«Физика полупроводников и полупроводниковых приборов»*, *«Физические основы микроэлектроники»*, *«Контактные явления»* и др.

Дисциплина связана с предшествующими ей курсами математики и физики. А именно, требует знания разделов: *дифференциальное и интегральное исчисление, дифференциальные уравнения, теория вероятностей, уравнения математической физики, электричество и магнетизм, основы квантовой механики и статистической физики*. К «входным» знаниям можно отнести также вопросы *«Кристаллографии»*, *«Зонной теории твердого тела»*, *«Статистика носителей заряда в полупроводниках»* и др.

Данная дисциплина является основой для изучения последующих дисциплин: *физические основы микро- и наноэлектроники, опто- и фотоэлектроники, основы микропроцессорной техники* и др.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (перечень планируемых результатов обучения).

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способность понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения.	Магистр должен знать: - методы планирования при выполнении поставленных задач. уметь: - ставить цели. владеть: - организаторскими способностями.
ПК-4	Способность к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.	Знать: - сущность эксперимента; эффективные методики проведения экспериментального исследования. - Уметь: грамотно подобрать необходимые приборы и установки для проведения экспериментальных исследований. - Владеть: способностью аргументировать, выбирать и реализовывать на практике эффективную методику проведения экспериментальных исследований.
ПК-6	Способность анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников.	Знать: - особенности работы с научной литературой; основы патентования. Уметь: - аргументировано использовать результаты научно-технической информации, полученной из разных источников; грамотно оформлять результаты работы. Владеть: - механизмом отбора необходимой информации; навыком анализа полученной информации, ее систематизации при выполнении конкретных задач в изучаемой области.
ПК-19	Способность овладеть навыками разработки учебно-методических материалов для студентов по отдельным видам учебных занятий	Знать: - в совершенстве теоретические основы дисциплины, по которой проводятся занятия, современную литературу по тематике дисциплины. Уметь: - разрабатывать методические указания для студентов по организации изучения дисциплины, придумывать темы рас-

		<p>четных заданий, заданий для самостоятельной работы студентов, генерировать темы проектов, кейсов, рефератов, дидактических материалов для самоконтроля, текущего контроля знаний и промежуточной аттестации;</p> <p>- использовать в процессе обучения инновации, например составление хрестоматии (электронная библиотека дисциплины), глоссария и иные элементы.</p> <p>Владеть:</p> <p>- базовыми навыками чтения лекций, проведения лабораторных и практических занятий со студентами.</p>
--	--	--

4. Объем, структура и содержание дисциплины.

4.1. Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

4.2. Структура дисциплины.

№ п/п	Разделы и темы дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Контроль самост. раб.		
Модуль 1. Физические основы твердотельной электроники									
1	Основы зонной теории твердых тел.	10		1	2			4	Устный опрос
2	Статистика равновесных и неравновесных носителей в полупроводниках.	10		1	2			2	Устный опрос
3	Поверхность твердого тела, эффект поля.	10		1	2			2	Устный опрос
4	Явления на контакте «металл-полупроводник».	10		1	2			4	Устный опрос
5	Электронно-дырочный переход.	10		1	2			4	Устный опрос
6	Полупроводниковые гетеропереходы.	10		1				4	Устный опрос
<i>Итого по модулю 1</i>				6	10			20	Контрольная работа, коллоквиум.
Модуль 2. Физические принципы работы полупроводниковых приборов									

7	Специальные типы диодов: выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные диоды, лавинно-пролетные.	10		1	4			4	Устный опрос
8	Полупроводниковые фотоприемники.	10		1	2			4	Устный опрос
9	Фотовольтаические элементы (солнечные элементы).	10			2			4	Устный опрос
10	Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры.	10		1	2			4	Устный опрос
11	Полевые транзисторы.	10		1	2			4	Устный опрос
<i>Итого по модулю 2:</i>				4	12			20	Контрольная работа, коллоквиум.
ИТОГО: 72 ч				10	22			40	Зачет

4.3. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам).

Модуль 1. Физические основы твердотельной электроники

Тема 1. Основы зонной теории твердых тел. Уравнение Шредингера для твердого тела. Одноэлектронное уравнение (волновая функция электрона в кристалле, теорема Блоха). Зоны Бриллюэна, эффективная масса электрона. Образование энергетических зон в твердом теле. Плотность состояний в энергетической зоне, дырки. Заполнение зон электронами и деление твердых тел на металлы, диэлектрики и полупроводники. Явления переноса в твердых телах (основные уравнения).

Тема 2. Статистика равновесных и неравновесных носителей в полупроводниках. Функция распределения Ферми-Дирака. Плотность состояний. Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике. Статистика электронов в примесных полупроводниках. Закон действующих масс. Сильно легированные полупроводники, компенсированные полупроводники. Неравновесные носители заряда, квазиуровни Ферми. Время жизни носителей, межзонная рекомбинация, рекомбинация через локальные уровни. Явление переноса носителей заряда в полупроводниках, дрейф и диффузия носителей заряда. Диффузионная длина, соотношение Эйнштейна, уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.

Тема 3. Поверхность твердого тела, эффект поля. Работа выхода электрона из металла и полупроводника. Поверхностные состояния, уровни Тамма. Структура энергетических зон у поверхности полупроводника. Быстрые и медленные состояния. Область пространственного заряда.

Тема 4. Явления на контакте «металл-полупроводник».

Термоэлектронная эмиссия. Возникновение контактного поля между металлом и полупроводником, контактная разность потенциалов. Механизмы формирования барьеров Шоттки (выпрямляющих контактов) и омических (невыпрямляющих) контактов металлов

с полупроводниками n- и p- типа проводимости. Диодная и диффузионная теории выпрямления на контакте «металл-полупроводник». Применение барьеров Шоттки и омических контактов «металл-полупроводник».

Тема 5. Электронно-дырочный переход. Методы получения p-n- перехода. Энергетическая диаграмма p-n- перехода при равновесии, высота потенциального барьера и контактная разность потенциалов. Законы распределения заряда, напряженности поля и потенциала на переходе. Процессы переноса носителей заряда через неравновесный p-n- переход. Инжекция и экстракция носителей заряда. Вольтамперные характеристики идеального и реального перехода. Ёмкостные свойства p-n- перехода.

Тема 6. Полупроводниковые гетеропереходы. Энергетические диаграммы изотипных и анизотипных гетеропереходов. Расчет идеальной зонной схемы по модели Андерсена. Механизмы токопрохождения через идеальные и реальные гетеропереходы. Особенности свойств ГП, технологические проблемы при изготовлении гетеропереходов. Электрические и оптические свойства гетеропереходов. Гетеропереходные фотоприемники и источники света. Перспективы использования гетеропереходов.

Модуль 2. Физические принципы работы полупроводниковых приборов.

Тема 7. Специальные типы диодов: выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные, лавинно-пролетные.

Явление накопления инжектированных носителей вблизи p-n- перехода и его использование для формирования импульсов, импульсный диод. Структура, принцип действия, параметры и характеристики варикапа. Параметры, характеристики и схема включения стабилитрона. Особенности ВАХ и механизмы токопереноса в туннельном диоде, объяснение их с помощью энергетической диаграммы. Пробой p-n- перехода, лавинный пробой, лавинно-пролетные диоды.

Тема 8. Полупроводниковые фотоприемники. Явление фотопроводимости: фоторезисторы. Фотогальванический эффект: фотодетектирование в структуре с p-n- переходом, p-i-n- фотодиод. Оптоэлектронная пара. Лавинный фотодиод, его применение для счета одиночных фотонов.

Тема 9. Фотовольтаические элементы (солнечные элементы). Фотовольтаический эффект на p-n-переходе: солнечные элементы (фотопреобразователь). Зависимость плотности фототока от интенсивности освещения. ВАХ идеального фотопреобразователя. Эквивалентная схема реального фотопреобразователя. КПД фотопреобразователя, перспективы и направления его увеличения. Материалы и современное состояние солнечной энергетики.

10. Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры. Излучательная и безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. Электрические свойства светоодиодов (ВАХ светодиода). Оптические характеристики светодиодов (спектр излучения, внутренний и внешний квантовый выход излучения, коэффициент полезного действия). Светодиоды инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра. Источники белого света на основе светодиодов. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Квантовые каскадные лазеры.

11. Полевые транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим p-n- переходом и со структурой металл - диэлектрик полупроводник, полевой транзистор с изолированным затвором. Основные параметры и характеристики полевых транзисторов. Расчет выходных статических и динамических характеристик, эквивалентная схема и частотные свойства. Применение полевых транзисторов в радиоэлектронных устройствах.

4.3.1. Наименование тем и содержание практических занятий

Название темы	Содержание темы	Объем в часах
Модуль 1. Физические основы твердотельной электроники		
Основы зонной теории твердых тел.	Образование энергетических зон в твердом теле. Плотность состояний в энергетической зоне, дырки. Заполнение зон электронами и деление твердых тел на металлы, диэлектрики и полупроводники.	2
Статистика равновесных и неравновесных носителей в полупроводниках.	Неравновесные носители заряда, квазиуровни Ферми. Время жизни носителей, межзонная рекомбинация, рекомбинация через локальные уровни.	2
Поверхность твердого тела, эффект поля.	Быстрые и медленные состояния. Область пространственного заряда.	2
Явления на контакте «металл-полупроводник».	Диодная и диффузионная теории выпрямления на контакте «металл-полупроводник». Применение барьеров Шоттки и омических контактов «металл-полупроводник».	2
Электронно-дырочный переход.	Процессы переноса носителей заряда через неравновесный р-п- переход. Инжекция и экстракция носителей заряда. Вольтамперные характеристики идеального и реального перехода. Ёмкостные свойства р-п- перехода.	2
Модуль 2. Физические принципы работы полупроводниковых приборов.		
Специальные типы диодов: выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные, лавинно-пролетные.	Параметры, характеристики и схема включения стабилитрона. Особенности ВАХ и механизмы токопереноса в туннельном диоде, объяснение их с помощью энергетической диаграммы.	4
Полупроводниковые фотоприемники.	Фотогальванический эффект: фотодетектирование в структуре с р-п-переходом, р-і-п- фотодиод. Оптоэлектронная пара. Лавинный фотодиод, его применение для счета одиночных фотонов.	2
Фотовольтаические элементы (солнечные элементы).	Эквивалентная схема реального фотопреобразователя. КПД фотопреобразователя, перспективы и направления его увеличения. Материалы и современное состояние солнечной энергетики.	2
Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры.	Оптические характеристики светодиодов (спектр излучения, внутренний и внешний квантовый выход излучения, коэффициент полезного действия). Светодиоды инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра. Источники белого света на основе светодиодов. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Квантовые каскадные лазеры.	2

Полевые транзисторы.	Основные параметры и характеристики полевых транзисторов. Расчет выходных статических и динамических характеристик, эквивалентная схема и частотные свойства. Применение полевых транзисторов в радиоэлектронных устройствах.	2
----------------------	---	---

5. Образовательные технологии.

1. Формы проведения занятий: лекции, практические занятия, контрольные работы, коллоквиумы, зачеты и экзамены.

2. Предусмотрено проведение проблемной лекции, лекции-дискуссии с приглашением сотрудников и специалистов Дагестанского научного центра РАН, занимающихся исследованиями электрофизических свойств полупроводников и контактных явлений в полупроводниках и имеющих большой опыт работы в данных направлениях.

3. По заранее согласованному графику (расписанию) во внеаудиторное время предусмотрено:

- посещение лаборатории «Физики полупроводников» Дагестанского научного центра РАН (лекция-беседа);

- посещение «Научно-исследовательской лаборатории физики тонких пленок» (физический факультет ДГУ) с целью ознакомления магистров с тонкопленочной технологией получения твердотельных структур (метод термовакуумного напыления, метод магнетронного распыления, метод химических транспортных реакций).

4. Лекционные демонстрации:

- лабораторные образцы: фоторезистор на основе ZnO, полевой транзистор на основе нитевидного кристалла (вискера) теллура, тонкопленочный p-n- переход n-ZnO/p-Si. По каждому образцу дается краткое описание технологии изготовления и основные его характеристики;

- оптоволоконный спектрофотометрический комплекс AvaSpec-ULS2048x64-USB2 (дифракционная решетка - 300 мм^{-1} , диапазон - 250-1160 нм, входная оптическая щель - 50 мкм, разрешение - 2,4 нм, 2048x64 пиксельный CCD детектор). Компактность данного комплекса позволяет прямо на столе размещать его в комплекте с измерительными ячейками и через мультимедийный проектор демонстрировать снятия спектров излучения светодиодов и полупроводниковых лазеров (коммерческих образцов, излучающих в разных спектральных областях – красной, синей, зеленой), спектров пропускания и поглощения (лабораторный образец ZnO/Al₂O₃). В качестве источника излучения используется AvaLight-DH-S-BAL - сбалансированный дейтериево-галогеновый источник света (200-2500 нм).

5. Электронограф ЭГ-75 («Научно-исследовательская лаборатория физики тонких пленок»). Демонстрация явления катодолюминесценции (образец: структура ZnO/Al₂O₃). Снятие спектров катодолюминесценции идет через смотровое окошко электронографа на спектрофотометр AvaSpec-ULS2048x64-USB2 по оптоволоконному кабелю.

6. Коллекция видеороликов из сети Интернет для самостоятельного просмотра

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы магистров.

Тему и объем самостоятельной работы магистрам определяется после проведения лекции и практического занятия по соответствующей теме. На самостоятельную работу

выносятся часть лекционного материала для более полного освоения. Например, вывод формул целесообразно перенести на самостоятельную работу, сэкономив время лекции для охвата вопросов общего характера. На самостоятельную работу также выносятся и материал, которого не успели охватить на практических занятиях. В связи с этим и не сформулированы заранее темы для самостоятельной работы.

Самостоятельная работа магистров включает:

- проработка учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе) и подготовка докладов на практических занятиях;
- поиск и обзор научных публикаций и электронных источников по тематике дисциплины;
- выполнение рефератов;
- работа с тестами и вопросами для самопроверки.

Промежуточный контроль.

В течение семестра студенты выполняют:

- домашние задания, выполнение которых контролируется и при необходимости обсуждается на практических занятиях;
- промежуточные контрольные работы во время практических занятий для выявления степени усвоения пройденного материала;
- итоговую контрольную работу по решению задач, охватывающих базовые вопросы курса: в конце семестра.

Итоговый контроль.

Зачет в конце семестра, включающий проверку теоретических знаний и умений решения задач по всему пройденному материалу, защита реферата.

7. Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы.

Код компетенции из ФГОС ВО	Наименование компетенции из ФГОС ВО	Планируемые результаты обучения	Процедура освоения
ОПК-1	Способность понимать основные проблемы в своей предметной области, выбирать методы и средства их решения.	Знать: методы планирования при выполнении поставленных задач. Уметь: ставить цели. Владеть: организаторскими способностями.	Устный опрос, письменный опрос.
ПК-4	Способность к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.	Знать: - сущность эксперимента; эффективные методики проведения экспериментального исследования. Уметь: - грамотно подобрать необходимые приборы и установки для проведения экспериментальных исследований. Владеть: - способностью аргументировать, выбирать и реализовывать на прак-	Устный опрос, письменный опрос.

		тике эффективную методику проведения экспериментальных исследований.	
ПК-6	Способность анализировать состояние научно-технической проблемы путем подбора, изучения и анализа литературных и патентных источников.	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - особенности работы с научной литературой; основы патентоведения. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - аргументировано использовать результаты научно-технической информации, полученной из разных источников; грамотно оформлять результаты работы. <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - механизмом отбора необходимой информации; навыком анализа полученной информации, ее систематизации при выполнении конкретных задач в изучаемой области. 	Устный опрос, письменный опрос.
ПК-19	Способность овладевать навыками разработки учебно-методических материалов для студентов по отдельным видам учебных занятий.	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - в совершенстве теоретические основы дисциплины, по которой проводятся занятия, современную литературу по тематике дисциплины. <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - разрабатывать методические указания для студентов по организации изучения дисциплины, придумывать темы расчетных заданий, заданий для самостоятельной работы студентов, генерировать темы проектов, кейсов, рефератов, дидактических материалов для самоконтроля, текущего контроля знаний и промежуточной аттестации; - использовать в процессе обучения инновации, например составление хрестоматии (электронная библиотека дисциплины), глоссария и иные элементы. <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - базовыми навыками чтения лекций, проведения лабораторных и практических занятий со студентами. 	Устный опрос, письменный опрос.

7.2. Типовые контрольные задания

7.2.1. Задачи к модулю 1.

1. Электропроводность образца собственного кремния при температуре 300 К равна σ Ом⁻¹·м⁻¹. Подвижность электронов и дырок в кремнии при 300К равна 0,135 и 0,048 (м²/(В·с)). Определить концентрацию собственных носителей (n_i). Если через образец проходит ток, то какая часть этого тока обусловлена электронами?

2. Образец кремния легирован донорной примесью до концентрации $N_d = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и при температуре 300 К имеет электронную проводимость $\sigma = 4.3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Нужно определить концентрацию дырок в образце, и какая часть тока в этих условиях переносится электронами. Подвижность носителей считать неизменной.

3. Подвижность электронов и дырок в образце полупроводника собственной проводимости составляют μ_n и μ_p ($\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), концентрация собственных носителей n_i (м^{-3}), площадь поперечного сечения образца S (м^2). Определить скорости дрейфа электронов и дырок, электропроводность образца и полный дрейфовый ток, если в образце создано электрическое поле напряженностью E . $\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,025 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $n_i = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $S = 0,03 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $E = 400 \text{ В/м}$.

4. Образец примесного полупроводника р-типа с размерами: длиной l , толщиной d и шириной a имеет сопротивление R , измеренное между торцами наименьшего сечения. Подвижности электронов и дырок равны μ_n и μ_p , соответственно, а концентрация собственных носителей n_i . Определить в образце концентрацию основных и неосновных носителей заряда и отношение электронной проводимости к дырочной, если, $l = 5 \text{ мм}$, $d = 1 \text{ мм}$, $a = 2 \text{ мм}$, $R = 100$, $\mu_n = 0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,025 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $n_i = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

5. Сравнить концентрации электронов в собственном германии и кремнии при температурах T_1 и T_2 . Считать, что эффективные плотности состояний N_c и N_v не зависят от температуры. Ширину запрещенной зоны в германии и кремнии принять равной 0,7 и 1,1 эВ, соответственно. Вычислить значения удельных проводимостей при указанных температурах. Удельное сопротивление чистых образцов при комнатной температуре 290К принять равными 0,5 и 1000 Ом·м соответственно. $T_1 = 50^\circ\text{C}$, $T_2 = 100^\circ\text{C}$.

6. Пластина из германия n-типа имеет удельное сопротивление ρ (Ом·см) и ширину d (см). К пластине приложена разность потенциалов U (В). Подвижность электронов и дырок равны $\mu_n = 3900$ ($\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), $\mu_p = 1900$ ($\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), а концентрация собственных носителей равна $n_i = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Определить: плотность тока через образец, концентрацию электронов и дырок, отношение электронной проводимости к дырочной, если $\rho = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $d = 10^{-2} \text{ см}$, $U = 1 \text{ В}$.

7. Вычислите дифференциальное сопротивление тонкого р-п-перехода при температуре 20 °С, прямом напряжении смещения U (В), площади поперечного сечения S (м^2) и плотности теплового тока j_0 (А/м^2). $U = 0,1 \text{ В}$, $S = 10^{-6} \text{ м}^2$, $j_0 = 1 \text{ А/м}^2$.

8. Дан образец кремния, в котором сформирован р-п-переход. Удельное сопротивление дырочной и электронной областей равно ρ_n и ρ_p (Ом·см), подвижности электронов и дырок, соответственно, равны μ_n и μ_p ($\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$), а концентрация собственных носителей - n_i (см^{-3}). Определите, чему равен потенциальный барьер при комнатной температуре 290К, если $\rho_p = 0,013 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\rho_n = 44,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\mu_n = 1400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 480 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

9. Определите, как уменьшится барьерная емкость диода с резким переходом при увеличении модуля напряжения смещения на величину $\Delta U(B)$, если известно, что при $U=X(B)$ $C_{бар} = Y(n\Phi)$. $\Delta U = 1 В$, $X = 5 В$, $Y = 20 нФ$.

10. Дан кремниевый диод со следующими параметрами: концентрация собственных носителей $1,48 \cdot 10^{16} (м^{-3})$, подвижности электронов и дырок $\mu_n = 0,05 (м^2 / (В \cdot с))$, $\mu_p = 0,03 (м^2 / (В \cdot с))$, температура 300К. Определить связь между током и напряжением, считая p-n-переход идеальным, при следующих значениях концентрации примесей (N_d и N_a) и временем жизни носителей ($\tau_n = \tau_p = \tau$). $N_d = 9 \cdot 10^{22} м^{-3}$, $N_a = 2 \cdot 10^{22} м^{-3}$, $\tau = 1 мкс$.

11. Удельное сопротивление собственного германия при комнатной температуре $\rho = 47 Ом \cdot см$, подвижность электронов $\mu_n = 3900 см / (В \cdot с)$, подвижность дырок $\mu_p = 1900 см^2 / (В \cdot с)$. Найти концентрацию собственных носителей заряда. Какую нужно ввести концентрацию доноров, чтобы удельное сопротивление полупроводника снизилось до величины $20 Ом \cdot см$?

12. Оценить среднюю длину свободного пробега электронов в арсениде галлия при $T = 300 К$, если их эффективная масса $m_n = 0,07 m_0$, а подвижность $\mu_n = 0,85 м^2 / (В \cdot с)$.

13. Концентрация носителей заряда в n-германии в температурном диапазоне от -120 до $+30^\circ C$ постоянна, а подвижность электронов изменяется по закону $\mu = \mu_0 T^{-3/2}$. Вычислить во сколько раз изменится электропроводность германия в этом диапазоне температур.

14. Удельное сопротивление антимида индия с концентрацией дырок $p = 10^{23} м^{-3}$ при $T = 300 К$ составляет $3,5 \cdot 10^{-4} Ом \cdot м$, собственная концентрация $n_i = 2 \cdot 10^{22} м^{-3}$. Определить подвижность электронов и дырок, если их отношение $\mu_n / \mu_p = 40$.

15. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны $E_g = 0,665 эВ$, а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны: $m_v = 0,388 m_0$; $m_c = 0,55 m_0$, где m_0 - масса свободного электрона.

16. Вычислить собственное удельное сопротивление арсенида галлия при температурах 300 и 500 К, если температурные изменения подвижности $\mu_n = 0,85 (T/300)^{-2}$, $\mu_p = 0,045 (T/300)^{-2,5}$.

17. Определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня, расположенного на 10 кТ выше уровня Ферми. Как изменится вероятность заполнения этого уровня электронами, если температуру увеличить в 2 раза ?

18. Определить, какая концентрация атомов акцепторной примеси требуется для получения арсенида галлия с удельной проводимостью $10 мСм/см$ при комнатной температуре. Каково при этом отношение атомов акцепторной примеси к числу атомов галлия?.

19. Определить, на сколько различаются вероятности заполнения электронами нижнего уровня зоны проводимости в собственном германии и собственном кремнии: а) при 300 К; б) при 100 К.

20. Сравнить относительные изменения удельных проводимостей меди и собственного германия при повышении температуры от 20 до 21 $^\circ C$.

21. Определить положение уровня Ферми при 300 К в кристаллах германия, легированных мышьяком до концентрации 10^{23} м^{-3} .
22. Определить энергию ионизации доноров в кремнии n-типа, если концентрация электронов $n_1 = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ при температуре $T_1 = 50 \text{ К}$ и $n_2 = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ при температуре $T_2 = 28 \text{ К}$.
23. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при $T = 300 \text{ К}$, если ширина его запрещенной зоны $E_g = 1,12 \text{ эВ}$, а эффективные массы плотности состояний $m_v = 0,56 m_0$; $m_c = 1,05 m_0$.
24. На сколько увеличится удельная проводимость антимонида индия с собственной электропроводностью при изменении температуры от 20 до 21 °С, если ширина запрещенной зоны $E_g = 0,172 \text{ эВ}$, а подвижность электронов и дырок изменяется по закону $T^{-3/2}$. Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $b = -2,8 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$.
25. Определить положение уровня Ферми и концентрацию неосновных носителей заряда при $T = 400 \text{ К}$ в кремнии, легированном бором до концентрации 10 м^{-3} . $A E_g = 1,12 \text{ эВ}$, $m_v = 0,56 m_0$, $m_c = 1,05 m_0$.
26. На сколько увеличится удельная проводимость германия с собственной электропроводностью при изменении температуры от 20 до 21 °С, если температурная зависимость ширины запрещенной зоны имеет вид $E_g(T) = 0,782 - 3,9 \cdot 10^{-4} T$.
27. Уровень Ферми в кремнии при 300 К расположен на 0,2 эВ ниже дна зоны проводимости. Рассчитать равновесную концентрацию электронов и дырок, если $E_g = 1,12 \text{ эВ}$, $m_v = 0,56 m_0$, $m_c = 1,05 m_0$.
28. Рассчитать удельное сопротивление кристаллов арсенида галлия, легированного хромом до концентрации $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ при температуре 300 К, если энергия ионизации атомов хрома $\Delta E_a = 790 \text{ мэВ}$, а подвижность дырок принять равной $0,48 \mu_e$.
29. Уровень Ферми в германии при 300 К расположен на 0,1 эВ выше потолка валентной зоны. Рассчитать равновесную концентрацию электронов и дырок в материале, если $\Delta E_g = 0,665 \text{ эВ}$, $m_n = 0,388 m_0$, $m_p = 0,55 m_0$.
30. Через пластину кремния с удельным сопротивлением $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ проходит электрический ток плотностью 10 мА/мм^2 . Найти средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности $0,14$ и $0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ соответственно.

Задачи к модулю 2.

1. Если к резкому p-n- переходу приложить переменное напряжение с амплитудой 0,5 В, то максимальная емкость перехода равна 2 пФ. Определить контактную разность потенциалов и минимальное значение емкости перехода, если при отсутствии внешнего напряжения она равна 1 пФ.
2. Барьерная емкость резкого p-n- перехода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы она уменьшилась до 50 пФ, если $\phi_k = 0,82 \text{ В}$?
3. Какое напряжение необходимо приложить к p-n- переходу при $T = 300 \text{ К}$, чтобы прямой ток через него был равен обратному току насыщения J_S ? При каком прямом напряжении прямой ток $J_{пр} = 100 J_S$?
4. Обратный ток насыщения I_0 германиевого p-n- перехода площадью $S = 1 \text{ мм}^2$ при $T = 300 \text{ К}$ равен 10 мкА. Полагая, что ток обусловлен только электронами, вычислить диффузионную длину электронов L_n в p- области. Уровень Ферми в p- области лежит на 0,5 эВ ниже дна зоны проводимости, подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

5. Обратный ток насыщения I_0 р-п- перехода при $T = 300$ К равен 10^{-14} А. При повышении температуры до 125 °С обратный ток насыщения увеличивается в 10^5 раз. Определить напряжение на переходе при комнатной температуре и температуре 125 °С, если прямой ток $I = 1$ мА.

6. Удельное сопротивление р- области кремниевого р-п- перехода $\rho_p = 10^{-4}$ Ом · м и удельное сопротивление п- области $\rho_n = 10^{-2}$ Ом · м. Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равны $0,13$ и $0,05$ м²/(В·с). Вычислить контактную разность потенциалов в переходе при температуре $T = 300$ К, если собственная концентрация $n_i = 1,38 \cdot 10^{16}$ м⁻³.

7. Вычислить барьерную емкость резкого р- п- перехода, полученного в стержне арсенида галлия площадью сечения $S = 1$ мм². Ширина области объемного заряда равна $2 \cdot 10^{-4}$ см. Относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника $13,1$.

8. Изобразить пространственное распределение зарядов и энергетические диаграммы симметричного резкого р-п-перехода для случаев: а) внешнее напряжение отсутствует; б) прямое смещение перехода; в) обратное смещение перехода. Укажите направление диффузионного электрического поля и высоту потенциального барьера р-п-перехода.

9. Равновесная высота потенциального барьера р-п- перехода равна $0,2$ В, концентрация акцепторных примесей $N_a = 3 \cdot 10^{14}$ см⁻³ в р-области, концентрация доноров в п-области много больше. Найти барьерную емкость перехода при $U_0,1$ и 10 В, если площадь перехода 1 мм².

10. Высота потенциального барьера р- п- перехода при равновесии равна $0,2$ В, концентрация акцепторных примесей $N = 3 \cdot 10^{14}$ см⁻³ в р- области, концентрация доноров в п- области много больше. Найти ширину области объемного заряда р-п- перехода при $U_0,1$ и 10 В, если площадь перехода 1 мм². Чему она будет равна при прямом напряжении $0,1$ В?

11. Для резкого несимметричного р-п- перехода при $N_D = 2N_a$ построить распределение концентрации примесей N_x , плотности объемного заряда Q , градиента потенциала $d\phi/dx$ и потенциала ϕ вдоль координаты x , перпендикулярной границе р-п- перехода.

12. В кремниевом резком р-п- переходе п-область имеет удельное сопротивление $\rho_n = 5$ Ом см., время жизни неосновных носителей заряда в ней $\tau_p = 1$ мкс; для р- области $\rho_p = 0,1$ Ом см; $\tau_n = 5$ мкс. Найти отношение дырочной составляющей тока к электронной. Определить плотность прямого тока при $0,3$ В.

13. В кремниевом резком р- п - переходе с концентрациями примесей $N_a = 10^{20}$ м⁻³ и $N_D = 10^{22}$ м⁻³ лавинный пробой наступает при напряженности $6 \cdot 10^7$ В/м. Вычислить ширину р-п- перехода и обратное напряжение, необходимое для начала пробоя. Относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника $\epsilon = 12$.

14. Концентрация доноров и акцепторов в п- и р- областях резкого р-п- перехода соответственно равна $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и 10^{17} см⁻³. Определить контактную разность потенциалов и плотность обратного тока насыщения, полагая, что при комнатной температуре коэффициенты диффузии для неосновных электронов и дырок составляют 100 и 50 см²/с соответственно, а диффузионная длина $L_n = L_p = 0,8$ см. Собственная концентрация носителей $n_i = 10^{13}$ см⁻³.

15. Кремниевый р-п- переход имеет площадь поперечного сечения $S = 1$ мм² и барьерную емкость $C_{бар} = 300$ пФ при обратном напряжении $U_{обр} = 10$ В. Определить максимальную напряженность электрического поля в области объемного заряда. Как изменится емкость, если $U_{обр}$ увеличить в два раза? Относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\epsilon = 12$.

16. Обратный ток насыщения контакта металл - полупроводник с барьером Шоттки $I_0 = 2$ мкА. Контакт соединен последовательно с резистором и источником постоянного

напряжения $U_{\text{ист}} = 0,2$ В. Определить сопротивление резистора R , если падение напряжения на нем $U_R = 0,1$ В, температура $T = 300$ К.

17. На поверхности кремния р- типа существует обедненный слой, причем концентрация электронов считается пренебрежимо малой. Найти толщину области объемного заряда при 300 К, если величина поверхностного потенциала $\psi_s = 0,25$ В, а концентрация мелких ионизованных акцепторов в объеме $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

18. Найти поверхностный потенциал для собственного германия при комнатной температуре, если концентрация адсорбированной на его поверхности донорной примеси $N_D = 10^9 \text{ см}^{-2}$. Считать доноры полностью ионизованными, $n_i = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\epsilon = 16$, $e\phi/kT \ll 1$.

19. Вычислить поверхностный потенциал для кремния n-типа, если на поверхности адсорбированы доноры, концентрация которых $= 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Считать все доноры ионизованными, $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $v = 12$, $e\phi/kT \gg 1$, $T = 300$ К.

20. Вычислить плотность заряда на поверхности германия n-типа, если изгиб зон на поверхности составляет $e\phi_s = 10$ кТ; $T = 300$ К, $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $v = 16$. Определить концентрацию акцепторных уровней, создающих этот заряд, считая акцепторы полностью ионизованными.

21. Лавинный пробой в кремниевом диоде наступает, когда напряженность электронного поля достигает, примерно, 250 кВ/см . Вычислите напряжение пробоя при следующих данных: концентрации примесей (N_d и N_a) и протяженности р-п-перехода $W = 90 \text{ мкм}$, $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

7.2.2 Итоговый контроль (вопросы к зачету)

Модуль 1

1. Образование энергетических зон в кристалле, разрешенные и запрещенные зоны энергий. Валентная зона и зона проводимости.
2. Характер заполнения электронами энергетических зон в металле и полупроводнике и диэлектрике.
3. Собственные и примесные полупроводники, доноры и акцепторы.
4. Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках.
5. Элементы статистики электронов и дырок в полупроводниках. Распределение плотности состояний и концентрации электронов по энергиям.
6. Концентрация и подвижность носителей заряда в полупроводниках, их температурная зависимость.
7. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Графики зависимостей $n_i(T)$ и $\ln n_i = f(1/T)$, определение энергии активации полупроводника по температурной зависимости электропроводности.
8. Закон действующих масс, концентрации основных и неосновных носителей заряда в полупроводнике, зависимость их от ширины запрещенной зоны полупроводника, уровня легирования и температуры.
9. Потенциальный барьер у поверхности кристалла и работа выхода электронов, причины их появления. Влияние состояния поверхности твердого тела на величину работы выхода электрона.
10. Неравновесные носители заряда, квазиуровни Ферми.
11. Механизмы генерации, рекомбинации и время жизни неравновесных носителей заряда, уровни ловушек захвата, рекомбинации.
12. Температурная зависимость уровня Ферми и времени жизни.
13. Явление переноса носителей заряда в полупроводниках, дрейф и диффузия носителей заряда. Диффузионная длина, соотношение Эйнштейна.
14. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.

15. Распределение носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника, поверхностные уровни и поверхностные состояния, быстрые и медленные состояния и их роль в контактных явлениях.
16. Изгиб зон на поверхности твердого тела. Эффект поля, его измерение и применение.
17. Работа выхода электронов из металла и из полупроводника, термоэлектронная эмиссия.
18. Возникновение контактного поля между металлом и полупроводником, контактная разность потенциалов. Механизмы формирования барьеров Шоттки (выпрямляющих контактов).
19. Механизмы формирования омических (невыпрямляющих) контактов металлов с полупроводниками n- и p- типа проводимости.
20. Методы получения p-n- перехода. Энергетическая диаграмма p-n-перехода при равновесии, высота потенциального барьера и контактная разность потенциалов.
21. Законы распределения заряда, напряженности поля и потенциала на p-n- переходе.
22. Процессы переноса носителей заряда через равновесный p-n- переход, диффузионные и дрейфовые токи. Классификация электронно-дырочных переходов.
23. Процессы переноса носителей заряда через неравновесный p-n- переход, инжекция и экстракция носителей заряда.
24. Вольтамперные характеристики идеального и реального перехода, токи генерации и рекомбинации. Ёмкостные свойства p-n- перехода.
25. Энергетические диаграммы изотипных и анизотипных гетеропереходов. Расчет идеальной зонной схемы по модели Андерсена.
26. Механизмы токопрохождения через идеальные и реальные гетеропереходы. Особенности свойств гетеропереходов.
27. Технологические проблемы при изготовлении гетеропереходов. Перспективы использования гетеропереходов.
28. Механизмы лавинного, туннельного и теплового пробоев и их особенности. Влияние состояния поверхности полупроводника на обратный ток и процессы пробоя p-n – перехода.

Модуль 2.

29. Технология изготовления и конструкции диодов. Классификация, маркировка и условные обозначения диодов. Параметры диода.
30. Выпрямительные германиевые и кремниевые диоды и их особенности и характеристики.
31. Особенности импульсных, высокочастотных и СВЧ- диодов.
32. Эквивалентные схемы, электрические свойства, параметры и характеристики импульсных, высокочастотных и СВЧ- диодов.
33. Отличие диффузионного p-n – перехода от сплавного, явление накопления инжектированных носителей вблизи p - n – перехода и его использование для формирования импульсов.
34. Структура, принцип действия, параметры и характеристики варикапа.
35. Параметры, характеристики и схема включения стабилитрона.
36. Особенности ВАХ и механизмы токопереноса в туннельном диоде, объяснение их с помощью энергетической диаграммы.
37. Внутренний фотоэффект и фотопроводимость полупроводников.

38. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Закон нарастания и спада неравновесной концентрации.
39. Влияние света на p-n-переход, вольтамперные, световые и спектральные характеристики фотодиодов.
40. Нагрузочные характеристики и эффективность преобразования фотогальванических элементов.
41. Инжекционная электролюминесценция, коэффициент инжекции.
42. Параметры светодиода. Внутренний и внешний квантовые выходы и КПД светодиода.
43. Характеристики светодиода: вольтамперная, излучательная и спектральная.
44. Технология получения и материалы для светодиодов.
45. Инверсная населенность и способы его создания. Основные характеристики и параметры лазеров.
46. Принцип действия лазера. Конструкция и технология изготовления инжекционных лазеров.
47. Материалы для лазеров, структура энергетических зон полупроводника, прямозонные полупроводники.

7.2.3. Перечень вопросов для проверки остаточных знаний

1. В чем различие между электронами проводимости и свободными?
2. Что такое разрешенные и запрещенные энергетические зоны, ширина запрещенной зоны?
3. Что характеризует уровень Ферми и собственный полупроводник?
4. Чему равно произведение концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике при термодинамическом равновесии?
5. Что такое подвижность носителей заряда? Почему подвижность электронов больше подвижности дырок?
6. Объясните механизмы электропроводности собственных и примесных полупроводников.
7. Какими формулами определяются концентрации свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне?
8. Как определяются эффективная плотность состояний в зоне проводимости и в валентной зоне?
9. Как меняется положение уровня Ферми в примесном полупроводнике от температуры?
10. Какими физическими факторами объясняется температурная зависимость подвижности носителей заряда?
11. Какой вид имеют графики зависимости логарифма концентрации носителей от обратной температуры для различных значений концентрации примеси?
12. Какие процессы называются диффузией и дрейфом носителей заряда?
13. Что такое диффузионная длина и длина свободного пробега носителей заряда?
14. Как изменяется ширина запрещенной зоны полупроводника при изменении температуры?
15. Почему при контакте двух полупроводников разного типа проводимости начинается процесс диффузии основных носителей заряда?
16. Чем определяется высота потенциального барьера на границе контакта двух полупроводников?
17. Что является причиной возникновения дрейфовых токов при контакте двух полупроводников?

18. Почему удельное сопротивление р-п- перехода значительно больше, чем у контактирующих полупроводников?
19. Как изменяется удельное сопротивление р- п - перехода при подаче на него внешнего напряжения в прямом и обратном направлении?
20. Какие процессы называются инжекцией и экстракцией неосновных носителей заряда?
21. Как распределяется напряженности электрического поля и потенциалы в резком и плавном р- п-переходах?
22. Как изменяется толщина р- п - перехода при подаче на него внешнего напряжения в прямом и обратном направлении?
23. Что такое барьерная емкость р- п - перехода?
24. В каких условиях контакт металл-полупроводник будет выпрямляющим?
25. Как построить энергетическую диаграмму гетероперехода?
26. Постройте качественную картину зонных схем изотипного и анизотипного гетеропереходов.
27. Какими основными преимуществами обладают гетеропереходы?
28. Чем отличаются вольтамперные характеристики диодов с толстой и тонкой базами?
29. Что такое диффузионная емкость диода?
30. Как изобразить графически распределение концентрации доноров и акцепторов, распределение концентрации основных и неосновных носителей заряда и распределение плотности объемного заряда в несимметричном резком р-п- переходе?
31. Нарисовать равновесную зонную схему р- п -перехода и изменения напряженности поля и потенциала в переходе.
32. Какой вид имеет зонная схема при прямом и обратном включении р -п- перехода?
33. Как определяется толщина резкого р- п перехода, каким выражением определяется вольт-амперная характеристика тонкого р- п - перехода?
34. Каким выражением определяется плотность тока насыщения в тонком р-п- переходе?
35. Каковы особенности теплового, лавинного и туннельного пробоя ?
36. В чем состоят основные отличия свойств и параметров кремниевых и германиевых выпрямительных диодов?
37. Каков принцип действия стабилитронов и стабисторов?
38. Каков принцип действия туннельных диодов?
39. Каким образом в транзисторе происходит усиление электрических колебаний по мощности?
40. Почему транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, может обеспечить усиление по току?
41. Как объяснить вид входных и выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой и общим эмиттером?
42. Какие факторы определяют инерционность транзистора при его работе на высоких частотах?
43. Какие существуют эквивалентные схемы транзистора?
44. Каковы структура и вид вольт- амперной характеристики тиристора? Виды тиристоров, способы их переключения и параметры.
45. Параметры, характеризующие основные свойства полевых транзисторов. Как можно объяснить усиление по мощности в схеме с полевым транзистором?
46. Какие отличия существуют в структуре МДП- транзисторов с индуцированным и встроенным каналами?
47. Каков принцип действия приборов с зарядовой связью, каков смысл основных параметров приборов?

48. Каким образом происходит непосредственное преобразование электрической энергии в световую в светодиоде?
49. Какими параметрами можно характеризовать различные свойства светодиодов? Каков принцип действия полупроводникового лазера?
50. Каковы отличия в принципе действия и в свойствах полупроводникового лазера и светодиода?
51. Как объяснить спектральную характеристику фоторезистора?
52. Как в фотоэлементе происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую?
53. Перечислите основные факторы, приводящие к потерям в солнечных элементах?
54. Поясните принцип действия солнечных элементов.
55. Солнечный элемент в отсутствие освещения и под освещением. Перечислите основные параметры солнечных элементов
56. Чем определяется эффективность преобразования оптического излучения в солнечных элементах (факторы, определяющие КПД)?
57. Изобразите эквивалентную схему реального солнечного элемента и поясните назначение ее элементов.
58. Как влияет повышение температуры на параметры солнечного элемента?

7.3. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций.

Общий результат выводится как интегральная оценка, складывающаяся из текущего контроля - 50% и промежуточного контроля - 50%.

Текущий контроль по дисциплине включает:

- посещение занятий - 10 баллов;
- участие на практических занятиях - 10 баллов;
- выполнение самостоятельных заданий - 15 баллов;
- выполнение домашних (аудиторных) контрольных работ - 15 баллов.

Промежуточный контроль по дисциплине включает:

- устный опрос - 20 баллов;
- письменная контрольная работа - 15 баллов;
- тестирование - 15 баллов.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.

Основная литература:

1. Гуртов, В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие/ В. А. Гуртов. – Москва, 2005. – 492 с.
2. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника: Учеб. Для студентов вузов. –М.: Высш. шк., 1986. -304 с.
3. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников. – М.: Изд. «Наука»,1977. – 672 с.
4. Бонч-Бруевич В.Л., и др. Сборник задач по физике полупроводников: Учеб. пособие для вузов.- М.: Наука. 1987. – 144 с.

Дополнительная литература:

1. Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов: Учеб. руководство. - М., Наука, 2000 г.
2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учеб. руководство.- М., ВШ., 1990г.

3. Гаман В.Н. Физика полупроводниковых приборов Учеб. руководство.- Томск, Из-во НТЛ, 2000, - 426 с.
4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учеб. руководство.- М., Сов.радио, 1980г.
5. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества. –М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
6. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. Под. ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. –М.: Физматлит, 2008, - 496 с.
7. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: Учеб. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 494 с.

9. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

1. Ресурсы Российской электронной библиотеки www.elibrary.ru.
2. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" www.window.edu.ru.

10. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

Перечень учебно-методических материалов, предоставляемых студентам во время занятий:

- наглядные пособия;
- словарь терминов по твердотельной электронике;
- презентации лекций;
- образовательные интернет-ресурсы.

Самостоятельная работа студента:

- проработка учебного материала (по конспектам лекций, учебной литературе);
- поиск и обзор научных публикаций и электронных источников по тематике дисциплины;
- работа с тестами и вопросами для самопроверки;
- написание рефератов;

Учебный материал дисциплины достаточно полно изложен в книгах списка основной литературы. Дополнительная литература рекомендуется с целью более глубокой проработки отдельных разделов программы для лучшего усвоения материала.

Большинство применяемых полупроводниковых материалов имеют кристаллическую структуру, поэтому необходимо уделить внимание изучению типов кристаллических решеток, особенно таких распространенных материалов микроэлектроники, как кремний, германий, арсенид галлия.

Структура реальных кристаллов характеризуется наличием равновесной концентрации различного рода дефектов. Примесные дефекты в полупроводниковых кристаллах оказывают значительное влияние на конструкцию и электрические характеристики пассивных и активных элементов полупроводниковых структур. Количество примесей может регулироваться в технологическом процессе формирования кристалла.

Изучение основ зонной теории твердых тел позволяет судить об энергетическом состоянии носителей зарядов в металлах, полупроводниках и диэлектриках. Зонная структура и энергетический спектр электронов в кристалле описывается одноэлектронным уравнением Шредингера. Для лучшего усвоения этой темы рекомендуется повторить из раздела квантовой механики описание движения частиц волновым уравнением Шредингера. Рекомендуется сопоставлять движение свободного электрона в вакууме и в кристалле.

Поведение носителей заряда в твердом теле описывается статистической функцией распределения. Необходимо усвоить, какими функциями распределения описываются различные состояния электронного газа в кристалле.

Электропроводность кристаллической структуры представляет собой явление, связанное с переносом свободных носителей заряда под действием электрического поля. Перенос свободных носителей заряда характеризуется такими основными понятиями, как дрейф и диффузия.

Обогащение полупроводника носителями зарядов может происходить за счет введения их через контакт, генерации светом, потоком заряженных частиц и т.д. Все это приводит к появлению избыточных, неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Здесь следует обратить внимание на уравнение непрерывности, описывающее поведение избыточных носителей в полупроводниках, и такие явления, как генерация и различные виды рекомбинации, которые влияют на свойства полупроводниковых приборов.

Изучение физических явлений в контактах играет немаловажную роль в выборе конструкции последних и технологических процессов их изготовления. Быстродействие микроэлектронной аппаратуры во многом определяется конструкцией и структурой контактных переходов. Изучение этого раздела следует начинать с проработки таких вопросов, как работа выхода электронов из металла и полупроводника, явления термоэлектронной эмиссии и контактная разность потенциалов. При изучении явлений, происходящих в контакте двух металлов, металла с полупроводником и двух полупроводников с различным типом проводимости, следует обратить внимание на объяснение контактных явлений с энергетической точки зрения.

Следует рассмотреть роль контактных явлений в разработке и функционировании полупроводниковых приборов, таких как транзисторы, стабилитроны, туннельные диоды, многослойные структуры, фотоэлектронные приборы.

Поверхностные явления на границе кристалла заключаются в возникновении поверхностных энергетических состояний, которые видоизменяют структуру энергетического спектра носителей заряда вблизи поверхности. Следует обратить внимание на причины, вызывающие появление поверхностных энергетических состояний, зонную диаграмму в приповерхностном слое для различных материалов. Необходимо рассмотреть конструктивно-технологические особенности МДП - структур, использующих эффект поля.

При изучении физических принципов работы полупроводниковых приборов следует обратить внимание на связь их параметров с параметрами материалов, используемых для их изготовления.

11. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем.

1. Компьютерные и мультимедийное оборудование в ходе изложения лекционного материала (лекции в виде презентаций).
2. Конспекты лекций и справочной литературы.
3. Тематические видеоролики из интернета.

12. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

1. При изложении теоретического материала используется лекционный зал, оснащенный мультимедиа проекционным оборудованием.
1. «Научно-исследовательская лаборатория физики тонких пленок». Возможность ознакомления магистров с тонкопленочной технологией получения твердотельных структур (метод термовакuumного напыления, метод магнетронного распыления,

метод химических транспортных реакций) и демонстрация образцов при прохождении соответствующей темы (фоторезистор на основе ZnO, полевой транзистор на основе нитевидного кристалла (вискера) теллура, тонкопленочный p-n- переход n-ZnO/p-Si).

2. Электронограф ЭГ-75. Демонстрация явления катодolumинесценции (образец: структура ZnO/Al₂O₃).
3. Оптоволоконный спектрофотометрический комплекс AvaSpec-ULS2048x64-USB2 (дифракционная решетка - 300 мм⁻¹, диапазон - 250-1160 нм, входная оптическая щель - 50 мкм, разрешение - 2,4 нм, 2048x64 пиксельный CCD детектор). Используется в качестве лекционной демонстрации для снятия спектров излучения светодиодов и полупроводниковых лазеров, пропускания и поглощения пленок на прозрачных подложках (ZnO/Al₂O₃).

Составитель:
кандидат физ.-мат. наук,
доцент кафедры
физической электроники ДГУ

Исмаилов А.М.