

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Институт информационных технологий, математики и механики

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол № 10 от 02.12.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Твердотельная электроника

---

Уровень высшего образования  
Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность  
02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии

---

Направленность образовательной программы  
Сопряженная разработка программного и аппаратного обеспечения

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.03 Твердотельная электроника относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
<i>ПК-1: Способен собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам</i>	<i>ПК-1.1: Знает методы обработки и интерпретации данных научных исследований ПК-1.2: Умеет собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований ПК-1.3: Имеет практический опыт сбора, обработки и интерпретации данных научных исследований</i>	<i>ПК-1.1: Знает сущность эксперимента; эффективные методики проведения экспериментального исследования.  ПК-1.2: Умеет грамотно подобрать необходимые приборы и установки для проведения экспериментальных исследований  ПК-1.3: Владеет способностью аргументировать, выбирать и реализовывать на практике эффективную методику проведения экспериментальных исследований</i>	<i>Опрос Задачи</i>	<i>Зачёт: Контрольные вопросы</i>

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	32

- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	1
самостоятельная работа	43
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	
Тема 1. Основы зонной теории твердых тел	10	3	3	6	4
Тема 2. Статистика равновесных и неравновесных носителей в полупроводниках	10	3	3	6	4
Тема 3. Поверхность твердого тела, эффект поля	10	3	3	6	4
Тема 4. Явления на контакте «металл-полупроводник»	10	3	3	6	4
Тема 5. Электронно-дырочный переход	10	3	3	6	4
Тема 6. Полупроводниковые гетеропереходы	10	3	3	6	4
Тема 7. Специальные типы диодов: выпрямительные, импульсные, стабилит-роны, варикапы, туннельные, лавинно-пролетные	10	3	3	6	4
Тема 8. Полупроводниковые фотоприемники	10	3	3	6	4
Тема 9. Фотовольтаические элементы (солнечные элементы)	10	3	3	6	4
Тема 10. Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры	10	3	3	6	4
Тема 11. Полевые транзисторы	7	2	2	4	3
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	32	65	43

### Содержание разделов и тем дисциплины

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 элек-тронов и дырок в собственном полупроводнике. Статистика электронов в примесных по-лупроводниках. Закон действующих масс. Сильно легированные полупроводники, ком-пенсированные 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, стабилит-роны, варикапы, туннельные, лавинно-пролетные.

Явление накопления инжектированных носителей вблизи p-n- перехода и его ис-пользование для формирования импульсов, импульсный диод. Структура, принцип дей-ствия, параметры и характеристики варикапа. Параметры, характеристики и схема вклю-чения 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: фото-резисторы. 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, пер-спективы и направления его увеличения. Материалы и современное состояние солнечной энергетики.

Тема 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 по-лезного действия). Светодиоды инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра. Источники белого света на основе светодиодов. Полупроводниковые инжекционные лазе-ры. Квантовые каскадные лазеры.

Тема 11. Полевые транзисторы. Полевые транзисторы с управляющим р-п- 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. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа студентов при изучении дисциплины проводится с целью углубления знаний по дисциплине и предусматривает:

- повторение пройденного учебного материала, чтение рекомендованной литературы;
- подготовку к практическим занятиям;
- выполнение общих и индивидуальных домашних заданий;
- работу с электронными источниками;
- подготовку к сдаче формы промежуточной аттестации.

Цель самостоятельной работы - формирование навыков непрерывного самообразования и профессионального совершенствования.

Самостоятельная работа способствует формированию аналитического и творческого мышления, совершенствует способы организации исследовательской деятельности, воспитывает целеустремленность, системность и последовательность в работе студентов, развивает у них навык завершать начатую работу.

Основные виды самостоятельной работы студентов:

- работа с основной и дополнительной литературой;
- изучение категориального аппарата дисциплины;
- самостоятельное изучение тем дисциплины;
- подготовка к зачёту;
- работа в библиотеке;
- изучение сайтов по темам дисциплины в сети Интернет.

Работа с основной и дополнительной литературой

Изучение рекомендованной литературы следует начинать с учебников и учебных пособий, затем переходить к научным монографиям и материалам периодических изданий. Работа с литературой предусматривает конспектирование наиболее актуальных и познавательных материалов. Это не только мобилизует внимание, но и способствует более глубокому осмыслению материала, его лучшему запоминанию, а также позволяет студентам проводить систематизацию и сравнительный анализ изучаемой информации. Таким образом,

конспектирование – одна из основных форм самостоятельного труда, которая требует от студента активно работать с учебной литературой и не ограничиваться конспектом лекций. Студент должен уметь самостоятельно подбирать необходимую литературу для учебной и научной работы, уметь обращаться с предметными каталогами и библиографическим справочником библиотеки.

Изучение категориального аппарата дисциплины

Изучение и осмысление экономических категорий требует проработки лекционного материала, выполнения практических заданий, изучение словарей, энциклопедий, справочников.

Индивидуальная самостоятельная работа студента направлена на овладение и грамотное применение экономической терминологии в области компьютерного моделирования.

Самостоятельное изучение тем дисциплины

Особое место отводится самостоятельной проработке студентами отдельных разделов и тем изучаемой дисциплины. Такой подход вырабатывает у студентов инициативу, стремление к увеличению объема знаний, умений и навыков, всестороннего овладения способами и приемами профессиональной деятельности.

Изучение вопросов определенной темы направлено на более глубокое усвоение основных категорий экономической теории, понимание экономических процессов, происходящих в обществе, совершенствование навыка анализа теоретического и эмпирического материала.

Подготовка к зачёту

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине проходит в виде зачёта. Условием успешного прохождения промежуточной аттестации является систематическая работа студента в течение семестра. В этом случае подготовка к зачёту является систематизацией всех полученных знаний по данной дисциплине.

Рекомендуется внимательно изучить перечень вопросов к зачёту также использовать в процессе обучения программу, учебно-методический комплекс, другие методические материалы.

Желательно спланировать троекратный просмотр материала перед зачётом. Во-первых, внимательное чтение с осмыслением, подчеркиванием и составлением краткого плана ответа. Во-вторых, повторная проработка наиболее сложных вопросов. В-третьих, быстрый просмотр материала или планов ответов для его систематизации в памяти.

Изучение сайтов по темам дисциплины в сети Интернет

Ресурсы Интернет являются одним из альтернативных источников быстрого поиска требуемой информации. Их использование возможно для получения основных и дополнительных сведений по изучаемым материалам. Необходимо помнить об оформлении ссылок на Интернет-источники.

Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов преподавателю целесообразно использовать следующие виды деятельности:

- консультации,
- выдача заданий на самостоятельную работу,
- информационное обеспечение обучения,
- контроль качества самостоятельной работы студентов.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

## 5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

### 5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Опрос) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

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 напряженность 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 гетеро переходов.
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 p-n- переходе?
31. Нарисовать равновесную зонную схему p- n -перехода и изменения напряженности поля и потенциала в переходе.
32. Какой вид имеет зонная схема при прямом и обратном включении p -n- перехода?
33. Как определяется толщина резкого p- n перехода, каким выражением определяется вольт-амперная характеристика тонкого p- n - перехода?
34. Каким выражением определяется плотность тока насыщения в тонком p-n- 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 стабилиторов?
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 тиристорных схем, 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?

### Критерии оценивания (оценочное средство - Опрос)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	изложение материала логично, грамотно, без ошибок; свободное владение профессиональной терминологией; умение высказывать и обосновать свои суждения; знание дополнительного материала, студент дает четкий, полный, правильный ответ на теоретические вопросы; теория связана с практикой
отлично	изложение материала логично, грамотно, без ошибок; свободное владение профессиональной терминологией; умение высказывать и обосновать свои суждения; студент дает четкий, полный, правильный ответ на теоретические вопросы; теория связана с практикой
очень хорошо	студент грамотно излагает материал; ориентируется в материале, владеет профессиональной терминологией, осознанно применяет теоретические знания для выполнения задания, содержание и форма ответа имеют незначительные погрешности; ответ правильный, полный, с незначительными неточностями
хорошо	студент грамотно излагает материал; ориентируется в материале, владеет профессиональной терминологией, осознанно применяет теоретические знания для выполнения задания, но содержание и форма ответа имеют отдельные неточности; ответ правильный, недостаточно полный
удовлетворительно	студент излагает материал неполно, непоследовательно, допускает неточности в определении понятий, в применении знаний для выполнения задания, не может доказательно обосновать свои суждения; обнаруживается недостаточно глубокое понимание изученного материала.
неудовлетворительно	отсутствуют необходимые теоретические знания; допущены ошибки в определении понятий, искажен их смысл, в ответе студента проявляется незнание основного материала учебной программы, допускаются грубые ошибки в изложении, не может применять знания для выполнения задания
плохо	необходима дополнительная подготовка для выполнения задания

## 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

### Задачи к модулю 1.

1. Электропроводность образца собственного кремния при температуре 300 К равна  $\sigma = 0,135 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ . Подвижность электронов и дырок в кремнии при 300К равна 0,135 и 0,048 ( $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ). 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  $\mu_n$  и  $\mu_p$  ( $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ), концентрация собственных носителей  $n_i$  ( $\text{м}^{-3}$ ), площадь поперечного сечения образца  $S$  ( $\text{м}^2$ ). 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  $\mu_n$  и  $\mu_p$ , 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.  $T_1 = 50^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 100^\circ\text{C}$ .

## Задачи к модулю 2.

1. Если к резкому р-п- 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 р-п- перехода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы она уменьшилась до 50 пФ, если  $\phi_k = 0,82$  В?

3. Какое напряжение необходимо приложить к р-п- переходу при  $T = 300$  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 р-п- перехода площадью  $S = 1$  мм<sup>2</sup> при  $T = 300$  К равен 10 мкА. Полагая, что ток обусловлен только электронами, вычислить диффузионную длину электронов  $L_n$  в р- области. Уровень Ферми в р- области лежит на 0,5 эВ ниже дна зоны проводимости, подвижность электронов  $\mu_n = 0,39$  м<sup>2</sup> / (В·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  $r_p = 10^{-4}$  Ом·м и удельное сопротивление п- области  $r_n = 10^{-2}$  Ом·м. Подвижность электронов и дырок в кремнии соответственно равны 0,13 и 0,05 м<sup>2</sup>/(В·с). Вычислить контактную разность потенциалов в переходе при температуре  $T = 300$  К, если собственная концентрация  $n_i = 1,38 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>.

7. Вычислить барьерную емкость резкого р- п- перехода, полученного в стержне арсенида галлия площадью сечения  $S = 1$  мм<sup>2</sup>. 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<sup>-3</sup> 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 мм<sup>2</sup>.

10. Высота потенциального барьера р- п- перехода при равновесии равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей  $N = 3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> 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 мм<sup>2</sup>. Чему она будет равна при прямом напряжении 0,1 В?

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Задание выполнено в полном объеме (все поставленные задачи решены),

Оценка	Критерии оценивания
	ответ логичен и обоснован, обучающийся отвечает четко и последовательно, показывает глубокое знание основного и дополнительного материала
отлично	Задание выполнено в полном объеме (все поставленные задачи решены), ответ логичен и обоснован, обучающийся отвечает четко и последовательно, показывает глубокое знание основного материала
очень хорошо	Задание выполнено в полном объеме (все поставленные задачи решены), ответ логичен и обоснован, обучающийся отвечает четко и последовательно, показывает глубокое знание материала, допущено не более 2 неточностей не принципиального характера
хорошо	Задание выполнено в полном объеме (все поставленные задачи решены), ответ логичен и обоснован, допущены неточности не принципиального характера, но обучающийся показывает систему знаний по теме своими ответами на поставленные вопросы
удовлетворительно	Задание выполнено не в полном объеме (решено более 50% поставленных задач), но обучающийся допускает ошибки, нарушена последовательность ответа, но в целом раскрывает содержание основного материала
неудовлетворительно	Задание выполнено не в полном объеме (решено менее 50% поставленных задач), обучающийся дает неверную информацию при ответе на поставленные задачи, допускает грубые ошибки при толковании материала, демонстрирует незнание основных терминов и понятий
плохо	Задание не выполнено, обучающийся демонстрирует полное незнание материала

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
		не зачтено		зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место	Минимально допустимый уровень знаний.	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, соответствующем	Уровень знаний в объеме, превышающем программу

	оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	грубые ошибки	Допущено много негрубых ошибок	программе подготовки . Допущено несколько негрубых ошибок	программе подготовки . Допущено несколько несущественных ошибок	программе подготовки и. Ошибок нет.	подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	<b>превосходно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-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 р-п- перехода. Энергетическая диаграмма р-п-перехода при равновесии, высота потенциального барьера и контактная разность потенциалов.
21. Законы распределения заряда, напряженности поля и потенциала на р-п-переходе.
22. Процессы переноса носителей заряда через равновесный р-п- переход, диффузионные и дрейфовые токи. Классификация электронно-дырочных переходов.
23. Процессы переноса носителей заряда через неравновесный р-п- переход, инжекция и экстракция носителей заряда.
24. Вольтамперные характеристики идеального и реального перехода, токи генерации и рекомбинации. Ёмкостные свойства р-п- 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 р-п – перехода.
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 р-п – перехода от сплавного, явление накопления инжектированных носителей вблизи р - п – 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. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Закон нарастания и спада неравновесной концентрации.
38. Влияние света на р-п-переход, вольтамперные, световые и спектральные характеристики фотодиодов.
39. Нагрузочные характеристики и эффективность преобразования фотогальванических элементов.
40. Инжекционная электролюминесценция, коэффициент инжекции.
41. Параметры светодиода. Внутренний и внешний квантовые выходы и КПД светодиода.
42. Характеристики светодиода: вольтамперная, излучательная и спектральная.
43. Технология получения и материалы для светодиодов.
44. Инверсная населенность и способы его создания. Основные характеристики и параметры лазеров.

45. Принцип действия лазера. Конструкция и технология изготовления инжекционных лазеров.
46. Материалы для лазеров, структура энергетических зон полупроводника, прямозонные полупроводники.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Вся компетенция (части компетенции), на формирование которой направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна часть компетенции сформирована на уровне «неудовлетворительно»

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Дьяконов В.П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1 : Приборы общего назначения : монография / Дьяконов В.П. - Москва : ДМК-пресс, 2023. - 601 с. - ISBN 978-5-89818-390-5. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=878950&idb=0>.
2. Дьяконов В.П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 2 : Приборы специального назначения : монография / Дьяконов В.П. - Москва : ДМК-пресс, 2023. - 577 с. - ISBN 978-5-89818-391-2. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=878951&idb=0>.
3. Гува Аркадий Яковлевич. Контактный теплообмен силовых полупроводниковых приборов : Учебное пособие. - 1. - Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. - 212 с. - ВО - Бакалавриат. - ISBN 978-5-9729-2253-6. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=1007965&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Смирнов В.И. Физика полупроводниковых приборов : учебное пособие / Смирнов В.И. - Москва : Инфра-Инженерия, 2023. - 212 с. - ISBN 978-5-9729-1241-4. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=913295&idb=0>.
2. Старосельский Виктор Игоревич. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие для вузов / В. И. Старосельский. - Москва : Юрайт, 2025. - 463 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-21135-1. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=919899&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

1. Операционная система Microsoft Windows
2. Пакет прикладных программ Microsoft Office
3. Правовая система «Консультант плюс»

4. Правовая система «Гарант».
5. Интернет браузеры (Mozilla Firefox, Google Chrome)

#### **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии.

Автор(ы): Мееров Иосиф Борисович, кандидат технических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Мееров Иосиф Борисович, кандидат технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 02.12.2024, протокол № 5.