

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Твердотельная электроника

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии

Направленность образовательной программы

Информационные системы и технологии

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.14 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
ПК-1: Способен собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам	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	ПК-1.1: Знание базовых физических принципов работы и методов анализа полупроводниковых структур, приборов и устройств на их основе. ПК-1.2: Умение классифицировать приборы твердотельной электроники. Умение различать схемы включения транзисторов. Умение анализировать зонные диаграммы твердотельных структур и вольтамперные характеристики основных полупроводниковых приборов нанoeлектроники. ПК-1.3: Владение навыком сбора, обработки и анализа информации при работе с твердотельными структурами и приборами.	Опрос	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3

Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- 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	
	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф
Введение	4	2	2	4	0
Основы физики твердого тела	19	6	6	12	7
Явления на границе раздела материалов. Выпрямительные твердотельные диоды	27	8	8	16	11
Транзисторы	30	9	9	18	12
Генераторные диоды СВЧ диапазона	8	2	2	4	4
Твердотельные приборы оптоэлектроники	12	3	3	6	6
Твердотельная элементная база информационных систем	7	2	2	4	3
Аттестация	0	0		0	
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	32	65	43

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Кристаллическая структура твердых тел.
2. Колебания и волны в кристаллической решетке. Динамика одноатомной цепочки атомов. Фононы.
3. Электроны в периодическом потенциале. Модель Кронига-Пенни. Зонная структура твердых тел. Металлы, диэлектрики, полупроводники.
4. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Вырожденные и невырожденные полупроводники.
5. Транспорт носителей заряда в слабых и сильных электрических полях. Явление пробоя.
6. Неравновесные носители заряда в полупроводниках. Уравнение непрерывности.

7. Явления на границе раздела материалов. Физические принципы работы диодов на базе р-п перехода и контакта металл-полупроводник. Типы диодов по назначению.
8. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Режимы обеднения, обогащения, инверсии.
9. Биполярный транзистор. Структура, физические принципы работы, схемы включения, основные режимы работы, основные характеристики.
10. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки. Структура, физические принципы работы, основные характеристики.
11. Полевой транзистор с изоляцией затвора диэлектриком.
12. Транзистор в режиме ключа. Комплементарная структура металл — оксид — полупроводник.
13. Диод Ганна.
14. Лавинно-пролетный диод.
15. Туннельный диод.
16. Твердотельные фотодетекторы. Типы фотодетекторов; физические принципы работы.
17. Светодиоды, полупроводниковые инжекционные лазеры.
18. Твердотельная элементная база информационных систем. Современные гетероструктуры и преимущества их использования.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

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.

1. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях : учеб. пособие / С.В. Оболенский, Н.В. Демарина, Е.В. Волкова . Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2007. - 64 с.
2. Введение в физику полупроводниковых диодов и методы их проектирования с использованием высокопроизводительных вычислений : учебное пособие / Е. В. Волкова, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский, Е. А. Тарасова ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2020. - 78 с. - Текст : электронный.
3. Введение в физику транзисторов : учебное пособие / Е. А. Тарасова, А. С. Пузанов, Е. В. Волкова [и др.] ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2019. - 88 с. - Текст : электронный.

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. Металлы, диэлектрики, полупроводники с точки зрения зонной теории.
2. Акустические и оптические ветки колебаний цепочки атомов.
3. Положение уровня Ферми в вырожденных и невырожденных полупроводниках различного типа проводимости.
4. Понятие эффективной массы. Понятие дырки.
5. Объяснить, с какой целью в полупроводники добавляют легирующие примеси.
6. Качественно объяснить ход графика зависимости концентрации носителей заряда от температуры.
7. Понятия проводимости и подвижности носителей заряда. Графики зависимости средней дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в Si и GaAs.
8. Типы пробоя в полупроводниках.
9. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.
10. Физический смысл слагаемых в уравнении непрерывности. Понятия времени жизни и диффузионной длины.
11. Пояснить процесс формирования области пространственного заряда в р-п переходе. Зонная диаграмма равновесного р-п перехода; контактная разность потенциалов. Пояснить, какими зарядами образовано поле в переходе.
12. Движение носителей заряда в р-п переходе при подаче прямого и обратного смещений. Идеальная ВАХ диода.
13. Барьерная емкость р-п перехода, сопротивление базы. Эквивалентная схема диода. Реальная ВАХ р-п перехода.
14. Изменится ли ток р-п перехода, если полупроводниковую структуру нагреть? Ответ пояснить.
15. Пояснить конструктивные отличия МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами.
16. По ВАХ МДП транзистора определить, имеет ли его конструкция встроенный канал.

Критерии оценивания (оценочное средство - Опрос)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не отвечает на вопросы или допускает грубые ошибки.

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 оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу 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	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы 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 некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	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
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	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	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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. Кристаллическая структура твердых тел.
2. Понятие эффективной массы. Прямозонные, непрямозонные полупроводники.
3. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми
4. Собственные и примесные полупроводники. Зонные диаграммы полупроводников.
5. Зависимости концентрации носителей заряда и уровня Ферми от температуры в собственных полупроводниках.
6. Акустические и оптические фононы.
7. Проводимость и подвижность носителей заряда, их зависимость от температуры.
8. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.
9. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.
10. Неравновесные носители в полупроводниках. Уравнение непрерывности.
11. Теория p-n перехода. Зонная диаграмма в равновесном состоянии,

12. P-n переход при подаче смещения. Идеальная, реальная ВАХ, эквивалентная схема диода.
13. Диод Шоттки. Зонная диаграмма в равновесном состоянии, идеальная и реальная ВАХ.
14. Идеальная структура металл-диэлектрик-полупроводник. Режимы работы МДП структуры: обогащение, обеднение, инверсия.
15. Конструкция и принцип работы классического биполярного транзистора в схеме с общей базой (зонные диаграммы, основные физические процессы, протекающие в структуре, вид ВАХ).
16. Структура, принцип работы и качественный вид ВАХ полевого транзистора с управляющим p-n переходом.
17. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналом. Конструкция, принцип работы, ВАХ.
18. Конструкция и принцип работы диода Ганна.
19. Конструкция и принцип работы туннельного диода.
20. Твердотельные фотоприемники. Классификация и принципы работы. Солнечные батареи.
21. Светодиоды и полупроводниковые инжекционные лазеры.
22. Преимущества использования гетероструктур для создания современной твердотельной элементной базы.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не отвечает на вопросы или допускает грубые ошибки.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. По графику зависимости собственной концентрации носителей заряда от температуры широко используемого в микроэлектронике полупроводника оценить его ширину запрещенной зоны. Определить материал полупроводника.
2. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в германии при $T=300$ К. Эффективную массу дырок считать равной $0.36 \cdot m_0$, а электронов – $0.55 \cdot m_0$, где m_0 – масса электрона в вакууме. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре в германии составляет 0.66 эВ.

3. Определить относительное изменение проводимости тонкого полупроводникового образца при стационарном освещении с интенсивностью $I=5 \cdot 10^{15} \text{ 1/с} \cdot \text{см}^2$. Коэффициент поглощения $\gamma=100 \text{ см}^{-1}$; равновесная концентрация электронов составляет $n_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$; время жизни $\tau=2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; отношение подвижностей электронов и дырок $\mu_n/\mu_p \approx 2$.
4. При $T=300 \text{ К}$ удельное сопротивление образца собственного кремния составляет $2,3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Какова концентрация собственных носителей заряда? Если через образец пропустить ток, то какая его часть будет обусловлена электронами? Считать, что $\mu_n=1400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_p=450 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.
5. На примере n+/n- контакта вывести соотношение Эйнштейна. Найти диффузионную длину электронов в невырожденном германии при температуре $T = 300 \text{ К}$, если время жизни электронов составляет $\tau_n = 10^{-4} \text{ с}$, а их подвижность - $\mu_n=3800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.
6. Найти толщину обедненной области резкого несимметричного германиевого перехода в равновесном случае и при подаче смещения $+0,1 \text{ В}$, если концентрации легирующей примеси в p- и n-областях составляют $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon=16$, концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике $n_i=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
7. Получить выражение для дифференциального сопротивления реального p-n перехода (с учетом сопротивления базы) в зависимости от внешнего напряжения.
8. Оценить величину плотности тока тепловой генерации p-n перехода, если концентрации примесей в p и n областях составляют, соответственно, $N_A=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_D=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Подвижности дырок и электронов взять из справочных материалов. Времена жизни носителей заряда $\tau_p=\tau_n=10^{-3} \text{ с}$. Концентрация носителей в собственном полупроводнике $n_i=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Найти величину тока при внешнем напряжении $V=-0,5 \text{ В}$. Площадь перехода составляет 1 мм^2 .
9. По графикам прямых ВАХ германиевого и кремниевого диодов установите соответствие номера диода и материала, из которого он изготовлен. Качественно пояснить ответ.
10. Оценить контактную разность потенциалов в германиевом p-n переходе. Удельное сопротивление p и n областей $\rho=2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Концентрация носителей в собственном полупроводнике $n_i=2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
11. Исходя из среднего времени свободного пробега ($\tau \approx 10^{-13} \text{ с}$), эффективной массы электронов ($m_n^* = 0.36 \cdot m_0$) и ширины запрещенной зоны ($W_g = 0.66 \text{ эВ}$) оценить напряженность поля, при которой возникает лавинный пробой в германии.
12. По результатам предыдущей задачи оценить напряжение пробоя в германиевом p+-n переходе. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 16$. Концентрация доноров в n-области $N_D=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.
13. Найти профиль напряженности электрического поля в базе дрейфового биполярного p-n-p транзистора при экспоненциальном распределении легирующей примеси в базе $N_d=N_0 \cdot e^{\alpha x}$, где x - координата вдоль базы (в направлении от эмиттера к коллектору). Определить знак α для получения положительного эффекта от наличия поля в базе.

14. Определить сдвиг длинноволновой границы рабочего диапазона германиевого фотодиода при его охлаждении от комнатной температуры (300 К) до температуры жидкого азота (78 К). Зависимость ширины запрещенной зоны от температуры для германия $W_g = 0.742 - 4.8 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 235)$ (эВ).

15. Для структуры n-GaAs/Au рассчитать значение максимальной напряженности электрического поля при внешнем напряжении $V = 0$ В. Концентрация легирующей примеси в полупроводнике $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, контактная разность потенциалов $V_k = 0,48$ В.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не отвечает на вопросы или допускает грубые ошибки.

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

Основная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : учебник. - Изд. 4-е, стер. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2010. - 400 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0922-8 : 703.56., 39 экз.
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. [Кн.] 1 / пер. с англ. В. А. Гергеля, В. В. Ракитина ; под ред. Р. А. Суриса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир , 1984. - 455 с. : ил. - 2.20., 16 экз.
3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. [Кн.] 2 / пер. с англ. В. А. Гергеля [и др.] ; под ред. Р. А. Суриса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир , 1984. - 455 с. : ил. - 2.20., 16 экз.

Дополнительная литература:

1. Степаненко Игорь Павлович. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергия, 1977. - 671 с. : ил. - 2.80., 3 экз.
2. Базовые лекции по электронике : сборник : в 2 т. Т. 2. Твердотельная электроника / под общ. ред. В. М. Пролейко. - М. : Техносфера, 2009. - 608 с. - ISBN 978-5-94836-215-1 (т. 2) : 400.00., 1 экз.

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

Электронно-библиотечные системы (электронная библиотека): <http://e.lanbook.com>

Тематическая база данных <http://www.matprop.ru/>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной

программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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): Волкова Екатерина Валерьевна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023г., протокол № 09/23.