

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**

Электроника

---

Уровень высшего образования

Специалитет

---

Направление подготовки / специальность

11.05.02 - Специальные радиотехнические системы

---

Направленность образовательной программы

Радиотехнические системы и комплексы специального назначения

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.26 Электроника относится к обязательной части 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
ОПК-5: Способен учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники в своей профессиональной деятельности	ОПК-5.1: Анализирует современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники ОПК-5.2: Использует современную электронику, измерительную и вычислительную технику	ОПК-5.1: Знать: физические принципы работы основных типов приборов вакуумной и полупроводниковой электроники; особенности построения электродинамических систем мощных источников электромагнитного излучения; области применения различных классов электронных приборов и их основные характеристики. Уметь: анализировать современное состояние и основные тенденции в развитии полупроводниковой и мощной электроники; анализировать основные физические ограничения микроминиатюризации приборов наноэлектроники.  ОПК-5.2: Уметь: организовывать поиск научно-технической информации из области электроники с использованием сетевых ресурсов; обосновывать выбор оборудования для решения поставленной задачи. Владеть: навыком обработки	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы  Экзамен: Контрольные вопросы

		результатов эксперимента с использованием современных программных средств.		
ОПК-7: Способен применять методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов современной электроники	ОПК-7.1: Понимает основные методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов ОПК-7.2: Использует основные методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов	ОПК-7.1: Знать: современные методы расчета параметров СВЧ источников электромагнитного излучения большой мощности и полупроводниковых материалов и приборов на их основе. Уметь: различать схемы включения транзисторов, рассчитывать параметры четырехполюсника.  ОПК-7.2: Уметь применять базовые знания в области математики для решения стандартных задач физической электроники. Владеть навыком построения зонных диаграмм полупроводниковых приборов, навыком анализа работы СВЧ приборов на основе метода эквивалентных схем.	Собеседование	Экзамен: Задачи  Зачёт: Задачи

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>8</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>288</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	64
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	48
- КСР	3
<b>самостоятельная работа</b>	<b>137</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен, Зачёт</b>

### 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	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Введение	3	1	0	1	2
Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях	23	9	0	9	14
Электронная эмиссия	38	10	8	18	20
СВЧ электроника	43	12	8	20	23
Основы физики твердого тела	66	14	16	30	36
Физика полупроводниковых приборов	76	18	16	34	42
Аттестация	36				
КСР	3				3
Итого	288	64	48	115	137

#### Содержание разделов и тем дисциплины

##### Часть 1. Вакуумная электроника

###### 1. Введение

###### 2. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях

Движение электронов в электрическом и магнитном статических полях. Электронно-оптические свойства полей с аксиальной симметрией. Электронные линзы. Электронно-оптические системы.

Интенсивные электронные пучки

###### 3. Электронная эмиссия

Общие вопросы эмиссионной электроники. Термоэлектронная эмиссия. Полевая эмиссия. Вторичная электронная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия. Технические применения фото- и вторичной эмиссии.

###### 4. СВЧ электроника

Основные понятия электроники СВЧ. Клистроны. Лампы бегущей и обратной волны типа О (ЛБВ-О, ЛОВ-О). ЛБВ М-типа. Магнетрон. Релятивистская высокочастотная электроника. Лазеры и мазеры на свободных электронах. Вакуумная микроэлектроника СВЧ

##### Часть 2. Твердотельная электроника

###### 1. Основы физики твердого тела

Кристаллическая структура твердого тела. Колебания и волны в кристаллической решетке. Электроны в периодическом потенциале. Статистика носителей заряда. Квазиклассическое описание движения носителей заряда. Неравновесные явления в полупроводниках. Процессы переноса в неоднородных полупроводниках.

###### 2. Физика полупроводниковых приборов

Теория р-п перехода. Устройства на базе диода. Биполярный транзистор. Работа биполярных

транзисторов в схемах. Явления на резкой границе раздела материалов. Полевой транзистор с р-п переходом и барьером Шоттки. Полевой транзистор металл-диэлектрик-полупроводник. Полевой транзистор металл-окисел-полупроводник. Работа полевых транзисторов в схемах. Полупроводниковые приборы СВЧ диапазона. Оптоэлектронные приборы.

#### **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. Оболенский Сергей Владимирович. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях : учеб. пособие / 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 / Волкова Е. В., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Тарасова Е. А. - Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2020. - 78 с.
3. Введение в физику транзисторов : учебное пособие / Тарасова Е. А., Пузанов А. С., Волкова Е. В., Оболенский С. В., Оболенская Е. С. - Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2019. - 88 с.
4. Мануилов Владимир Николаевич. Принципы работы мощных электронных приборов СВЧ : учеб. пособие для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки "Радиофизика" / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2012. - 50 с.
5. Мануилов Владимир Николаевич. Введение в электронную эмиссию : учебное пособие / В. Н. Мануилов ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. - 48 с.

#### **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 - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ОПК-5:**

1. В каких режимах может работать диод? Чем они отличаются?
2. Что будет происходить с графиком  $U(r)$  по мере увеличения температуры катода  $T$ ?
3. Как образуется потенциальный барьер на границе твердого тела? Что такое работа выхода?
4. Как будет выглядеть вольт-амперная характеристика диода при  $U_a$ , стремящимся к бесконечности?
5. Какие особенности конструкции триода обеспечивают свойство усиления сигнала?
6. Что такое эквивалентный диод?
7. Чем отличается режим возврата от режима прямого перехвата?
8. При каких напряжениях на сетке триод сводится к эквивалентному диоду?
9. Какой максимальный коэффициент усиления по напряжению возможен в схеме усилителя на триоде?

10. Дать определения самостоятельного и несамостоятельного, нормального и аномального тлеющего разряда.
11. Какие заряды являются переносчиками тока в тлеющем разряде? Как и где они образуются?
12. Привести примеры донорных и акцепторных примесей.
13. Как зависит от температуры проводимость полупроводников?
14. Объяснить физический смысл времени жизни и диффузионной длины.
15. Объяснить физический смысл уравнения непрерывности.
16. Может ли холловская ЭДС быть равной нулю?
17. Как зависит контактная разность потенциалов p-n перехода от температуры?
18. Почему толщина базы биполярного транзистора должна быть меньше диффузионной длины?

### 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ОПК-7:

1. Вывести формулу для распределения потенциала  $U(r)$  в цилиндрическом (сферическом) диоде при температуре катода  $T=0$ . Нарисовать график зависимости потенциала от радиуса.
2. Вывести внутреннее уравнение триода.
3. Объяснить, как определять основные параметры триода по вольт-амперным характеристикам.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

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 (индикатор 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	При решении стандартных	Продемонстрированы	Продемонстрированы	Продемонстрированы	Продемонстрированы	Продемонстрированы все

	умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	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	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 ОПК-5**

1. Интеграл энергии при релятивистских скоростях электронов. Виды электронных траекторий при движении в статических однородных электрическом и магнитном полях.
2. Представление радиус-вектора и скорости электрона при движении в слабо неоднородных полях. Условия сохранения поперечного адиабатического инварианта. Теорема Буша. Устройство и принцип работы магнетронно-инжекционной пушки гиротрона.
3. Вариационные принципы динамики заряженных частиц (принцип Гамильтона, укороченного действия, Мопертюи). Электронно-оптический коэффициент преломления.
4. Классификация электростатических линз. Построение изображения в тонкой и толстой линзах.
5. Классификация магнитных линз. Понятие о квадрупольных линзах и электронных зеркалах. Виды aberrаций электронных линз.
6. Виды электронных микроскопов (эмиссионный, просвечивающий, отражательный, растровый, автоэлектронный, автоионный), принцип их действия.
7. Принцип работы системы рекуперации энергии электронов в мощных электронных приборах.
8. Отличия режимов температурного ограничения эмиссии и ограничения тока пространственным зарядом в электронных диодах. Закон “трех вторых” для плоского диода.
9. Пушки Пирса. Предельный ток транспортировки электронного пучка в пространстве дрейфа.
10. Силы, действующие на электрон при выходе из твердого тела. Профиль потенциального барьера на границе твердого тела.
11. Теория термоэлектронной эмиссии из твердого тела. Механизмы действия пленочного и оксидного катодов.
12. Изменение профиля потенциального барьера на границе твердого тела под действием внешнего электрического поля.
13. Эффект Шоттки. Автоэлектронная и взрывная эмиссия.
14. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии и угла падения первичных электронов. Распределение вторичных электронов по энергиям.
15. Основные законы внешнего фотоэффекта (законы Столетова и Эйнштейна). Типы фотокатодов и их сравнительные характеристики.
16. Понятие о наведенном токе в цепях электродов. Теорема о полном токе. Теорема Шокли - Рамо. Метод полного тока. Проводимость диода на СВЧ.



17. Статическое и динамическое управление электронным потоком. Скоростная модуляция электронного потока. Уравнение скоростной модуляции.
18. Устройство и принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона. Пространственно-временная диаграмма. Принцип работы многорезонаторного клистрона.
19. Отражательный клистрон. Устройство, пространственно-временная диаграмма.
20. Зоны генерации, стартовый ток и перестройка частоты отражательного клистрона.
21. Принцип действия ЛБВ-О. Свойства периодических замедляющих систем ЛБВ-О. Пространственные гармоники. Устройство ЛБВ.
22. Дисперсионное уравнение ЛБВ. Параметры дисперсионного уравнения. Свойства корней дисперсионного уравнения. Коэффициент усиления ЛБВ.
23. Нелинейные эффекты при группировке в ЛБВ. Зависимость коэффициента полезного действия ЛБВ от параметров дисперсионного уравнения. Способы увеличения КПД ЛБВ-О.
24. Принцип действия лампы обратной волны. Дисперсионная характеристика замедляющей системы. Распределение поля и тока, электронная перестройка частоты.
25. Принцип действия, устройство и группировка электронов в ЛБВ-М.
26. Статический режим работы магнетрона. Электронное облако в негенерирующем магнетроне. Колебательные системы магнетронов,  $\pi$ -вид колебаний. Группировка электронов и КПД магнетрона.
27. Принцип работы МЦР. Оценки оптимальных параметров.
28. Причины увеличения ускоряющего напряжения в электронных приборах СВЧ. ЭОС релятивистских приборов. Релятивистская ЛБВ, МЦАР и убитрон.
29. Конструкция и параметры решетки автоэмиссионных катодов на основе катодов Спиндта. Диод и триод с катодом Спиндта.
30. Особенности устройства и работы ЛБВ О и М типов с катодами Спиндта.

#### **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 - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-5**

1. Кристаллическая структура твердых тел. Зонная структура энергетического спектра электронов в кристалле. Заполнение энергетических состояний электронами.
2. Понятие эффективной массы. Параболический изотропный закон дисперсии. Понятие дырки.
3. Распределение Ферми-Дирака (график, формула). Уровень Ферми. Типы твердых тел: металлы, диэлектрики, полупроводники. Вырожденные и невырожденные полупроводники.
4. Собственные и примесные полупроводники. Донорная и акцепторная легирующие примеси.
5. Функция плотности энергетических состояний (график, формула). Эффективная плотность состояний.
6. Зависимости концентрации носителей заряда и уровня Ферми от температуры в собственных полупроводниках.
7. Зависимости концентрации носителей заряда и уровня Ферми от температуры в примесных невырожденных полупроводниках. Области примесной проводимости, истощения примесей и собственной проводимости.
8. Колебания простой и сложной цепочки атомов. Акустические и оптические фононы. Продольные и поперечные колебания.
9. Процессы рассеяния носителей заряда в полупроводниках. Основные механизмы рассеяния. Проводимость и подвижность носителей заряда, их зависимость от температуры.
10. Движение носителей заряда в малых электрических полях. Разогрев электронного газа в полупроводниках. Эффект всплеска скорости носителей заряда. Электрический пробой в полупроводниках и полупроводниковых структурах.
11. Диффузия свободных носителей заряда. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.
12. Эффект Холла в полупроводниках.
13. Уравнение непрерывности. Физический смысл слагаемых. Понятие времени жизни носителей.
14. Время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда.
15. Генерация и рекомбинация носителей заряда.
16. Система уравнений для описания движения носителей заряда в полупроводниках.
17. p-n переход в равновесном состоянии. Формирование области пространственного заряда. Распределение заряда, поля и потенциала в переходе.
18. p-n переход при подаче внешнего напряжения. Движение носителей заряда в структуре при прямом и обратом смещениях. Идеальная ВАХ диода.
19. Барьерная емкость p-n перехода и сопротивление базы. Эквивалентная схема диода. Пробой p-n перехода. Реальная ВАХ p-n перехода. Зависимость тока диода от температуры.

20. Контакт металл-полупроводник. Формирование барьера Шоттки. Движение носителей заряда при подаче положительного и отрицательного смещений.
21. Идеальная структура металл-диэлектрик-полупроводник. Состояния поверхности в МДП-структуре при подаче внешнего напряжения: обогащение, обеднение, инверсия.
22. Принципы работы полупроводниковых фоторезисторов, фотодиодов и солнечных батарей.
23. Принципы работы светодиодов и полупроводниковых лазеров.
24. Конструкция и принцип работы классического биполярного транзистора в схеме с общей базой (зонные диаграммы, основные физические процессы, протекающие в структуре, вид ВАХ, эквивалентная схема).
25. Уравнения Эберса-Молла. Преимущества дрейфового и гетероструктурного биполярных транзисторов.
26. Структура, принцип работы и качественный вид ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п переходом. Преимущества транзистора с двумерным электронным газом (HEMT).
27. МДП полевой транзистор со встроенным каналом (конструкция, принцип работы, ВАХ).
28. МДП полевой транзистор с индуцированным каналом (конструкция, принцип работы, ВАХ).
29. Принципы работы туннельного и туннельно-резонансного диодов.
30. Принципы работы лавино- и инжекционно-пролетных диодов.
31. Зависимость средней скорости от напряженности электрического поля в GaAs. Конструкция и принцип работы диода Ганна. Причины нарастания и стабилизации домена в диоде Ганна.

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

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции, 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, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично».
очень хорошо	Все компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна

Оценка	Критерии оценивания
	компетенция сформирована на уровне «хорошо».
удовлетворительно	Все компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», но ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-7

1. Вывести дисперсионную характеристику для акустических фононов в полупроводниковых кристаллах. Рассчитать среднюю тепловую скорость электрона в кремнии при комнатной температуре и длину волны электрона.
2. Объяснить общие принципы закона Дебая для теплоемкости и рассчитать теплоемкость кремния и германия при температуре Дебая и при 10 К. Температура Дебая для кремния равна 658 К, для германия – 366 К.
3. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в германии при  $T=300$  К. Эффективную массу дырок считать равной  $0.36m_0$ , а электронов –  $0.55m_0$ , где  $m_0$  – масса электрона в вакууме. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре в германии составляет 0.66 эВ.
4. Концентрация электронов в собственном полупроводнике при 400 К оказалась равной  $1.38 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Найти произведение эффективных масс электронов и дырок, если ширина запрещенной зоны следующим образом зависит от температуры:  $W_g = 0.785 - 4 \cdot 10^{-4} T$  (эВ).
5. Вывести формулу для зависимости уровня Ферми от температуры в собственном полупроводнике. Найти положение уровня Ферми и концентрацию электронов в собственном германии при температуре 600 К, если известно, что ширина запрещенной зоны при таких температурах меняется по закону  $E_g = 0.7 - 3 \cdot 10^{-4} T$  эВ. Использовать значения эффективных масс  $m_n = 0.02 m_0$ ,  $m_p = 0.2 m_0$ .
6. 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  $\Upsilon = 100 \text{ см}^{-1}$ ; 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  $\mu_n/\mu_p = 2$ .
7. Объяснить распределение концентрации электронов, наличие электрического поля и потенциального барьера на границе  $n + -n$  - перехода. Используя условия равновесия в такой системе вывести соотношение Эйнштейна. Найти диффузионную длину электронов в невырожденном германии при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , если время жизни электронов составляет  $10^{-4} \text{ с}$ , а их подвижность  $3800 \text{ см}^2/\text{Вс}$ .

8. При  $T=300$  К удельное сопротивление образца собственного кремния составляет  $2.3 \cdot 10^5$  Ом·см. Какова концентрация собственных носителей заряда? Если через образец пропустить ток, то какая его часть будет обусловлена электронами? Считать, что  $\mu_p=1900$  см<sup>2</sup>/Вс;  $\mu_n=425$  см<sup>2</sup>/Вс.
9. Оценить среднюю скорость теплового движения электронов при комнатной температуре и дрейфовую скорость электронов на участке насыщения зависимости дрейфовой скорости от напряженности электрического поля в Si, если эффективная масса электронов в данном материале составляет  $m^* = 0.2m_0$ , а энергия оптического фонона  $\hbar\omega = 60$  мэВ.
10. Вывести вольт-амперную характеристику р-п перехода. Объяснить физическую природу обратного тока диода.
11. Оценить величину плотности тока тепловой генерации р-п перехода, если концентрации примесей в р и п областях составляют, соответственно,  $N_A=2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>,  $N_D=2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Подвижности дырок и электронов  $\mu_p=1900$  см<sup>2</sup>/Вс,  $\mu_n=3500$  см<sup>2</sup>/Вс. Времена жизни носителей заряда  $\tau_p=\tau_n=10^{-3}$  с. Концентрация носителей в собственном полупроводнике  $n_i=2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Найти величину тока в р-п переходе при внешнем напряжении  $V=+0,15$  В;  $-0,5$  В;  $-2$  В. Площадь перехода составляет 1 мм<sup>2</sup>.
12. Рассчитать контактную разность потенциалов в Ge р-п переходе. Удельное сопротивление р и п областей 2 Ом·см. Как изменится высота энергетического барьера при изменении напряжения с  $V=+0,15$  В до  $V=-5$  В? Нарисовать зонные диаграммы. Концентрация носителей в собственном полупроводнике  $n_i=2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.
13. Вывести вольт-амперную характеристику диода Шоттки.
14. Исходя из времени релаксации импульса ( $10^{-13}$  с), эффективной массы электронов (0.067  $m_0$  для GaAs и 0.2  $m_0$  для Si) и ширины запрещенной зоны (1.2 эВ в Si и 1.51 эВ в GaAs) оценить напряженность электрического поля, при которой возникает лавинный пробой в GaAs и Si.
15. Вычислить КПД GaAs солнечной батареи считая, что интенсивность солнечного излучения распределена по спектру равномерно, а диапазон длин волн излучения от 0.1 до 10 мкм.
16. 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). Почему темновой ток германиевого фотодиода больше, чем кремниевого?
17. Объяснить преимущества дрейфового транзистора с варизонной базой перед биполярным для чего численно оценить амплитуду встроенного поля в варизонной базе толщиной 1 мкм и  $\Delta W_g=0.4$  эВ и связанного с ним увеличения скорости носителей заряда (аналогично дрейфовому транзистору).
18. Вывести ВАХ ПТ с управляющим р-п переходом. Качественно объяснить отличия МДП транзисторов с индуцированным и встроенным каналом.
19. Вывести критерий Крамера для диода Ганна. Объяснить три режима работы диода Ганна в резонаторе (пролетный режим, режим запаздывания домена, режим гашения).

**Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)**

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции, 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, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично».
очень хорошо	Все компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо».
удовлетворительно	Все компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», но ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-7

1. Найти связь между номером зоны генерации  $n$  и потенциалом  $U_{отр}$  отражателя в отражательном клистроне.
2. Найти величину параметра группировки и номер зоны генерации для отражательного клистрона при следующих параметрах:  $U_0=300$  В,  $U_{отр}=50$  В,  $f=500$  МГц,  $D=5$  мм,  $U_{1M}=40$  В,  $d=2$  мм.
3. Оценить, на каком расстоянии  $x$  от замедляющей системы надо пропускать электронный пучок, если  $\lambda = 3$  см,  $U_0=1$  кВ.
4. Найти коэффициент усиления  $G$  в ЛБВ-О, если длина лампы  $L=10$  см,  $\lambda = 3$  см,  $U_0=4$  кВ,  $R_c=10$  ом,  $I_0=10$  мА, считая, что влиянием поля пространственного заряда можно пренебречь, а скорость электронного пучка равна холодной фазовой скорости волны.
5. На сколько скорость электронного пучка должна превышать холодную фазовую скорость волны, чтобы в ЛБВ-О отсутствовала экспоненциально нарастающая волна ?  $U_0=1$  кВ,  $R_c=40$  ом,  $I_0=100$  мА. Полем пространственного заряда пренебречь.

6. В ЛБВ-О отношение ускоряющих напряжений при работе на 1-ой и 3-ей пространственных гармониках  $U_{01}/U_{03}=1.4$ . Определить постоянную распространения нулевой гармоники  $\alpha$ , если период системы  $D=4\text{ мм}$ .
7. Найти величину фазовой скорости в ЛБВ-М на границах полосы усиления, если  $\lambda = 3\text{ см}$ ,  $I_0=3\text{ мА}$ ,  $R_c=50\text{ Ом}$ , магнитное поле  $B=100\text{ Гс}$ , потенциалы отрицательного электрода и замедляющей системы относительно катода соответственно  $U_1=-100\text{ В}$ ,  $U_2=900\text{ В}$ , а расстояние между ними  $d=1\text{ см}$ .
8. Найти фазовую скорость для  $\pi$ -вида колебаний в 24-резонаторном магнетроне, если  $\lambda = 10\text{ см}$ ,  $R_a=5\text{ см}$ . Чему примерно равно замедление и анодное напряжение?
9. Оценить оптимальные параметры гиротрона, если  $U_0=70\text{ кВ}$ ,  $\lambda = 2.14\text{ мм}$ ,  $g=1$ , длина резонатора  $L=10$ .

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки. Студент решает задачу; возможны негрубые ошибки в расчетах.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не решает задачу или допускает грубые ошибки в расчетах.

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

Основная литература:

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы / Сушков А. Д. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 464 с. - Рекомендовано УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров, магистров и дипломированных специалистов «Электроника и микроэлектроника». - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 5-8114-0530-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799600&idb=0>.
2. Злобина А. Ф. Вакуумная и плазменная электроника : учебное пособие / Злобина А. Ф., Аксенов А. И. - Москва : ТУСУР, 2021. - 133 с. - Книга из коллекции ТУСУР - Инженерно-технические науки., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=861986&idb=0>.
3. 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.
4. Гаман Василий Иванович. Физика полупроводниковых приборов : учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., доп. и перераб. - Томск : Изд-во НТЛ, 2000. - 426 с. - Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки на 1997 - 2000 гг.". - ISBN 5-89503-081-5 : 42.00., 43 экз.

Дополнительная литература:

1. Гришаев В. Я. Физика полупроводниковых приборов / Гришаев В. Я., Никишин Е. В. - Саранск : МГУ им. Н.П. Огарева, 2020. - 72 с. - Книга из коллекции МГУ им. Н.П. Огарева - Физика. - ISBN 978-5-7103-4037-0., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=798558&idb=0>.

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

База данных по физическим свойствам полупроводников:  
<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 ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 11.05.02 - Специальные радиотехнические системы.

Автор(ы): Мануилов Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор  
Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 16.01.2024 г., протокол № №1.