

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 6 от 31.05.2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физика полупроводников

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника

---

Направленность образовательной программы

Радиофотоника и оптоэлектроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2021 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.15 Физика полупроводников 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-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1: Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы ОПК-1.2: Умеет применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера ОПК-1.3: Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач	ОПК-1.1: Знать фундаментальные законы природы для математического описания физических параметров полупроводников  ОПК-1.2: Уметь применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера зонной структуры полупроводников  ОПК-1.3: Владеть навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач эксплуатации полупроводников	Коллоквиум	Экзамен: Контрольные вопросы
ОПК-6 ОС ВО ННГУ: Способность применять фундаментальные знания о физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в	ОПК-6 ОС ВО ННГУ.1: Знает фундаментальные основы нанотехнологий, физические свойства систем с пониженной размерностью ОПК-6 ОС ВО ННГУ.2: Знает современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности	ОПК-6 ОС ВО ННГУ.1: Знать фундаментальные основы нанотехнологий, физических свойств систем с пониженной размерностью на основе полупроводников  ОПК-6 ОС ВО ННГУ.2: Знать современные тенденции развития нанотехнологий создания полупроводниковых квантоворазмерных	Коллоквиум	Экзамен: Контрольные вопросы

своей профессиональной деятельности	ОПК-6 ОС ВО ННГУ.3: Умеет применять знания об основах нанотехнологий и физических свойствах систем с пониженной размерностью в своей профессиональной деятельности	наногетероструктур в своей профессиональной деятельности  ОПК-6 ОС ВО ННГУ.3: Уметь применять знания физики полупроводников в своей профессиональной деятельности		
-------------------------------------	---	--	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>4</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>64</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>0</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>42</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

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

Наименование и краткое содержание 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	10	4	0	4	6
Основы зонной теории твердого тела	16	10	0	10	6
Статистика равновесных электронов и дырок	16	10	0	10	6
Статистика неравновесных электронов и дырок	16	10	0	10	6
Оптические свойства полупроводников	16	10	0	10	6
Люминесценция и стимулированное излучение	16	10	0	10	6
Явления переноса заряда в полупроводниках	16	10	0	10	6
Аттестация	36				

КСР	2			2	
Итого	144	64	0	66	42

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

1. Павлов Д.А., Планкина С.М., Кудрин А.В. «Эффект Холла (практикум)» Печатн. Н.Новгород, изд-во ННГУ. 2013. 23 стр./ 19 стр.
2. Павлов Д.А., Планкина С.М., Кудрин А.В. «Эффект Холла (практикум)» Комп. издание. Фонд компьютерных изданий ННГУ <http://www.unn.ru/books/resources.html> Регистрационный номер 576.13.05, 2013 23 стр./ 19 стр.
3. Планкина С.М., Кудрин А.В. «Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла». Н.Новгород: Печ. Издание Н. Новгород, изд-во ННГУ, 2016 16 с./12
4. Планкина С.М., Кудрин А.В. «Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла». Н.Новгород: Комп. Издание Фонд компьютерных изданий ННГУ <http://www.unn.ru/rus/books/table.html> Регистрационный номер 780.14.05, 2014 16 с./12
5. Павлов Д.А., Планкина С.М. «Вольтамперные и вольтфарадные характеристики р-п перехода». Практикум Н.Новгород: Печ. Изд. Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2019. 14 с.
6. Шилова М.В. «Исследование собственного поглощения в полупроводниках» Физика твердого тела: Лабораторный практикум в 2 томах под редакцией проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические основы твердых тел. Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2000. с. 246.
7. Шилова М.В., Попов Ю.С. «Исследование спектральной зависимости фоточувствительности полупроводников» Физика твердого тела: Лабораторный практикум в 2 томах под редакцией проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические основы твердых тел. Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2000. с. 279.

#### **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 - Коллоквиум) для оценки сформированности компетенции ОПК-1**

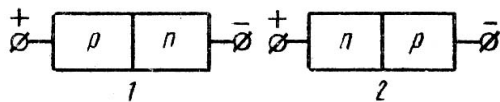
##### **Вопросы:**

1. Элемент какой группы следует ввести в полупроводник, относящийся к IV группе, чтобы получить в нем проводимость n-типа?
2. Элемент какой группы следует ввести в полупроводник, относящийся к IV группе, чтобы получить проводимость p-типа?
3. Добавление элемента V группы привело к возникновению проводимости n-типа. К какой группе относится полупроводник?
4. Какие носители тока являются основными в полупроводниках p-типа?
5. Какие носители тока являются неосновными в полупроводниках n-типа?

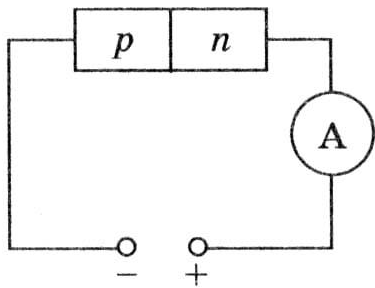
### 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Коллоквиум) для оценки сформированности компетенции ОПК-6 ОС ВО ННГУ

#### Вопросы:

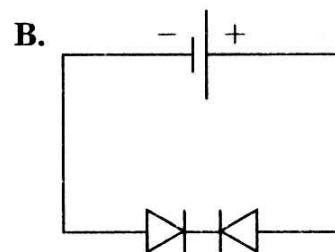
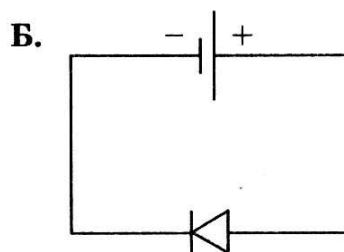
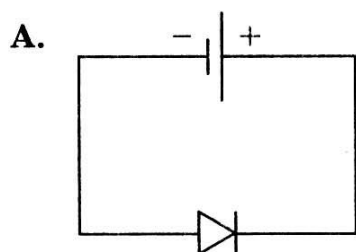
6. Какими носителями электрического заряда создается ток в полупроводниках?
7. Каким типом проводимости обладают полупроводники с акцепторной примесью?
8. Каким типом проводимости обладают чистые полупроводники?
9. Каким типом проводимости обладают полупроводники с донорной примесью?
10. В полупроводнике ток, переносимый электронами –  $I_e$ , и ток, переносимый дырками –  $I_h$ . Если полупроводник обладает собственной проводимостью, то какое соотношение токов будет верным?
11. В полупроводнике ток, переносимый электронами –  $I_e$ , и ток, переносимый дырками –  $I_h$ . Если полупроводник обладает проводимостью р-типа, то какое соотношение токов будет верным?
12. В полупроводнике ток, переносимый электронами –  $I_e$ , и ток, переносимый дырками –  $I_h$ . Если полупроводник обладает проводимостью n-типа, то какое соотношение токов будет верным?
13. На рисунке показаны два возможных включения р-п-перехода. Укажите, в каком случае р-п-переход включен в прямом направлении.



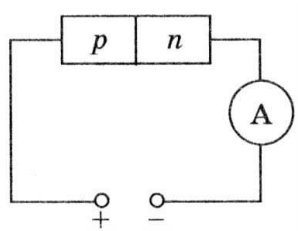
14. К полупроводнику р-п-типа подключен источник тока, как показано на рисунке. Будет ли амперметр регистрировать ток в цепи?



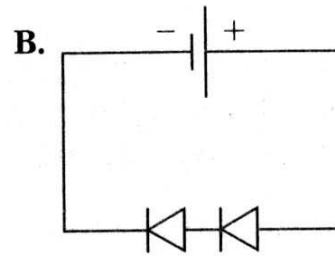
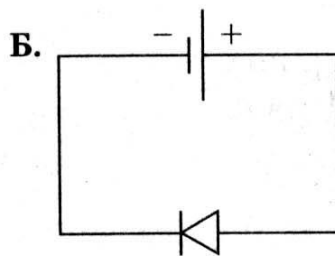
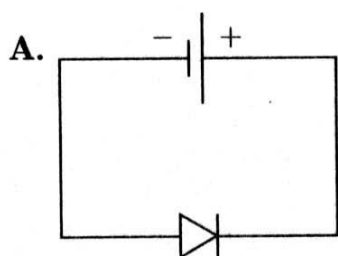
15. На рисунке представлены три варианта включения полупроводниковых диодов в электрическую цепь с одним и тем же источником тока. В каком случае сила тока в цепи будет иметь максимальное значение?



16. К полупроводнику р-п-типа подключен источник тока, как показано на рисунке. Будет ли амперметр регистрировать ток в цепи?



17. На рисунке представлены три варианта включения полупроводниковых диодов в электрическую цепь с одним и тем же источником тока. В каком случае сила тока в цепи будет иметь минимальное значение?



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

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	5 баллов
не зачтено	0 баллов

#### 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 и 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 некоторым и недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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

	<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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации

#### 5.3.1 Типовые задания, выносимые на промежуточную аттестацию:

#### Оценочное средство - Контрольные вопросы

#### Экзамен

#### Критерии оценивания (Контрольные вопросы - Экзамен)

<b>Оценка</b>	<b>Критерии оценивания</b>
превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.



Оценка	Критерии оценивания
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая передача возможна только с комиссией.

**Типовые задания (Контрольные вопросы - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ОПК-1** (Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности)

Основные экзаменационные вопросы

Тема: 1. Введение ОПК-1

1. Общая характеристика (классификация) проводников электричества. Классическая теория электронной проводимости. Закон Ома. Механизмы образования носителей тока. Примесная и дырочная проводимость.
2. Основные химические классы полупроводников. Элементарные полупроводники. Полупроводники типа  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$ ,  $A^4B^6$ . Органические полупроводники.

Тема: 2. Основы зонной теории твердого тела ОПК-1, ОПК ОС-6

3. Основы зонной теории твёрдого тела. Уравнение Шредингера. Свободная частица. Атом водорода. Уравнение Шредингера для кристалла. Основные приближения зонной теории твёрдого тела. Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Энергетический спектр свободного электрона, атома и кристалла.
4. Волновая функция электрона в периодическом поле. Теорема Блоха. Следствия теоремы Блоха. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна в кубических кристаллах.
5. Приближение эффективной массы. Электроны и дырки в кристалле. Зонная модель твёрдых тел (металлы, полупроводники и диэлектрики). Заполнение зон.
6. Модель Кронига-Пенни.
7. Структура энергетических зон полупроводников. Понятие простой зонной структуры. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Зонная структура кремния, германия, арсенида галлия, антимонида индия и сложных алмазоподобных полупроводников ( $GaAs_{1-x}P_x$  и т.п.).
8. Водородоподобная модель примесных центров и энергетических уровней в кристалле. Локализованные состояния на поверхности кристалла.

Тема: 3. Статистика равновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

9. Статистика равновесных электронов и дырок в полупроводнике. Общая характеристика равновесного состояния. Принцип детального равновесия. Модель полупроводника.
10. Функция плотности состояний  $g(E)$  и масса плотности состояний для стандартной и нестандартных зонных структур. Плотность состояний на дискретных примесных центрах.
11. Функция распределения. Определение уровня Ферми. Распределение электронов и дырок по энергии в энергетических зонах. Концентрации электронов и дырок в зонах и на примесных уровнях как функции уровня Ферми. Условие электрической

нейтральности полупроводника.

12. Собственный полупроводник. Зависимость концентрации, уровня Ферми и ширины запрещённой зоны от температуры.
13. Условие равновесия электронов и дырок в невырожденном полупроводнике. Некомпенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
14. Компенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
15. Сильно легированные полупроводники. Вырождение электронного (дырочного) газа и его свойства.

Тема: 4. Статистика неравновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

16. Статистика неравновесных электронов и дырок. Время жизни носителей тока. Стационарные концентрации неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми.
17. Уравнение непрерывности. Классификация механизмов рекомбинации.
18. Межзонная излучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
19. Межзонная безызлучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
20. Рекомбинация через ловушки. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
21. Рекомбинация при наличии нескольких типов ловушек. Центры прилипания в полупроводниках и их влияние на кинетику неравновесных процессов в полупроводниках.

Дополнительные экзаменационные вопросы

Тема: 1. Введение ОПК-1

1. Дайте определение подвижности носителей заряда. В каких единицах она измеряется?
2. Запишите закон Ома в дифференциальной форме. Как связана проводимость с концентрацией и подвижностью носителей заряда. В каких единицах она измеряется?
3. Нарисуйте зависимость  $n(T)$ ,  $\mu(T)$  и  $\sigma(T)$  в координатах Аррениуса.
4. Назовите известные Вам структурные типы. Какой структурный тип у полупроводников Si, Ge, GaAs?

Тема: 2. Основы зонной теории твердого тела ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

5. Запишите уравнение Шредингера в самом общем виде (временное и стационарное).
6. Запишите выражение для энергетического спектра состояний электрона в атоме водорода.
7. Запишите выражение для волновой функции Блоха.
8. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в одноэлектронном приближении.

9. Дайте определение понятия «зоны Бриллюэна».
10. Какой многогранник описывает зону Бриллюэна в кубических кристаллах (примитивная ячейка, ОЦК, ГЦК)?
11. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в приближении эффективной массы. Каков ее смысл?
12. Раскройте понятие стандартной (простой) зонной структуры.
13. Перечислите отклонения реальной зонной структуры от простой (стандартной).
14. Чему равна ширина запрещенной зоны основных полупроводников (Si, Ge, GaAs)?
15. Нарисуйте (качественно) зонную структуру Si, Ge, GaAs.

Тема: 3. Статистика равновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

16. Нарисуйте общую модель полупроводника, используемую в статистике равновесных электронной и дырок.
17. Что такое функция плотности состояний? В каких единицах она измеряется?
18. Что такое функция распределения? В каких единицах она измеряется?
19. Запишите выражение для  $g_c(E)$  и  $g_v(E)$ .
20. Запишите выражение функции Ферми-Дирака.
21. Запишите уравнение электронейтральности полупроводника в самом общем виде.
22. Нарисуйте ход температурной зависимости положения уровня Ферми в полупроводнике n – типа (некомпенсированном).
23. Напишите выражение для концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике (в зависимости от температуры).
24. Как по наклону зависимости  $\lg n_i = f(10^3/T)$  определить  $\Delta E_g$ ?
25. Как ширина запрещенной зоны зависит от температуры?
26. Постройте зависимость  $\lg n = f(10^3/T)$  для некомпенсированного полупроводника n – типа. Что по ней можно определить?
27. Что такое некомпенсированный полупроводник?
28. Что такое вырожденный полупроводник? Критерий вырождения.

Тема: 4. Статистика неравновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

29. Дайте определение времени жизни.
30. Запишите уравнение непрерывности для электронов и дырок.
31. Поясните термины: межзонная излучательная рекомбинация, межзонная безызлучательная рекомбинация, рекомбинация через ловушки.
32. Чем отличаются центры рекомбинации от центров прилипания?

**Типовые задания (Контрольные вопросы - Экзамен) для оценки сформированности компетенции ОПК-6 ОС ВО ННГУ (Способность применять фундаментальные знания о**

физических свойствах систем с пониженной размерностью и учитывать современные тенденции развития нанотехнологий в своей профессиональной деятельности)

Основные экзаменационные вопросы

Тема: 2. Основы зонной теории твердого тела ОПК-1, ОПК ОС-6

3. Основы зонной теории твёрдого тела. Уравнение Шредингера. Свободная частица. Атом водорода. Уравнение Шредингера для кристалла. Основные приближения зонной теории твёрдого тела. Адиабатическое приближение и валентная аппроксимация. Одноэлектронное приближение. Энергетический спектр свободного электрона, атома и кристалла.
4. Волновая функция электрона в периодическом поле. Теорема Блоха. Следствия теоремы Блоха. Ячейка Вигнера-Зейтца. Зоны Бриллюэна в кубических кристаллах.
5. Приближение эффективной массы. Электроны и дырки в кристалле. Зонная модель твёрдых тел (металлы, полупроводники и диэлектрики). Заполнение зон.
6. Модель Кронига-Пенни.
7. Структура энергетических зон полупроводников. Понятие простой зонной структуры. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Зонная структура кремния, германия, арсенида галлия, антимонида индия и сложных алмазоподобных полупроводников ( $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  и т.п.).
8. Водородоподобная модель примесных центров и энергетических уровней в кристалле. Локализованные состояния на поверхности кристалла.

Тема: 3. Статистика равновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

9. Статистика равновесных электронов и дырок в полупроводнике. Общая характеристика равновесного состояния. Принцип детального равновесия. Модель полупроводника.
10. Функция плотности состояний  $g(E)$  и масса плотности состояний для стандартной и нестандартных зонных структур. Плотность состояний на дискретных примесных центрах.
11. Функция распределения. Определение уровня Ферми. Распределение электронов и дырок по энергии в энергетических зонах. Концентрации электронов и дырок в зонах и на примесных уровнях как функции уровня Ферми. Условие электрической нейтральности полупроводника.
12. Собственный полупроводник. Зависимость концентрации, уровня Ферми и ширины запрещённой зоны от температуры.
13. Условие равновесия электронов и дырок в невырожденном полупроводнике. Некомпенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
14. Компенсированный примесный полупроводник. Зависимость концентрации и уровня Ферми от уровня легирования и температуры.
15. Сильно легированные полупроводники. Вырождение электронного (дырочного) газа и его свойства.

Тема: 4. Статистика неравновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

16. Статистика неравновесных электронов и дырок. Время жизни носителей тока. Стационарные концентрации неравновесных носителей. Квазиуровни Ферми.
17. Уравнение непрерывности. Классификация механизмов рекомбинации.
18. Межзонная излучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
19. Межзонная безызлучательная рекомбинация. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
20. Рекомбинация через ловушки. Зависимость времени жизни от уровня легирования и температуры.
21. Рекомбинация при наличии нескольких типов ловушек. Центры прилипания в полупроводниках и их влияние на кинетику неравновесных процессов в полупроводниках.

Тема: 5. Оптические свойства полупроводников ОПК-6 ОС ВО ННГУ

22. Оптические свойства твердых тел. Оптические коэффициенты. Механизмы поглощения света в полупроводниках. Собственное (фундаментальное или межзонное) поглощение. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Бурштейна-Мосса. Экситоны и экситонное поглощение. Примесное поглощение излучения. Поглощение излучения свободными носителями.

Тема: 6. Люминесценция и стимулированное излучение ОПК-6 ОС ВО ННГУ

23. Люминесценция полупроводников. Внутрицентровая (примесная) фотолюминесценция. Рекомбинационная фотолюминесценция в полупроводниках. Экситонная люминесценция. Межзонная фотолюминесценция. Примесная фотолюминесценция. Примесная фотолюминесценция на донорно-акцепторных парах. Кинетика фотолюминесценции. Температурная зависимость фотолюминесценции.
24. Стимулированное излучение. Твердотельные лазеры. 3-х и 4-х уровневые системы. Спектр излучения лазера. Угловая расходимость пучка. Мощность излучения. Рубиновый лазер. Лазер с модулированной добротностью. Лазерные материалы. Применение твердотельных лазеров. Полупроводниковые лазеры.

Тема: 7. Явления переноса заряда в полупроводниках ОПК-6 ОС ВО ННГУ

25. Явления переноса заряда в полупроводниках. Общая теория явлений переноса заряда. Общее выражение для плотности тока. Кинетическое уравнение Больцмана и его решение.
26. Рассеяние носителей тока. Время релаксации импульса. Механизмы рассеяния. Рассеяние на акустических и оптических фононах. Пьезоэлектрическое рассеяние. Рассеяние на ионизированной и нейтральной примеси.
27. Электропроводность полупроводников и связанные с ней явления. Дрейфовая подвижность. Рассеяние на акустических фононах, на ионизированной и на нейтральной примеси.
28. Температурная зависимость электропроводности полупроводников.

Дополнительные экзаменационные вопросы

Тема: 2. Основы зонной теории твердого тела ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

5. Запишите уравнение Шредингера в самом общем виде (временное и стационарное).
6. Запишите выражение для энергетического спектра состояний электрона в атоме водорода.
7. Запишите выражение для волновой функции Блоха.
8. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в одноэлектронном приближении.
9. Дайте определение понятия «зоны Бриллюэна».
10. Какой многогранник описывает зону Бриллюэна в кубических кристаллах (примитивная ячейка, ОЦК, ГЦК)?
11. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в приближении эффективной массы. Каков ее смысл?
12. Раскройте понятие стандартной (простой) зонной структуры.
13. Перечислите отклонения реальной зонной структуры от простой (стандартной).
14. Чему равна ширина запрещенной зоны основных полупроводников (Si, Ge, GaAs)?
15. Нарисуйте (качественно) зонную структуру Si, Ge, GaAs.

Тема: 3. Статистика равновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

16. Нарисуйте общую модель полупроводника, используемую в статистике равновесных электронной и дырок.
17. Что такое функция плотности состояний? В каких единицах она измеряется?
18. Что такое функция распределения? В каких единицах она измеряется?

19. Запишите выражение для  $g_c(E)$  и  $g_v(E)$ .
20. Запишите выражение функции Ферми-Дирака.
21. Запишите уравнение электронейтральности полупроводника в самом общем виде.
22. Нарисуйте ход температурной зависимости положения уровня Ферми в полупроводнике n – типа (некомпенсированном).
23. Напишите выражение для концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике (в зависимости от температуры).
24. Как по наклону зависимости  $\lg n_i = f(10^3/T)$  определить  $\Delta E_g$ ?
25. Как ширина запрещенной зоны зависит от температуры?
26. Постройте зависимость  $\lg n = f(10^3/T)$  для некомпенсированного полупроводника n – типа. Что по ней можно определить?
27. Что такое некомпенсированный полупроводник?
28. Что такое вырожденный полупроводник? Критерий вырождения.

Тема: 4. Статистика неравновесных электронов и дырок ОПК-1, ОПК-6 ОС ВО ННГУ

29. Дайте определение времени жизни.
30. Запишите уравнение непрерывности для электронов и дырок.
31. Поясните термины: межзонная излучательная рекомбинация, межзонная безызлучательная рекомбинация, рекомбинация через ловушки.
32. Чем отличаются центры рекомбинации от центров прилипания?

Тема: 5. Оптические свойства полупроводников ОПК-6 ОС ВО ННГУ

33. Что такое оптические коэффициенты (интегральные)?
34. Запишите закон Бюргера – Ламберта в дифференциальной форме.
35. Каков смысл дифференциального коэффициента поглощения  $\alpha$ ? В каких единицах он измеряется?
36. Связь красной границы собственного поглощения с шириной запрещенной зоны в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках.
37. Перечислите механизмы оптического поглощения в полупроводниках.
38. В чем суть эффекта Франца – Келдыша?
39. В чем суть эффекта Бурштейна – Мосса?

Тема: 6. Люминесценция и стимулированное излучение ОПК-6 ОС ВО ННГУ

40. Назовите основные механизмы фотолюминесценции.
41. Как создать условия для возникновения стимулированного излучения в твердом теле?
42. Чем многомодовый лазер отличается от одномодового?
43. Принцип работы лазера с модулированной добротностью.
44. Принцип работы инжекционного лазера.

Тема: 7. Явления переноса заряда в полупроводниках ОПК-6 ОС ВО ННГУ

45. Перечислите основные механизмы рассеяния носителей в полупроводнике.

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

Основная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников : [учеб. для вузов]. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Энергия, 1976. - 416 с. : ил. - 1.12., 14 экз.
2. Шалимова К. В. Физика полупроводников / Шалимова К. В. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 384 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-0922-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799695&idb=0>.
3. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела : учебник. - 3-е изд., стер. - М. : Высшая школа, 2000. - 494 с. - 78.54., 33 экз.
4. Киреев Петр Семенович. Физика полупроводников : [учеб. пособие для вузов]. - Изд. 2-е, доп. - М. : Высшая школа, 1975. - 584 с. - 1.37., 22 экз.
5. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. - М. : Наука, 1990. - 685 с. : ил. - ISBN 5-02-014032-5 : 2.00., 7 экз.
6. 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.

#### Дополнительная литература:

1. Зеегер К. Физика полупроводников : пер. с англ. Р. Бразиса [и др.] / под ред. Ю. К. Пожелы. - М. : Мир, 1977. - 615 с. : ил. - 2.90., 14 экз.
2. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / [пер. под общ. ред. А. А. Гусева]. - Изд. 2-е, стер., перепеч. с изд. 1978 г. - М. : МедиаСтар, 2006. - 792 с. - 525.00., 45 экз.
3. Викулин Иван Михайлович. Физика полупроводниковых приборов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1990. - 263, [1] с. : ил. - ISBN 5-256-00565-0 : 1.30., 2 экз.
4. Ансельм Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - 2-е изд., доп. и перераб. - М. : Наука, 1978. - 615 с. : ил. - 1.60., 25 экз.
5. Ю Питер. Основы физики полупроводников = Fundamentals of Semiconductors / пер. с англ. И. И. Решиной ; под ред. Б. П. Захарчени. - М. : Физматлит, 2002. - 560 с. - ISBN 5-9221-0268-0 : 56.00., 3 экз.

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

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ  
<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»  
<http://spen.phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ  
<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов  
<http://www.ph4s.ru> - Образовательный проект А.Н. Варгина

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

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Телевизор и проектор для презентаций  
 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 11.03.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.