МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Юго-Западный государственный университет

|  |  |
| --- | --- |
|  | УТВЕРЖДАЮ:  Проректор по научной работе и международной деятельности *(наименование должности полностью)*  Е.Г. Пахомова  *(подпись, инициалы, фамилия)*  «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ г. |

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Физика полупроводников

*(наименование дисциплины)*

научная специальность

1.3.11. Физика полупроводников

форма обучения очная

Курск – 2023

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными приказом Минобрнауки России от 20.10.2021 № 951, на основании учебного плана научной специальности 1.3.11. Физика полупроводников, одобренного Ученым советом университета, протокол №12 от «29» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины обсуждена и рекомендована к применению в образовательном процессе для обучения аспирантов по научной специальности 1.3.11. Физика полупроводников на заседании кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, протокол №1 от «31» августа 2023 г.

*(наименование кафедры, дата, номер протокола)*

Зав. кафедрой А.Е. Кузько

Разработчик программы д.ф.-м.н., профессор А.П. Кузьменко

*( ученая степень и ученое звание, Ф.И.О.)*

Согласовано:

Директор научной библиотеки В.Г. Макаровская

Заведующая сектором аспирантуры и докторантуры \_\_\_\_\_\_\_\_\_М.В. Калинина

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и рекомендована к применению в образовательном процессе на основании учебного плана \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, одобренного Ученым советом университета протокол №\_ «\_\_»\_\_\_\_\_\_20\_г. на заседании кафедры\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*(наименование кафедры, дата, номер протокола)*

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и рекомендована к применению в образовательном процессе на основании учебного плана \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, одобренного Ученым советом университета протокол №\_ «\_\_»\_\_\_\_\_\_20\_г. на заседании кафедры\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*(наименование кафедры, дата, номер протокола)*

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и рекомендована к применению в образовательном процессе на основании учебного плана \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, одобренного Ученым советом университета протокол №\_ «\_\_»\_\_\_\_\_\_20\_г. на заседании кафедры\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*(наименование кафедры, дата, номер протокола)*

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**1 Планируемые результаты обучения, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

**1.1 Цель преподавания дисциплины**

Целью курса «Физика полупроводников» является формирование знаний о физике полупроводников.

**1.2 Задачи изучения дисциплины**

Основной задачей изучения дисциплины является освоение основ физики твердого тела, касающейся физических явлений в полупроводниках. Эта задача подразделяется на:

* изучение основ кристаллографии;
* изучение основ движения носителей заряда в твердых телах с периодической структурой;
* изучение основных механизмов формирования сопротивления в полупроводниковых материалах в широком диапазоне температур.
* изучение оптических свойств полупроводников;

**знaть:**

- фундаментальные законы и свойства квантовой физики, кристаллографии, физики полупроводников, фундаментальные закономерности физики полупроводниковых наноструктур, и приемы работы с ними для профессиональной деятельности;

- - основные методики теоретического и экспериментального исследования полупроводниковых материалов, способы их модификации и устранения или учета мешающих факторов;

**уметь:**

- подбирать наиболее эффективные методики для измерения основных параметров полупроводников и анализировать результаты измерений;

- подбирать необходимые полупроводниковые материалы и наноструктуры для наблюдения и использования современных научных достижений в физике полупроводников для оценки степени их перспективности в плане практического применения;

**влaдеть:**

- способностью выявления области применения фундаментальных закономерностей физики полупроводников для поиска и моделирования полупроводникового материала (в том числе наноструктурированного) с заданными свойствами;

- современным программно-аппаратным инструментарием для исследования физических свойств полупроводников, навыками критического анализа и оценки полученных результатов, навыками самоанализа и самооценки, генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

**2 Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к основным дисциплинам раздела 2.1 образовательного компонента (2.1.4) учебного плана научной специальности 1.3.11, курс 4, семестр 8.

**3 Содержание и объем дисциплины**

**Содержание дисциплины и лекционных занятий**

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 6 зачетных единиц (з.е.), 216 часов.

**Таблица 3.1 –Объём дисциплины по видам учебных занятий**

| Объём дисциплины | Всего,  часов |
| --- | --- |
| Общая трудоемкость дисциплины | 216 |
| Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего) | 54 |
| в том числе: |  |
| лекции | 36 |
| лабораторные занятия | не предусмотрено |
| практические занятия | 18 |
| экзамен | 0 |
| зачет | не предусмотрено |
| Аудиторная работа (всего): | 54 |
| в том числе: |  |
| лекции | 36 |
| лабораторные занятия | не предусмотрено |
| практические занятия | 18 |
| Самостоятельная работа обучающихся (всего) | 162 |

**Таблица 3.2 – Содержание дисциплины и ее методическое обеспечение**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п\п | Разделы, темы дисциплины | Виды деятельности | | | Учебно-методические материалы | Формы текущего контроля успеваемости (*по неделям семестра*) Форма промежуточной аттестации *(по семестрам)* |
| № лек., час | № лаб., час | № пр., час |
| 1 | 2 | 3 |  | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Предмет и задачи курса «Физика полупроводников» | 1-2ч | 0 | 1-2ч | У-1  У-2 | КО |
| 2 | Основы кристаллографии. | 2-4ч | 0 | 2-2ч | У-1  У-2 | КО |
| 3 | Электроны и дырки в полупроводниках | 3-6ч | 0 | 3-4ч | У-1  У-2  У-3  У-4 | К |
| 4 | Собственные и примесные полупроводники | 4-6ч | 0 | 4-2ч | У-1  У-2  У-3  У-4 | КО |
| 5 | Неравновесные процессы в полупроводниках | 5-4ч | 0 | 5-2ч | У-1  У-2  У-5 | К |
| 6 | Уравнение баланса носителей в полупроводнике | 6-6ч | 0 | 6-2ч | У-1  У-4  У-5 | КО |
| 7 | Оптические свойства полупроводников. | 7-4ч | 0 | 7-2ч | У-1  У-2  У-4  У-5 | К |
| 8 | Полупроводниковые наноструктуры | 8-4ч | 0 | 8-2ч | У-1  У-2 | КО |
|  | Итого 72 часа, из них: | 36 |  | 18 |  | экзамен (8 семестр). |

**Таблица 3.3 – Краткое содержание лекционного курса**

| № п/п | Раздел (тема) дисциплины | Содержание |
| --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Предмет и задачи курса «Физика полупроводников» | История изучения полупроводников. Достижения российской (советской) научной школы по физике полупроводников. Классификация твердых тел по проводимости. Основные понятия квантовой физики при изучении полупроводниковых веществ. Основы зоной теории. Классификация твердых тел по ширине запрещенной зоны. Элементы зонной теории твердых тел. Основные приближения зонной теории. Типы химических связей, строение полупроводниковых кристаллов. Трактовка запрещенной зоны энергий. |
| 2 | Основы кристаллографии. | Периодичность в природе и в твердых телах. Типы кристаллической структуры. Кристаллическая решетка. Симметрия в твердом теле. Точечные элементы симметрии. Дальний и ближний порядки. Элементарная ячейка. Индексы. Вектор трансляции. Параметры решетки. Основные понятия кристаллографии. Узел. Направление. Плоскость. Совокупность плоскостей. Операции с индексами. Дефекты кристаллической решетки и их роль в формировании свойств полупроводника. Нульмерные. Одномерные. Двумерные. Техмерные. Проводимость твердых тел. |
| 3 | Электроны и дырки в полупроводниках | Движение электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Квазиимпульс, зоны Бриллюэна. Подвижность и эффективная масса. Закон дисперсии, электроны и дырки. Динамика электрона в идеальной кристаллической решетке. Энергетический спектр электрона в кристалле. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электрон-фононное рассеяние, рассеяние на ионизированных атомах примеси. Температурная зависимость подвижности носителей. Температурная зависимость удельной электропроводности металлов. |
| 4 | Собственные и примесные полупроводники | Примесные атомы, примесная проводимость, доноры и акцепторы. Примесная проводимость с точки зрения зонной теории. Примесные уровни. Энергия активации примесных атомов. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Концентрация электронов и дырок в зонах. Невырожденные полупроводники. Собственные полупроводники, условие электронейтральности, положение уровня Ферми, равновесная концентрация носителей заряда. Примесные полупроводники, равновесная концентрация носителей заряда в области истощения примесных атомов, положение уровня Ферми. Равновесная концентрация носителей заряда при низких температурах, положение уровня Ферми. Случай сильного вырождения. Проводимость полупроводников и ее температурная зависимость. |
| 5 | Неравновесные процессы в полупроводниках | Механизмы рассеяния носителей заряда и температурная зависимость их подвижности. Равновесные и неравновесные носители заряда. Понятие о квазиуровнях Ферми. Рекомбинационные эффекты. Скорость генерации, рекомбинации и время жизни свободных носителей заряда. Различные типы процессов рекомбинации. Рекомбинация зона-зона, время жизни свободных носителей. Рекомбинация через примеси и дефекты. Стационарные состояния. Большой уровень возбуждения, малый уровень возбуждения, времена жизни свободных носителей. Поверхностные явления в полупроводниках. Поверхностная рекомбинация. |
| 6 | Уравнение баланса носителей в полупроводнике | Дрейф и диффузия носителей заряда. Соотношения Эйнштейна. Уравнение непрерывности и уравнение диффузии. Уравнение непрерывности для полупроводников с учетом дрейфового тока, генерации и рекомбинации носителей заряда. Термоэлектрические и гальваномагнитные явления в полупроводниках. Электрические свойства кремния, германия, арсенида галлия. Строение кристаллической решетки, зонная структура. Подвижность носителей, их эффективная масса. Перенос носителей заряда в тонких пленках. Физические ограничения режимов работы полупроводниковых приборов. |
| 7 | Оптические свойства полупроводников. | Характеристики излучения. Законы Планка, Стефана- Больцмана, Вина. Пропускание атмосферы и спектральные области применения полупроводниковых фотоприемников. Оптические свойства полупроводников и их влияние на параметры фотоприемников. Люминесценция полупроводников Основные понятия и определения. Рекомбинационное излучение. Теория Ван Русбрека-Шокли. Условие инверсной населенности. Усиление излучения. Условия получения лазерного режима. Светодиоды и оптроны Диодные источники излучения. Инжекционная электролюминесценция. Материалы, используемые для конструирования светодиодов. Коэффициенты инжекции, пропускания и вывода. Оптроны и оптоэлектронные схемы. Определение оптрона, его устройство, принцип действия. Классификация оптронов. Системы параметров оптронов. Полупроводниковые лазеры Устройство и типы приборов. Вклад российских ученых в развитие квантовой электроники. Основные параметры лазеров: диаграмма направленности, ВАХ и КПД, и применения лазерных диодов. Старение источников излучения. |
| 8 | Полупроводниковые наноструктуры | Молекулярно-лучевая эпитаксия как метод прямого получения (самоорганизации) наноструктур. Современные методы исследования поверхностных процессов и их возможности. Кинетика субмонослойного роста при гомоэпитаксии. Кинетические уравнения и скейлинговые теории. Зависимость плотности двумерных островков от температуры и скорости роста. Распределение островков по размерам. Переход от одноуровневого к многоуровневому росту при гомоэпитаксии. Статистические теории. Роль флуктуаций. Проблема устойчивости системы вицинальных ступеней. Формирование сверхрешеток. Влияние шероховатости поверхности и механизма роста на резкость границы раздела слоев. Выращивание дельта-легированных слоев. Поверхностная сегрегация примеси. Латеральные квантовые проволоки. Вертикальные квантовые проволоки – нановискеры. Континуальные и атомистические модели формирования когерентных 3D островков. Многослойные гетероструктуры с квантовыми точками. |

**3.2. Лабораторные работы и (или) практические занятия**

**3.2.1 Практические работы**

Таблица 3.2.1 – Практические работы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование практического занятия.** | **Объем, час.** |
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Методы и средства анализа экспериментальных данных в физике полупроводников. Основные понятия квантовой физики при изучении полупроводниковых веществ. Основы зоной теории. | 2 |
| 2 | Основы кристаллографии. Исследование кристаллоографической структуры полупроводников | 4 |
| 3 | Собственные и примесные полупроводники. Исследование температурной зависимости проводимости полупроводников | 4 |
| 4 | Электроны и дырки в полупроводниках. Определение основных характеристик носителей заряда в полупроводниках | 4 |
| 5 | Оптические свойства полупроводников и полупроводниковых наноструктур. | 4 |
|  | **Итого:** | 18 |

**3.2.2 Лабораторные работы**

Не предусмотрены.

**3.3 Самостоятельная работа аспирантов (СРС)**

Таблица 3.4 – Самостоятельная работа аспирантов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование раздела дисциплины | Время, затрачиваемое на выполнение СРС, час. |
| 1 | 2 | 4 |
| 1 | Зонная структура полупроводников | 4 |
| 2 | Кристаллическая решетка | 8 |
| 3 | Статистика свободных носителей при тепловом равновесии | 8 |
| 4 | Свободные носители в полупроводниках. | 8 |
| 5 | Эффекы Холла, Томсона, Нерста-Эттингаузена, Пельтье в полупроводниках и их применение. | 8 |
| 6 | Оптические свойства полупроводников. Ловушки. Захват носителей заряда на ловушки. Активация ловушек. | 6 |
| 7 | Механизм сверхпроводимости. Эффект Мейснера. Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. Понятие о СКВИДе. | 6 |
| Итого | | 52 |

**4 Учебно-методическое обеспечение для самостоятельной работы**

Аспиранты могут при самостоятельном изучении отдельных тем и вопросов дисциплин пользоваться учебно-наглядными пособиями, учебным оборудованием и методическими разработками кафедры в рабочее время, установленное Правилами внутреннего распорядка работников.

Учебно-методическое обеспечение для самостоятельной работы аспирантов по данной дисциплине организуется:

*библиотекой университета:*

* библиотечный фонд укомплектован учебной, методической, научной, периодической, справочной и художественной литературой в соответствии с УП и данной РПД;
* имеется доступ к основным информационным образовательным ресурсам, информационной базе данных, в том числе библиографической, возможность выхода в Интернет.

*кафедрой:*

* путем обеспечения доступности всего необходимого учебно-методического и справочного материала;
* путем предоставления сведений о наличии учебно-методической литературы, современных программных средств.
* путем разработки: методических рекомендаций, пособий по организации самостоятельной работы студентов; заданий для самостоятельной работы; тем рефератов и докладов; тем курсовых работ и методические рекомендации по их выполнению; вопросов к зачету; методических указаний к выполнению лабораторных и практических работ и т.д.

*типографией университета:*

– помощь авторам в подготовке и издании научной, учебной и методической литературы; удовлетворение потребности в тиражировании научной, учебной и методической литературы.

**5 Образовательные технологии**

Таблица 5.1. Образовательные технологии, используемые при проведении аудиторных занятий.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование раздела лекции (практического или лабораторного занятия) | Используемые образовательные технологии | Объем в часах |
| 1 | Методы и средства анализа экспериментальных данных | Диалог с аудиторией | 2 |
| 2 | Исследование температурной зависимости проводимости полупроводников | Кейс-технология | 4 |
| 3 | Определение типа основных носителей заряда в полупроводниках | Кейс-технология | 4 |
| 4 | Исследование эффекта сильного поля в полупроводниках | Диалог с аудиторией | 2 |
| Итого: | | | 12 |

**6 Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации**

Таблица 6.1 Паспорт комплекта оценочных средств

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Раздел (тема) дисциплины | Технология формирования | Оценочные  средства | | Описание  шкал оценивания |
| наименование | №№ заданий |
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Предмет и задачи курса «Физика полупроводников»  Основы кристаллографии. | Лекция  Практическое занятие | Деловая игра | 1 | Оценивая ответ, члены комиссии учитывают следующие *основные критерии*:  – уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);  – умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;   * качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);   - способность устанавливать внутри- и межпредметные связи, оригинальность и красота мышления, знакомство с дополнительной литературой и множество других факторов.  *Критерии оценок:*  Для итоговой аттестации используется экзамен.  Освоение студентом учебной дисциплины оценивается в баллах. Успеваемость студента определяется по 100-балльной и 5 – балльной шкалам оценок. Соответствие 100-балльной и 5-балльной шкал.  Неудовлетворительно  менее 50  Удовлетворительно  50-69  Хорошо  70-89  Отлично  90-100  Оценка по дисциплине складывается из зачета практических, самостоятельных работ и оценки ответа на экзамене.  *Показатели и критерии оценивания результатов:*  Процедура испытания предусматривает ответ аспиранта по вопросам зачетного билета, который заслушивает комиссия. После сообщения аспиранта и ответов на заданные вопросы, комиссия обсуждает качество ответа и голосованием принимает решение об оценке, вносимой в протокол. Особое внимание обращается на степень осмысления фундаментальных основ физики полупроводников и ее современных проблем. Изучаемый материал должен быть понятым. Приоритет понимания обусловливает способность изложения собственной точки зрения в контексте с другими позициями. |
| Лекция  Практическое занятие | Собеседование | 2 |
| 2 | Электроны и дырки в полупроводниках  Собственные и примесные полупроводники | Лекция | Лекция с элементами проблемного изложения | 3 |
| Практическое занятие | Эссе | 4 |
| 3 | Неравновесные процессы в полупроводниках  Уравнение баланса носителей в полупроводнике | Лекция  Практическое занятие | Сообщение аспиранта | 5 |
| Лекция  Практическое занятие |
| 4 | Оптические свойства полупроводников. | Лекция  Практическое занятие | Семинар-диспут | 6 |
| Лекция  Практическое занятие |
| 5 | Предмет и задачи курса «Физика полупроводников»  Основы кристаллографии. | Лекция  Практическое занятие | Сообщение аспиранта | 7 |
| Лекция  Практическое занятие |
| 6 | Электроны и дырки в полупроводниках  Собственные и примесные полупроводники | Лекция  Практическое занятие | Доклад с презентацией | 8 |
| Лекция  Практическое занятие |
| 7 | Неравновесные процессы в полупроводниках  Уравнение баланса носителей в полупроводнике | Лекция  Практическое занятие | Круглый стол | 9 |
| Лекция  Практическое занятие |
| 8 | Оптические свойства полупроводников. | Лекция  Практическое занятие | Опрос | 10 |
| Лекция  Практическое занятие | Сообщение аспиранта |
|  |  |

Итоговая форма контроля знаний – кандидатский экзамен по специальности (8 семестр). Список вопросов к экзамену и форма экзаменационного билета приведены в приложениях А, Б, В.

**7 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

**7.1 Основная и дополнительная учебная литература**

***а) основная литература:***

1. Умрихин В. В.  Физические основы электроники [Текст]: учебное пособие / В. В. Умрихин; ЮЗГУ. - Курск: ЮЗГУ, 2011. - 316 с.

2. Умрихин В. В.  Физические основы электроники [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. В. Умрихин; ЮЗГУ. - Курск: ЮЗГУ, 2011. - 316 с.

***б) дополнительная литература:***

3. Марголин В. И.   Физические основы микроэлектроники [Текст]: учебник / В. И. Марголин, В. А. Жабрев, В. А. Тупик. - М.: Академия, 2008. - 400 с.: ил. - (Высшее профессиональное образование, Радиоэлектроника). - Библиогр.: с. 395 (19 назв.).

4. Зегря, Г.Г. Основы физики полупроводников [Электронный ресурс]: учебное пособие / Г.Г. Зегря, В.И. Перель. - М.: Физматлит, 2009. - 336 с. Режим доступа – <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394>

5. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.И. Лебедев. - М. : Физматлит, 2008. - 488 с. Режим доступа – <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68403>

6. Кардона, Ю. П. Основы физики полупроводников [Текст] / Ю. П. Кардона. - 3-е изд. - М.: Физико-математической литературы, 2002. - 560 с.

**7.2 Учебно-методические разработки**

1. Исследование удельного сопротивления полупроводниковых материалов [Электронный ресурс] Мет. указания к лаб. работе по курсу «Физические основы микроэлектроники»// А.В. Кочура, В.В. Умрихин. – Курск: ЮЗГУ, 2012.- 12 с.

2. Исследование температурной зависимости проводимости полупроводников [Электронный ресурс] Мет. указания к лаб. работе по курсу «Физические основы микроэлектроники»// А.В. Кочура, В.В. Умрихин. – Курск: ЮЗГУ, 2012.- 11 с.

3. Кристаллическая решетка [Электронный ресурс] Мет. указания к лаб. работе по курсу «Физические основы микроэлектроники»// А.В. Кочура, В.В. Умрихин. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - 17 с.

4. Исследование эффекта сильного поля в полупроводниках [Электронный ресурс] Мет. указания к лаб. работе по курсу «Физические основы микроэлектроники»// А.В. Кочура, В.В. Умрихин. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - 12 с.

5. Исследование вольтамперной характеристики германиевого туннельного диода [Электронный ресурс] Мет. указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Физические основы микроэлектроники»/ сост.: А.В. Кочура, В.В. Умрихин. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - 11 с.

**7.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет**

1. http://www.edu.ru/ - федеральный портал Российское образование
2. http://school-collection.edu.ru/ - федеральное хранилище Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов
3. http://svitk.ru – электронная библиотека
4. http://www.iqlib.ru – электронная библиотека образовательных и просветительных изданий
5. <http://www.lib.msu.su/index.html> - Научная библиотека Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

**7.4 Перечень информационных технологий**

Чтение лекций с использованием слайд-презентаций. Консультирование посредством электронной почты. Использование слайд-презентаций при проведении научно-практических занятий.

**7.5 Другие учебно-методические материалы**

Составитель настоящей рабочей программы обращает внимание аспирантов на постоянное обновление и совершенствование законодательства. В связи с этим учебные и научные работы, приведенные в списке литературы, а также нормативно-правовые документы, могут изменяться. Поэтому аспирантам рекомендуется обращать внимание на публикации в средствах массовой информации, следить за периодическими специальными изданиями.

**8 Материально-техническое обеспечение дисциплины**

**8.1 Учебно-практическое оборудование**

Для изучения дисциплины «Физика полупроводников» ЮЗГУ обеспечен необходимым аудиторным фондом, оснащенным необходимым учебным оборудованием (мультимедийными средствами, компьютерами), электронными учебными ресурсами, лабораторными макетами и стендами СПФ-1. На практических занятиях предусмотрено использование системы MathCad. Обработка результатов лабораторных работ выполняется в системе Origin.

**Приложение А**

**Примерный перечень вопросов для самостоятельного изучения**

1. Классическая теория электропроводности твердого тела.
2. Частицы в одномерной, бесконечно глубокой потенциальной яме. Прохождение частицы через потенциальный барьер.
3. Распределение Ферми-Дирака. Электронный газ в металлах. Распределение Бозе-Энштейна. Вырожденный бозе-газ, бозе-конденсация.
4. Классификация кристаллических решеток.
5. Волновая функция электрона в периодическом поле, теорема Блоха. Квазиимпульс, зоны Бриллюэна.
6. Зонная структура диэлектриков, полупроводников и металлов.
7. Динамика электрона в идеальной кристаллической решетке.
8. Механизмы рассеяния носителей заряда.
9. Типы химических связей, строение полупроводниковых кристаллов.
10. Примесные атомы, примесная проводимость, доноры и акцепторы.
11. Невырожденные полупроводники. Собственные полупроводники, условие электронейтральности,
12. Примесные полупроводники, равновесная концентрация носителей заряда в области истощения примесных атомов, положение уровня Ферми.
13. Равновесные и неравновесные носители заряда. Скорость генерации, рекомбинации и время жизни свободных носителей заряда.
14. Типы процессов рекомбинации.
15. Уравнение баланса носителей в полупроводнике
16. Механизм сверхпроводимости. Эффект Джозефсона. СКВИД. Применение сверхпроводящих устройств в качестве элементов ЭВМ и микропроцессорных систем.
17. Внутренний фотоэффект в полупроводниках. Фоторезисторы.
18. Эффект Ааронова-Бома.

**Типовые задачи**

**1.** Сколько атомов приходится на элементарную ячейку и чему равно координационное число в кристаллических структурах простой кубической, ОЦК и ГЦК?

**2.** Основываясь на характеристиках кристаллической структуры типа алмаза, рассчитайте следующие параметры кремния (*а=*0,543 нм)

а) число атомов, содержащихся в элементарной ячейке и координационное число

б) атомный радиус структуры (длину отрезка, соединяющего два ближайших узла)

в) число атомов, приходящихся на единицу площади в кристаллических плоскостях (111), (100) и (110). (Три указанные здесь плоскости существенны для технологии полупроводниковых приборов.)

**3.** Доказать, что плоскость с миллеровскими индексами (*hkl*) отсекает на осях координат отрезки, пропорциональные *а/h, b/k, c/l*.

**4.** Предположим, что каждый атом в кристаллической решётке представляет собой твёрдый шар, такой, что поверхности шаров, соответствующих ближайшим соседним атомам, соприкасаются. Найдите относительную долю объёма элементарной ячейки, занятую атомами, если кристаллическая решётка: а) простая кубическая, б) объемноцентрированная кубическая, в) гранецентрированная кубическая, г) типа алмаза.

**5.** Показать, что для гранецентрированной кубической решётки обратная решётка – объёмноцентрированный куб и, наоборот.

**6.** Показать, что объём элементарной ячейки обратной решётки , где  - объём ячейки элементарной ячейки в прямом пространстве.

**7.** Изобразить плоскости (331), (32) простой кубической решетки.

**8.** Изобразить решетку алмаза, выделить ковалентные связи в решетке.

9. Показать, что электронная волна в линейной цепочке атомов с периодом *а,* может распространяться только при значениях волнового вектора



Изобразить закон дисперсии электрона в одномерном кристалле и объяснить его.

**10.** Рассчитать вероятность (*T*) туннелирования электрона с энергией *Е* через потенциальный барьер высотой *V0* и толщиной *d* (*E <V0*).

**11.** Получить выражение для определения ширины запрещенной зоны полупроводника из температурной зависимости проводимости.

Используя водородоподобную модель рассчитать энергию залегания примесных уровней и боровский радиус связанного электрона в Ge, Si и GaAs.

**12**. Вывести выражение для плотности состояний N(*E*)в случае изотропного закона дисперсии.

**13.** Определить уровень (энергию) Ферми *EF* в зоне проводимости для вырожденного электронного газа (изотропный случай). Рассчитать *EF* зависимости от концентрации электронов в интервале *n* = 1015 - 1022 см –3 (построить график).

**14**. В вырожденном полупроводнике уровень Ферми находится в зоне проводимости. Используя интеграл Ферми, определить энергию Ферми вырожденного электронного газа.

**15.** Рассчитать температурные зависимости: эффективной плотности состояний Nc, Nv (в см−3), уровня Ферми *EF* (в эВ) и концентрации *ni* (в см−3)для собственных Si, Ge и GaAs в интервале Т = 200−700 К. В расчетах обязательно учесть температурную зависимость ширины запрещенной зоны.

*Указание.* Построить графики для каждого параметра; собственную концентрацию строить в логарифмическом масштабе от обратной температуры. Каждый параметр для Si, Ge и GaAs выводить в едином масштабе на один рисунок.

**16.** Показать, что для невырожденного полупроводника равновесные концентрации электронов и дырок связаны с собственной концентрацией следующими выражениями:



Самостоятельная работа аспирантовнаправлена на:

1) выработку навыков восприятия и анализа философских и методологических проблем естественных, информационных и технических дисциплин на основе научных текстов;

2) совершенствование навыков методологического подхода к восприятию научных текстов и критического отношения к источникам информации;

3) знание специфики эмпирического и теоретического уровней научного исследования и содержание основных методов, используемых на этих уровнях;

4) развитие и совершенствование способностей к конструктивному диалогу, к дискуссии, к формированию логической аргументации и обоснованию собственной позиции по тому или иному вопросу.

Закрепление основных позиций в рамках дисциплины «Физика полупроводников» должно строится на понимании взаимосвязи таких разделов физики как электродинамика, квантовая механика, кристаллография, оптика, термодинамика. Предполагается применение активных методов обучения, т.е. способы активизации учебно-познавательной деятельности аспирантов, которые побуждают их к активной мыслительной и практической деятельности в процессе овладения материалом. Активные методы обучения предполагают использование тематических таблиц и схем по учебной литературе, Интернет-материалов и лекций преподавателя, позволяющие оценить умение аспиранта работать с учебной и научной литературой (выбирать, структурировать информацию, размещать её в хронологической последовательности).

Проверка выполнения заданий осуществляется как на семинарских занятиях с помощью устных выступлений и их коллективного обсуждения, так и с помощью письменных самостоятельных (контрольных) работ.

Для развития и совершенствования коммуникативных способностей аспирантов, навыков участия в конструктивном диалоге организуются специальные учебные занятия в виде «деловых игр», или «конференций», при подготовке к которым аспиранты заранее распределяются по группам, отстаивающим ту или иную точку зрения по обсуждаемой проблеме.

**Приложение Б**

**Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену**

1. Классификация твердых тел по проводимости. Основные понятия квантовой физики при изучении полупроводниковых веществ. Основы зоной теории.
2. Элементы зонной теории твердых тел. Основные приближения зонной теории. Классификация твердых тел по ширине запрещенной зоны.
3. Типы химических связей, строение полупроводниковых кристаллов. Трактовка запрещенной зоны энергий.
4. Периодичность в природе и в твердых телах. Типы кристаллической структуры. Кристаллическая решетка.
5. Симметрия в твердом теле. Точечные элементы симметрии. Дальний и ближний порядки. Элементарная ячейка.
6. Индексы. Вектор трансляции. Параметры решетки. Операции с индексами.
7. Основные понятия кристаллографии. Узел. Направление. Плоскость. Совокупность плоскостей.
8. Дефекты кристаллической решетки и их роль в формировании свойств полупроводника. Нульмерные. Одномерные. Двумерные. Трехмерные.
9. Проводимость твердых тел. Движение электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха.
10. Квазиимпульс, зоны Бриллюэна.
11. Подвижность и эффективная масса.
12. Динамика электрона в идеальной кристаллической решетке. Энергетический спектр электрона в кристалле.
13. Механизмы рассеяния носителей заряда. Электрон-фононное рассеяние, рассеяние на ионизированных атомах примеси.
14. Температурная зависимость подвижности носителей. Температурная зависимость удельной электропроводности металлов и полупроводников.
15. Примесные атомы, примесная проводимость, доноры и акцепторы. Примесная проводимость с точки зрения зонной теории.
16. Примесные уровни. Энергия активации примесных атомов. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках. Концентрация электронов и дырок в зонах. Невырожденные полупроводники.
17. Собственные полупроводники, условие электронейтральности, положение уровня Ферми, равновесная концентрация носителей заряда.
18. Примесные полупроводники, равновесная концентрация носителей заряда в области истощения примесных атомов, положение уровня Ферми.
19. Равновесная концентрация носителей заряда при низких температурах, положение уровня Ферми.
20. Случай сильного вырождения.
21. Проводимость полупроводников и ее температурная зависимость.
22. Механизмы рассеяния носителей заряда и температурная зависимость их подвижности.
23. Равновесные и неравновесные носители заряда. Понятие о квазиуровнях Ферми.
24. Рекомбинационные эффекты. Скорость генерации, рекомбинации и время жизни свободных носителей заряда.
25. Различные типы процессов рекомбинации. Рекомбинация зона-зона, время жизни свободных носителей. Рекомбинация через примеси и дефекты.
26. Стационарные состояния. Большой уровень возбуждения, малый уровень возбуждения, времена жизни свободных носителей.
27. Поверхностные явления в полупроводниках. Поверхностная рекомбинация.
28. Дрейф и диффузия носителей заряда. Соотношения Эйнштейна.
29. Уравнение непрерывности и уравнение диффузии.
30. Уравнение непрерывности для полупроводников с учетом дрейфового тока, генерации и рекомбинации носителей заряда.
31. Термоэлектрические и гальваномагнитные явления в полупроводниках. Оптические свойства полупроводников.
32. Фотопроводимость и фотоЭДС в полупроводниках.
33. Генерация когерентного излучения в полупроводниках.
34. Электрические свойства кремния, германия, арсенида галлия. Строение их кристаллической решетки, зонная структура. Подвижность носителей, их эффективная масса.
35. Перенос носителей заряда в тонких пленках.
36. Физические ограничения режимов работы полупроводниковых приборов.

# **Приложение В**

# **Форма экзаменационного билета**

Юго-Западный государственный университет

Факультет ЕНФ Утверждено на заседании кафедры

Научная специальность 1.3.11 НС

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_г. (протокол №\_\_)

Курс 4

Дисциплина Физика Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

полупроводников

Экзаменационный билет № \_\_\_\_\_\_

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. Полупроводниковый прибор с двумя n–p-переходами называется | | | | | | |
| резистором | диодом | | фоторезистором | | транзистором | |
| 1. Полупроводники, у которых экстремумы зон проводимости и валентной зоны расположены в разных точках k-пространства называются | | | | | | |
|  | Непрямозонными | | Прямозонными | |  | |
| 1. Как выглядит выражение в приближении слабой связи для эффективной массы вблизи экстремумов: | | | | | | |
| m\* = ±ћ2U2G/G2 | m\* = ±ћ2UG/G2 | | m\* = ±ћ2UG/G3 | | m\* = ±ћUG/G2 | |
| 1. Прямым включением р-n перехода называется включение, | | | | | | |
| способствующее уходу подвижных носителей от р-n перехода | увеличивающее скачок потенциала на р-n переходе | | при котором уменьшается высота потенциального барьера и переход представляет собой малое сопротивление протекающему току | | при котором плюс внешнего источника подключается к n-области, минус – к р-области | |
| 1. Концентрацию электронов в зоне проводимости можно представить в виде: | | | | | | |
| n = Nc×exp(-xc/kBT2) | n = Nc×exp(-xc2/kBT) | | n = Nc×exp(-xc/kBT) | | n = Nc×exp(-xc/kB) | |
| 1. Красная граница фотопроводимости в собственном полупроводнике описывается формулой | | | | | | |
| λ=hc/ЕД | λ=hc/Еg | | λ=hc/Еа | | λ=hc/eU | |
| 1. Примеси, обеспечивающие получение полупроводников n-типа имеют валентность | | | | | | |
| на два больше, чем у исходного полупроводникового материала | на два меньше, чем у исходного полупроводникового материала | | на один меньше, чем у исходного полупроводникового материала | | на один больше, чем у исходного полупроводникового материала | |
| 1. С ростом температуры удельное электрическое сопротивление собственных полупроводников … | | | | | | |
| растет | не меняется | | уменьшается | | резко увеличивается | |
| 1. Какой цифрой обозначены носители, которые являются неосновными для полупроводника n – типа? | | | | | | |
| 1 | | 2 | | 3 | | 4 |
| 1. Если число образующих кристалл атомов N увеличить в 3 раза, то число электронов, которое может вместить 2р-зона | | | | | | |
| не изменится | увеличится в 6 раз | | увеличится в 3 раза | | увеличится на 3*N* | |
| 1. В четырехвалентный германий добавили: 1) пятивалентный фосфор, 2) трехвалентный индий. Каким типом проводимости будет обладать полупроводник в каждом случае? | | | | | | |
| 1-дырочной, 2-электронной. | 1-электронной, 2-дырочной | | В обоих случаях электронной | | В обоих случаях дырочной | |
| 1. На графике показана зависимость логарифма электропроводности в полупроводниках р-типа от обратной температуры. В области низких температур электропроводность описывается формулой: | | | | | | |
| σ ~ exp(-Eg/2kT) | σ ~ exp(-EА/2kT) | | σ ~ exp(-EД/2kT) | | σ ~ T-3/2 | |
| 1. Максимальное число электронов, которое может вместить энергетическая зона 4f кристалла, содержащего N атомов, равно | | | | | | |
| 6*N* | 10*N* | | 14*N* | | 18*N* | |
| 1. Примесная фотопроводимость полупроводников наблюдается | | | | | | |
| при любой температуре | при температуре ниже температуры истощения  примесей ТS | | выше температуры Тi | | выше температуры ТS, но ниже температуры Тi  перехода к собственной проводимости | |
| 1. Какая зонная диаграмма соответствует равновесному состоянию р-n перехода? | | | | | | |
|  |  | |  | |  | |
| 1. Полупроводник содержит дефекты с отрицательной энергией корреляции с концентрацией *N*. Исследовать зависимость уровня Ферми от температуры и концентрации мелких примесей. Считать, что абсолютная величина энергии корреляции *U0*˃˃*RT*. | | | | | | |
| Ответ: | | | | | | |

Экзаменатор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.П. Кузьменко

**Лист дополнений и изменений, внесенных в рабочую программу**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер изменения | Номера страниц | | | | Всего  страниц | Дата | Основание\* для  изменения и подпись лица, проводившего изменения |
| изме-нённых | заменённых | аннулированных | новых |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

*Примечание – Основанием для внесения изменения является решение кафедры (протокол №\_\_ от \_\_\_\_).*