Институт физики микроструктур РАН —

филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии наук»

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Новиков

" " \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

**Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,**

**квантовых устройств**

УРОВЕНЬ ОБРАЗОВАНИЯ

|  |
| --- |
| ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ – ПОДГОТОВКА КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ |

НАУЧНАЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

**2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,**

**квантовых устройств**

ФОРМА ОБУЧЕНИЯ

ОЧНАЯ

Нижний Новгород

2022

1. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» является обязательной дисциплиной программы 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики и математики, ряда разделов теоретической физики (квантовая механика, электродинамика, статистическая физика), физики твердого тела, твердотельной электроники. Данный курс является базой для выполнения аспирантами исследований в области твердотельных полупроводниковых наноструктур.

Дисциплина изучается на 2 курсе (4 семестр).

**Целями освоения дисциплины являются:**

* формирование у аспирантов современного представления о кристаллической структуре, зонном спектре, электрических и оптических свойствах полупроводников, о принципах работы основных полупроводниковых приборов;
* освоение аспирантами методов теоретического описания электрических и оптических свойств полупроводников, а также низкоразмерных полупроводниковых структур, основных полупроводниковых приборов;

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть следующими компетенциями результатами обучения по дисциплине:

Способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области твердотельной электроники.

Знать современные подходы и методы исследования в соответствующей профессиональной области.

Уметь выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования, самостоятельно осуществлять научное исследование в соответствующей профессиональной области, разрабатывать его концепцию и методологию.

Владеть навыками применения новых методов исследования в соответствующей профессиональной области.

3. Объем дисциплины составляет 4 зачетные единицы, всего 152 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации, 36 часов – подготовка к сдаче кандидатского экзамена, 78 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

3.1. Объём дисциплины по видам учебных занятий (в часах)

|  |  |
| --- | --- |
| Вид учебной работы | Всего часов |
| Общая трудоемкость дисциплины | 152 |
| Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего) | 36 |
| Аудиторная работа (всего): | 36 |
| в том числе: |  |
| Лекции | 36 |
| Промежуточная аттестация | 2 |
| Самостоятельная работа обучающихся (всего) | 78 |
| Контроль - кандидатский экзамен | 36 |

3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Раздел дисциплины | Всего | Контактная работа | | Самостоятельная работа |
| Лекционные занятия | Практические занятия |
| 1 | Зонная структура германия, кремния и арсенида галлия | 5 | 1 |  | 4 |
| 2 | Движение электронов в кристалле в слабых полях. | 6 | 2 |  | 4 |
| 3 | Статистика электронов и дырок в полупроводниках. | 6 | 2 |  | 4 |
| 4 | Рассеяние носителей тока в полупроводниках | 5 | 1 |  | 4 |
| 5 | Линейные процессы переноса в полупроводниках | 5 | 1 |  | 4 |
| 6 | Неравновесные носители в полупроводниках | 6 | 2 |  | 4 |
| 7 | Оптические свойства полупроводников | 8 | 2 |  | 6 |
| 8 | Оптические свойства низкоразмерных систем | 5 | 1 |  | 4 |
| 9 | Явления в контактах | 5 | 1 |  | 4 |
| 10 | p-n переход | 6 | 2 |  | 4 |
| 11 | Явления в сильных электрических полях | 5 | 1 |  | 4 |
| 12 | Электронные свойства сильно легированных полупроводников | 5 | 1 |  | 4 |
| 13 | Квантовый эффект Холла | 5 | 1 |  | 4 |
| 14 | Модель Кейна и её использование для описания зонного спектра полупроводников | 7 | 3 |  | 4 |
| 15 | Гетеропереходы. Квантовые ямы, квантовые провода, квантовые точки. Графен. | 7 | 3 |  | 4 |
| 16 | Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых систем. | 7 | 3 |  | 4 |
| 17 | Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах и квантовых точках. | 7 | 3 |  | 4 |
| 18 | Основные свойства сверхрешеток. Резонансное туннелирование. Резонансно туннельный диод. | 7 | 3 |  | 4 |
| 19 | Квантовый эффект Холла. Основные представления об электронном спектре сильно легированных полупроводников | 7 | 3 |  | 4 |
|  | Контроль – канд. экзамен, промежуточная аттестация |  |  |  | 38 |
|  | Дисциплина в целом | 152 | 36 |  | 116 |

3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование раздела дисциплины | Содержание |
| 1 | Зонная структура германия, кремния и арсенида галлия | Свойства зонной структуры полупроводников. Следствия симметрии обращения времени и пространственной инверсии. Кристаллическая структура Ge, Si, GaAs. Зона Бриллюэна. Приближение эффективной массы в простой и сложной зоне. Зонный спектр вблизи экстремумов. |
| 2 | Движение электронов в кристалле в слабых полях. | Метод огибающей. Движение в слабом электрическом поле, понятие дырки. Мелкие примеси в полупроводниках. Движение в слабом магнитном поле. |
| 3 | Статистика электронов и дырок в полупроводниках | Концентрация электронов и дырок в зонах. Концентрация заряженных мелких примесей. Определение химического потенциала в полупроводниках. |
| 4 | Рассеяние носителей тока в полупроводниках | Рассеяние электронов на длинноволновых и междолинных фононах. Рассеяние на заряженных примесях. Электрон-электронное рассеяние. |
| 5 | Линейные процессы переноса в полупроводниках | Уравнение Больцмана. Электропроводность в слабом электрическом поле. Гальваномагнитные явления |
| 6 | Неравновесные носители в полупроводниках | Времена жизни неравновесных носителей. Уравнения непрерывности. Амбиполярная диффузия и дрейф. |
| 7 | Оптические свойства полупроводников | Межзонное поглощение света в полупроводниках. Экситонные эффекты. Эффект Бурштейна-Мосса. Эффект Франца-Келдыша. Примесное поглощение в полупроводниках. решеточное поглощение. Поглощение на свободных носителях. Фотолюминесценция. Электролюминесценция |
| 8 | Оптические свойства низкоразмерных систем | Плотность состояний в квантовых ямах, квантовых проволоках и квантовых точках. Межзонное поглощение в квантовой яме. Межподзонное поглощение в квантовой яме. Оптические модуляторы на квантовых ямах. Квантово каскадный лазер. |
| 9 | Явления в контактах | Работа выхода. Контактная разность потенциалов. Ф-ла Ричардсона- Дэшмана. Барьер Шоттки. антизапорный контакт. Токи, ограниченные пространственным зарядом. |
| 10 | p-n переход | Емкость -p-n перехода. Статическая вольт-амперная характеристика p-n перехода. Малосигнальный импеданс p-n перехода. Туннельный p-n переход. Биполярный транзистор. Полупроводниковый лазерный диод. Полевой транзистор. |
| 11 | Явления в сильных электрических полях | Убегание. Примесный и межзонный пробой. Лавинный пробой p-n перехода. Междолинный перенос. Эффект Ганна. |
| 12 | Электронные свойства сильно легированных полупроводников | Влияние на электронный спектр беспорядка. Примесная зона. Переход металл-диэлектрик. Переход Мотта. Переход Андерсона. Локализованные и делокализованные состояния. |
| 13 | Квантовый эффект Холла | Экспериментальное наблюдение целочисленного и дробного эффекта Холла. Электронный спектр уровней Ландау в квантовых ямах. Качественное объяснение целочисленного квантового эффекта Холла. |
| 14 | Модель Кейна и её использование для описания зонного спектра полупроводников | Теория возмущений по волновому вектору электрона. Спектр кубических полупроводников около центра зоны Бриллюэна. Влияние спин-орбитального взаимодействия. |
| 15 | Гетеропереходы. Квантовые ямы, квантовые провода, квантовые точки. Графен. | Разрывы энергетических зон на гетерограницах. Электронный спектр и плотность состояний в квантовых ямах, квантовых проводах, квантовых точках. Основные методы получения структур с квантовыми ямами, проводами точками. |
| 16 | Оптические свойства низкоразмерных полупроводниковых систем. | Правила отбора для межзонных и межподзонных переходов в квантовых ямах. Спектр поглощения квантовых ям для межзонных и межподзонных переходов. Деполяризационный сдвиг. Особенности экситонных эффектов в квантовых ямах. |
| 17 | Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах и квантовых точках. | Резонаторы полупроводниковых лазеров. Принцип работы, устройство и характеристики квантово-каскадных лазеров. Полупроводниковые модуляторы и детекторы на квантовых ямах. |
| 18 | Основные свойства сверхрешеток. Резонансное туннелирование. Резонансно туннельный диод. | Спектр электронов в свех решетке. Вольт-амперная характеристика сверхрешетки. Блоховские осцилляции. Метод трансфер-матрицы. Вычисление коэффициента туннелирования в резонансно туннельной структуре. Принцип работы и устройство резонансно-туннельного диода. |
| 19 | Квантовый эффект Холла. Основные представления об электронном спектре сильно легированных полупроводников | Экспериментальное наблюдение квантования поперечного магнетосопротивления. Качественное объяснения целочисленного квантового эффекта Холла. Роль краевых состояний. Дробный квантовый эффект Холла. Переход металл- диэлектрик. Примесные зоны. Переходы Мотта и Андерсона. Хвосты плотностей состояний, края подвижности. Прыжковая проводимость |

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Промежуточный контроль осуществляется на зачете, итоговый – на экзамене, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Аспиранты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, подготовку семинаров, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, аспиранты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классах экспертов и специалистов в области современных задач физики полупроводников.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

В курсе запланировано на самостоятельную работу аспирантов 72 часа (67 % общего объема). Самостоятельная работа аспирантов является одним из видов учебных занятий, выполняется по заданию преподавателя индивидуально и без его непосредственного участия. Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних задач с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится при подготовке к зачету и экзамену по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

6. Фонд оценочных средств по дисциплине

6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы

1. Метод сильной связи для расчетов зонной структуры Si, Ge и GaAs.
2. k-p метод описания электронов в полупроводниках.
3. Многозарядные примеси в полупроводниках.
4. Особенности ван-Хова и их связь с особенностями спектров межзонного поглощения.
5. Примесная фотопроводимость. Резонанс Фано в спектрах примесной фотопроводимости.
6. Развитие полупроводниковых лазеров. Виды современных полупроводниковых лазеров и особенности их работы.
7. Фотоприемники. Виды фотоприемников и принципы их работы.
8. Полевые транзисторы с селективным легированием. Принцип работы. Характеристики современных полевых транзисторов с высокой электронной подвижностью.
9. Резонансно-туннельный диод. Принцип работы, основные характеристики и использование.
10. Солнечные батареи. Принцип действия, характеристики. Каскадные солнечные батареи.
11. Основные методы роста полупроводниковых структур.

6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль ства усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, итоговый – в виде экзамена, на которых определяется:

* уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
* уровень понимания изученного материала;
* способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен и зачет проводятся в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопроса курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.

|  |  |
| --- | --- |
| **Оценка** | **Уровень подготовки** |
| Отлично | Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше |
| Хорошо | В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%. |
| Удовлетворительно | Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной ло­гической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%. |
| Неудовлетворительно | Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.  Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%. |

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том III. «Квантовая механика». М.: Наука. 1976.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том V. «Статистическая физика. Часть 1». М.: Наука. 1976.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г., «Физика полупроводников». М.: Наука 1977.
4. Киттель Ч., Квантовая теория твердых тел. М.: Мир, 1967.

б) дополнительная литература:

1. Ансельм А.И., «Введение в теорию полупроводников». М.: Наука 1978.
2. Ю П., Кардона М., «Основы физики полупроводников». М. Физматлит 2002.
3. Зеегер К., «Физика полупроводников», М.: Мир 1977.
4. Пожела Ю.К., «Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках». М.: Наука 1977.
5. Успехи физических наук (https://ufn.ru/ru/)
6. Reviews of Modern Physics (RMP) (https://journals.aps.org/rmp/)
7. Physical Review B (PRB) (https://journals.aps.org/prb/)
8. Semiconductor Science and Technology (http://iopscience.iop.org/journal/0268-1242)
9. Физика и техника полупроводников (http://journals.ioffe.ru/journals/2)

в) факультативная литература

1. Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус, «Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках». М.: Наука. 1972.
2. Ч. Киттель, «Квантовая теория твердых тел». М.: Мир 1967.
3. В.Ф. Гантмахер, И.Б. Левинсон, «Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках». М.:Наука 1984.
4. С. Зи, «Физика полупроводниковых приборов», тт. 1-2. М.: Мир, 1984.
5. Б.И. Шкловский, А.Л.Эфрос Электронные свойства легированных полупроводников. М. Наука 1979, 416 с.
6. Б.Ридли. Квантовые процессы в полупроводниках. М.Мир 1986, 304 с.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Использование программного обеспечения:

1. Microsoft Office Word.
2. Microsoft Office Excel.
3. Microsoft Office Power Point.
4. Free Origin Viewer

Составитель:

Алешкин В.Я., д.ф.-м.н., проф., г.н.с. отдела физики полупроводников ИФМ РАН

Рецензент:

Гавриленко В.И., проф., д.ф.-м.н., зав. отделом физики полупроводников ИФМ РАН.