

Институт физики микроструктур РАН —
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИФМ РАН

З.Ф.Красильник
"9" апреля 2018 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика полупроводников

Направление подготовки

03.06.01 «Физика и астрономия»

Направленность (профиль) программы

01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Квалификация (степень) выпускника

исследователь - преподаватель, исследователь

Форма обучения

очная

Нижний Новгород

2018

1. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Физика полупроводников» является факультативной дисциплиной программы 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

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 3 курсе (6 семестр).

- 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;
- формирование у аспирантов компетенций программы 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия».

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по направлению «Физика и астрономия»

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

Код компетенции	Результаты освоения ООП Содержание компетенций	Перечень результатов планируемых обучения по дисциплине
ПК-1	способность самостоятельно проводить научные исследования в области разработки приборов и методов экспериментальной физики и применять полученные результаты для решения практических задач	ЗНАТЬ: основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области разработки приборов и методов экспериментальной физики. УМЕТЬ: использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области разработки приборов и методов экспериментальной физики. ВЛАДЕТЬ: разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области разработки приборов и методов экспериментальной физики и способами применения этих знаний для создания

		прикладных технологий и решения практических задач.
ПК-2	способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности	<p>ЗНАТЬ: Базовые законы современной физики и их взаимосвязь, тенденции развития физики в обозримой перспективе, основные проблемы, стоящие перед современной физикой, а также предлагаемые средства их решения.</p> <p>УМЕТЬ: понимать суть явлений и процессов, изучаемых физикой.</p> <p>ВЛАДЕТЬ: основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>
ПК-3	способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области разработки приборов и методов экспериментальной физики.	<p>ЗНАТЬ: основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования.</p> <p>УМЕТЬ: выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность.</p> <p>ВЛАДЕТЬ: навыками сбора, обработки, анализа и систематизации научных данных; навыками статистического анализа экспериментальных данных; навыками аналитических и численных аппроксимаций функций.</p>

3. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 3 зачетных единиц (ЗЕ), 108 часов.

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

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость дисциплины	108
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего)	36
Аудиторная работа (всего):	36
в том числе:	
Лекции	18
Практические занятия	18
Самостоятельная работа обучающихся (всего)	72
Вид итогового контроля	Зачет

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	6	1	1	4
2	Движение электронов в кристалле в слабых полях.	8	2	2	4
3	Статистика электронов и дырок в полупроводниках.	10	2	2	6
4	Рассеяние носителей тока в полупроводниках	8	1	1	6
5	Линейные процессы переноса в полупроводниках	8	1	1	6
6	Неравновесные носители в полупроводниках	8	2	2	4
7	Оптические свойства полупроводников	10	2	2	6
8	Оптические свойства низкоразмерных систем	8	1	1	6
9	Явления в контактах	8	1	1	6
10	p-n переход	10	2	2	6
11	Явления в сильных электрических полях	8	1	1	6
12	Электронные свойства сильно легированных полупроводников	8	1	1	6
13	Квантовый эффект Холла	8	1	1	6
	Дисциплина в целом	108	18	18	72

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.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, 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 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

Контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

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

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы 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

	<p>профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.</p>
Удовлетворительно	<p>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.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>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.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>

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

9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей аспиранты имеют возможность работать за компьютером с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

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.