

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики микроструктур Российской академии наук

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИФМ РАН

\_\_\_\_\_  
В.И.Гавриленко  
"22" июня 2015 г.

## **Рабочая программа дисциплины**

**Физика полупроводников**

Направление подготовки

*03.06.01 «Физика и астрономия»*

Направленность (профиль) программы

*01.04.07 «Физика конденсированного состояния»*

Квалификация (степень) выпускника

*исследователь - преподаватель, исследователь*

Форма обучения

*очная*

Нижний Новгород

2015

## 1. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Физика полупроводников» является дисциплиной по выбору вариативной части программы 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

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;
- формирование у аспирантов компетенций программы 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 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
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	<b>ЗНАТЬ:</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных областях. <b>УМЕТЬ:</b> проводить анализ литературных данных в рамках поставленной исследовательской (практической, образовательной) задачи, выявлять основные вопросы и проблемы, существующие в современной науке; при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений. <b>ВЛАДЕТЬ:</b>

		<p>навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p>
<b>ОПК-1</b>	<p>способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> теоретические основы организации научно-исследовательской деятельности; методы сбора информации для решения поставленных исследовательских задач; методы анализа данных, необходимых для проведения конкретного исследования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования планировать, организовывать и проводить научно-исследовательские и производственно-технические исследования с применением современной аппаратуры, оборудования и компьютерных технологий; самостоятельно выполнять теоретические, экспериментальные и вычислительные физические исследования при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований; навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов;</p>

		<p>навыками работы на современной аппаратуре и оборудовании для выполнения физических исследований;</p> <p>способностью самостоятельно с применением современных компьютерных технологий; анализировать, обобщать и систематизировать результаты физических работ.</p>
<b>ПК-1</b>	<p>способность самостоятельно проводить научные исследования в области физики конденсированного состояния и применять полученные результаты для решения практических задач</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области физики конденсированного состояния.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области физики конденсированного состояния.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области физики конденсированного состояния и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.</p>
<b>ПК-2</b>	<p>способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> 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><b>УМЕТЬ:</b> понимать суть явлений и процессов, изучаемых физикой.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>

<b>ПК-3</b>	<p>способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области физики конденсированного состояния.</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> 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
<b>Вид итогового контроля</b>	<b>Зачет</b>

**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	8	1	1	6

	полупроводниках				
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
	<b>Дисциплина в целом</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>

### 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 р-п перехода. Малосигнальный импеданс р-п перехода. Туннельный р-п переход. Биполярный транзистор. Полупроводниковый лазерный диод. Полевой транзистор.
11	Явления в сильных электрических полях	Убегание. Примесный и межзонный пробой. Лавинный пробой р-п 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**

Итоговый 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.

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовки</b>
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все



	<p>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.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Хорошо	<p>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.</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>

## **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.