

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Институт естественных наук и математики



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

<b>Перечень сведений о рабочей программе дисциплины</b>	<b>Учетные данные</b>
<b>Программа аспирантуры</b> Физика полупроводников	<b>Код ПА</b> 1.3.11.
<b>Группа специальностей</b> Физические науки	<b>Код</b> 1.3.
<b>Федеральные государственные требования (ФГТ)</b>	Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20.10.2021 г. № 951
<b>Самостоятельно утвержденные требования (СУТ)</b>	Приказ «О введении в действие «Требований к разработке и реализации программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре УрФУ» от 31.03.2022 №315/03

Екатеринбург  
2022 г.

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

№ п/п	ФИО	Ученая степень, ученое звание	Должность	Структурное подразделение
1	Бабушкин Алексей Николаевич	Д.ф.-м.н., профессор	Профессор	Кафедра физики конденсированного состояния и нано размерных систем Института естественных наук и математики
2	Германенко Александр Викторович	Д.ф.-м.н., доцент	Зав. кафедрой	Кафедра физики конденсированного состояния и нано размерных систем Института естественных наук и математики

**Рекомендовано:**

**Учебно-методическим советом института естественных наук и математики**

Председатель учебно-методического совета ИЕНиМ  
Протокол № 5 от 17.05.2022 г.



Е.С. Буянова

**Согласовано:**

Начальник ОПНПК



Е.А. Бутрина

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

## 1.1. Аннотация содержания дисциплины

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к базовой части программы аспирантуры по программе 1.3.11. Физика полупроводников.

Целью дисциплины «Физика полупроводников» является приобретение основных профессиональных компетенций в ходе углубленного изучения базовых разделов физики полупроводников: зонной структуры полупроводников, статистики и кинетических явлений в полупроводниках, оптических свойств полупроводников, методов исследования.

## 1.2. Языки реализации дисциплины – русский (английский).

## 1.3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Дисциплина «Физика полупроводников» относится к базовой части программы аспирантуры, направлена на подготовку к сдаче кандидатского минимума.

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

### **Знать:**

- особенности методов синтеза твердых веществ;
- основные электрохимические методы исследования функциональных свойств твердофазных неорганических материалов

### **Уметь:**

- давать рекомендации на основании проведенных исследований;
- выбирать и анализировать научную литературу для избранного направления исследований, формулировать задачи работы на основе анализа литературы;
- выбрать или самостоятельно составить методику исследования нового материала;
- использовать специализированное программное обеспечение и современные информационные технологии;
- систематизировать полученные теоретические и опытные данные, обобщать полученные знания и представлять полученные результаты в форме научных публикаций;

### **Владеть (демонстрировать навыки и опыт деятельности):**

- навыками моделирования основных процессов исследования;
- навыками работы с научной литературой и базами данных с целью определения направления исследования и решения специализированных задач;
- навыками научной коммуникации;
- навыками выбора методов исследования, в том числе исследования электротранспортных свойств веществ в кристаллическом состоянии;

#### 1.4. Объем дисциплины

№ п/п	Виды учебной работы	Объем дисциплины		Распределение объема дисциплины по семестрам (час.)
		Всего часов	В т.ч. контактная работа (час.)*	6
1.	<b>Аудиторные занятия</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
2.	Лекции	4	4	4
3.	Практические занятия	0	0	0
4.	<b>Самостоятельная работа аспирантов, включая все виды текущей аттестации</b>	<b>104</b>		<b>104</b>
5.	<b>Промежуточная аттестация</b>	Экзамен	<b>1</b>	Экзамен, 18
6.	<b>Общий объем по учебному плану, час.</b>	<b>108</b>	<b>5</b>	<b>108</b>
7.	<b>Общий объем по учебному плану, з.е.</b>	<b>3</b>		<b>3</b>

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины	Содержание
P1	<b>Введение.</b> <i>Лекции 2 часа.</i>	История открытия полупроводников. Основные свойства полупроводников. Применение полупроводников в науке и технике. Классификация полупроводников Методы выращивания полупроводниковых кристаллов. Методы получения низкоразмерных структур: двумерных квантовые слоев, квантовых проволок и точек.
P2	<b>Атомная структура полупроводников.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Внешние оболочки атомов и типы сил связи в твердые тела: ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь. Структуры важнейших полупроводников – элементарных и соединений типов A3B5, A2B6, A4B6. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера—Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, её свойства. Зона Бриллюэна.
P3	<b>Механические свойства.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Моноатомная линейная цепочка. Двухатомная линейная цепочка. Колебания решетки в трехмерном кристалле. Плотность состояний. Фононы. Локализованные фононные моды. Фононы в сплавах. Термическое расширение. Напряжения и деформации. Биаксиальные деформации. Трехмерные деформации. Скручивание.

P4	<b>Зонная структура.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Формулировка общей квантово-механической задачи. Роль кулоновского взаимодействия в формировании спектра. Адиабатическое приближение и его применимость. Одноэлектронное приближение. Простейшие модели: одномерный ящик и модель Кронига-Пенни. Теорема Блоха. Предсказания моделей и их соответствие реальной ситуации. Зонный характер спектра в модели Кронига-Пенни. Форма краев зон. Характер движения электрона в периодическом потенциале. Групповая скорость. Эффективная масса. Типы зонной структуры в кристаллических телах: металлы, полуметаллы, диэлектрики. Зонная структура конкретных полупроводников. Бесщелевые и узкощелевые полупроводники. Модель Кейна. Модель Латтинжера. Лёгкие и тяжёлые дырки. Влияние внешних воздействий на зонную структуру.
P5	<b>Примеси и дефекты в полупроводниках.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Химическая природа и электронные свойства примесей. Примеси замещения, внедрения, вакансии. Точечные, линейные и двумерные дефекты. Граница кристалла, как дефект. Мелкие примесные уровни (водородоподобная примесь). Спектр и волновые функции мелких донорных и акцепторных состояний. Спектр слабо- и сильнолегированных полупроводников. Переход Мотта, переход Андерсона.
P6	<b>Статистика полупроводников.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Вырожденный и невырожденный электронный газ. Плотность состояний. Эффективная масса плотности состояний. Концентрация носителей заряда в зонах и на локальных уровнях. Интегралы Ферми. Решение уравнения электронейтральности для собственного полупроводника. Решение уравнения электронейтральности в примесном полупроводнике.
P7	<b>Явления электронного переноса.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Электропроводность. Подвижность. Транспортное время релаксации импульса. Закон Ома в анизотропных полупроводниках. “Дрейфовая” эффективная масса. Тензор электропроводности, эффект Холла и магнитосопротивления. Уравнение Больцмана. Правило усреднения времени релаксации импульса. Эффект Холла и магнитосопротивление. Время релаксации и вероятность квантовых переходов. Рассеяние на ионизированной примеси. Зависимость времени релаксации от энергии для различных механизмов рассеяния. Температурная зависимость подвижности.
P8	<b>Магнитные квантовые эффекты.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Энергетический спектр электронов и дырок в магнитном поле. Плотность состояний. Учет спина. Осцилляции Шубникова-де Гааза. Определение концентрации и эффективной массы из осцилляций Шубникова-де Газа. Магнитофононный резонанс (МФР). Определение эффективной массы из МФР. Межзонное и примесное магнитное вымораживание носителей. Циклотронный резонанс (классическое рассмотрение).
P9	<b>Оптика полупроводников.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса—Кронига. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света. Поглощение света на свободных носителях заряда. Поглощение света на колебаниях

		решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах, рассеяние на акустических фононах. Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах. Оптические явления во внешних полях: эффект Франца-Келдыша, эффект Покельса, эффект Бурштейна-Мосса. эффекты Фарадея и Фойгта.
P10	<b>Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
P11	<b>Контактные явления в полупроводниках.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Диод Шоттки. р-п переход. Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники.
P12	<b>Свойства поверхности полупроводников.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация. Эффект поля. Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.
P13	<b>Фотоэлектрические явления.</b> <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Фотопроводимость. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость. Фоторазогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.
P14	<b>Принципы действия полупроводниковых приборов.</b> <i>Лекции 2 часа; самостоятельная работа аспиранта, 8 часов.</i>	Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Энергетическая диаграмма МДП-структуры. Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью. Шумы в полупроводниковых приборах. Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования. Светодиоды и полупроводниковые лазеры.

### 3. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ, САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### 3.1. Практические занятия

Не предусмотрено.

#### 3.2. Примерная тематика самостоятельной работы

##### 3.2.1. Примерный перечень тем рефератов

Не предусмотрено.

##### 3.2.2. Примерная тематика индивидуальных или групповых проектов

Не предусмотрено.

### 4. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### 4.1. Критерии оценивания результатов контрольно-оценочных мероприятий текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

Применяются утвержденные критерии оценивания достижений аспирантов по каждому контрольно-оценочному мероприятию. Система критериев оценивания опирается на три уровня освоения компонентов компетенций: пороговый, повышенный, высокий.

Компоненты компетенций	Признаки уровня освоения компонентов компетенций		
	пороговый	повышенный	высокий
<b>Знания</b>	Аспирант демонстрирует знание-знакомство, знание-копию: узнает объекты, явления и понятия, находит в них различия, проявляет знание источников получения информации, может осуществлять самостоятельно репродуктивные действия над знаниями путем самостоятельного воспроизведения и применения информации.	Аспирант демонстрирует аналитические знания: уверенно воспроизводит и понимает полученные знания, относит их к той или иной классификационной группе, самостоятельно систематизирует их, устанавливает взаимосвязи между ними, продуктивно применяет в знакомых ситуациях.	Аспирант может самостоятельно извлекать новые знания из окружающего мира, творчески их использовать для принятия решений в новых и нестандартных ситуациях.
<b>Умения</b>	Аспирант умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции, алгоритму в известной ситуации, самостоятельно выполняет действия по решению типовых задач, требующих выбора из числа известных методов, в предсказуемо изменяющейся ситуации	Аспирант умеет самостоятельно выполнять действия (приемы, операции) по решению нестандартных задач, требующих выбора на основе комбинации известных методов, в непредсказуемо изменяющейся ситуации	Аспирант умеет самостоятельно выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач, демонстрирует творческое использование умений (технологий)

<b>Личностные качества</b>	Аспирант имеет низкую мотивацию учебной деятельности, проявляет безразличное, безответственное отношение к учебе, порученному делу	Аспирант имеет выраженную мотивацию учебной деятельности, демонстрирует позитивное отношение к обучению и будущей трудовой деятельности, проявляет активность.	Аспирант имеет развитую мотивацию учебной и трудовой деятельности, проявляет настойчивость и увлеченность, трудолюбие, самостоятельность, творческий подход.
----------------------------	--	--	--

## 4.2. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестации

### 4.2.1. Перечень примерных вопросов для зачета

Не предусмотрено.

### 4.2.2. Перечень примерных вопросов для экзамена

1. Классификация полупроводников.
2. Атомная структура полупроводников. Структуры важнейших полупроводников – элементарных и соединений типов АЗВ5, А2В6, А4В6.
3. Зонная структура. Адиабатическое приближение и его применимость. Типы зонной структуры в кристаллических телах: металлы, полуметаллы, диэлектрики. Зонная структура конкретных полупроводников: германий, кремний, полупроводники со структурой цинковой обманки.
4. Бесщелевые и узкощелевые полупроводники. Лёгкие и тяжёлые дырки. Влияние внешних воздействий на зонную структуру.
5. Примеси и дефекты в полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Примеси замещения, внедрения, вакансии. Точечные, линейные и двумерные дефекты. Граница кристалла, как дефект.
6. Статистика полупроводников. Распределение Ферми-Дирака. Уровень Ферми. Вырожденный и невырожденный электронный газ. Плотность состояний. Эффективная масса плотности состояний.
7. Явления электронного переноса. Электропроводность. Подвижность. Уравнение Больцмана.
8. Эффект Холла и магнитосопротивление. Время релаксации и вероятность квантовых переходов. Рассеяние на ионизированной примеси. Зависимость времени релаксации от энергии для различных механизмов рассеяния. Температурная зависимость подвижности.
9. Магнитные квантовые эффекты. Энергетический спектр электронов и дырок в магнитном поле. Плотность состояний. Учет спина. Осцилляции Шубникова-де Гааза.)
10. Оптика полупроводников. Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение
11. Контактные явления в полупроводниках. Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Диод Шоттки. р-п переход. Энергетическая диаграмма р-п перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в р-п переходе. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.
13. Фотоэлектрические явления. Фотопроводимость. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.
14. Некристаллические полупроводники. Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Влия-



ние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

15. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Квантовые нити. Квантовые точки.

16. Принципы действия полупроводниковых приборов. Вольтамперная характеристика р-п перехода. Приборы с использованием р-п переходов. Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Энергетическая диаграмма МДП-структуры. Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью. Шумы в полупроводниковых приборах. Фотоэлементы и фотодиоды.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1. Рекомендуемая литература**

#### **5.1.1. Основная литература**

1. А.И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников. Лань. 2008. – 624 с.
2. К.В. Шалимова. Физика полупроводников. Лань. 2010. – 400 с.
3. Г.Г. Зегря, В.И. Перель. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит. 2009. – 336 с.
4. А.И. Лебедев. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит. 2008. – 488 с.
5. М. Грундман. Основы физики полупроводников. Нанопизика и технические приложения. М.: Физматлит. 2012. – 778 с.

#### **5.1.2. Дополнительная литература**

1. Й. Имри. Введение в мезоскопическую физику. М: Физматлит. 2002. - 304 с.
2. Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука. 1979. – 416 с.
3. К. Зеегер. Физика полупроводников. М.: Мир. 1977. – 615 с.
4. П.С. Киреев. Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1975. – 584 с.
5. Дж. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках. М.: Мир, 1964.
6. Р. Смит. Полупроводники. М.: Мир, 1982.
7. Дж. Займан, Принципы теория твердого тела, М.: Мир, 1966
8. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, М.: Наука, 1978
9. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г.Калашников, Физика полупроводников, М.: Наука, 1977.
10. В.Л. Бонч-Бруевич, Сборник задач по физике полупроводников, М.: Наука, 1987.
11. Питер Ю, Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит. 2002. - 373 с.
12. В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, И.В. Карпенко, А.Г. Миронов. Сборник задач по физике полупроводников. М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1987. – 144 с..

#### **5.2. Методические разработки**

Не предусмотрено.

#### **5.3. Программное обеспечение**

1. Microsoft office (Word, Excel, Power point);
2. Adobe Reader X
3. ChemOffice 2010
4. Isis Draw (Version 2.5)
5. Mercury (Version 2.4.5)
6. AutoDock (Version 1.5)
7. MestReNova (Version 6.0.2)
8. Open Babel (Version 2.3.1)
9. Avogadro (Version 1.0.3)
10. RasMol (Version 2.7.5.2)

11. Jmol (Version 12.0.45)
12. MiKTeX (<https://miktex.org>)
13. SRIM (<http://www.srim.org>)
14. MathCad 14.0

#### **5.4. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

1. ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>;
2. Web of Science: <http://apps.webofknowledge.com>;
3. Scopus: <http://www.scopus.com>;
4. Reaxys: <http://reaxys.com>;
5. Поисковая система EBSCO Discovery Service <http://lib.urfu.ru/course/view.php?id=141>;

#### **5.5. Электронные образовательные ресурсы**

1. Зональная научная библиотека <http://lib.urfu.ru>;
2. Каталоги библиотеки <http://lib.urfu.ru/course/view.php?id=76>;
3. Электронный каталог <http://opac.urfu.ru>;
4. Электронно-библиотечные системы <http://lib.urfu.ru/mod/resource/view.php?id=2330>;
5. Электронные ресурсы свободного доступа <http://lib.urfu.ru/course/view.php?id=75>;
6. Электронные ресурсы по подписке <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=1379>.

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием**

Уральский федеральный университет имеет специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы и помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования. Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории.

Уральский федеральный университет имеет материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации программы аспирантуры, обеспечения дисциплин (модулей), научно-исследовательской работы и практик, в соответствии с требованиями к материально-техническому и учебно-методическому обеспечению направленности программы.