



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
ФТД.В.01 Физика полупроводников**

**Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия**

**Направленность (профиль): Физика конденсированного состояния**

**Квалификация (степень): исследователь, преподаватель-исследователь**

**Форма обучения: очная**

**Институт: математики, естествознания и техники**

**Кафедра: физики, радиотехники и электроники**

	<b>очная форма</b>	<b>заочная форма</b>
<b>Курс</b>	<b>2</b>	
<b>Семестр</b>	<b>4</b>	

<b>Лекции</b>	<b>18</b>	
<b>Лабораторные занятия</b>		
<b>Практические (семинарские) занятия</b>	<b>18</b>	
<b>Контроль</b>		
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>36</b>	

**Всего часов: 72**

**Трудоемкость: 2 зачетные единицы.**

Разработчик рабочей программы:

кандидат физико-математических наук, доцент

Д.В. Кузнецов

подпись

## I. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**Цель изучения дисциплины:** усвоение аспирантами знаний по физике полупроводников, об использовании полупроводниковых материалов в твердотельных устройствах нового поколения; изучение модельных представлений и основных теоретических принципов, описывающих свойства полупроводников при различных внешних воздействиях; формирование у аспирантов навыков экспериментального изучения физических параметров полупроводниковых систем.

### **Задачи изучения дисциплины:**

- осознание социальной значимости своей будущей профессии, формирование мотивации к осуществлению профессиональной деятельности;
- подготовка к использованию систематизированных теоретических и практических знаний при решении профессиональных задач.
- изучение физики полупроводников;
- изучение принципов построения и работы электронных приборов различного назначения на основе полупроводниковых материалов.

**Место дисциплины в структуре ОПОП:** реализуется в рамках вариативной части блока ФТД. Факультативы.

**Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с индикаторами достижения компетенций:**

Код компетенции	Индикатор достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-1	<b>знать:</b> - современные тенденции и проблематику научных исследований в области физики конденсированного состояния; - методологические подходы к планированию и осуществлению научных исследований в области физики конденсированного состояния; - основы оценки качества научных исследований в области физики конденсированного состояния.	<b>знает:</b> - знает методологию решения сопряженных оригинальных задач, - методы научных исследований в области физики и астрономии.
	<b>уметь:</b> - планировать и осуществлять самостоятельную научно-исследовательскую деятельность в области физики конденсированного состояния; - составлять и оформлять программу научного исследования, отчетную документацию по итогам проведения научно-исследовательской деятельности; - осуществлять внедрение результатов	<b>умеет:</b> - реализовать на практике оптимальные схемы проведения сложного эксперимента; - получать и проводить обработку новых результатов с использованием стандартного и оригинального программного обеспечения, современных баз данных

	собственной научно-исследовательской деятельности в практику в области физики конденсированного состояния.	
	<b>владеть:</b> - навыками планирования и выполнения самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области физики конденсированного состояния; - методикой планирования и проведения опытно-экспериментальной работы в области физики конденсированного состояния; - навыками оформления научной работы, ее презентации и защиты в области физики конденсированного состояния.	<b>владеет:</b> - экспериментальными навыками и навыками работы на сложном научном оборудовании, - методами обработки новых результатов с использованием стандартного и оригинального программного обеспечения, современных баз данных

## II. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу

### Очная форма обучения

№ п/п	Наименование разделов и тем	Всего	Аудиторные занятия			Сам. раб.
			ЛК	ПЗ	ЛБ	
1.	<b>Раздел 1.</b> Физика полупроводников.	<b>72</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>36</b>
2.	Тема 1. Предмет, цели и задачи курса. Основная терминология. Химическая связь и атомная структура полупроводников.	8	2	2		4
3.	Тема 2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).	8	2	2		4
4.	Тема 3. Основы зонной теории полупроводников. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом	8	2	2		4

	поле кристалла.					
5.	Тема 4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.	8	2	2		4
6.	Тема 5. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.	8	2	2		4
7.	Тема 6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Уравнение кинетики рекомбинации.	8	2	2		4
8.	Тема 7. Оптические явления в полупроводниках. Фотоэлектрические явления.	8	2	2		4
9.	Тема 8. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование.	8	2	2		4
10.	Тема 9. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.	8	2	2		4
11.	<i>Форма отчетности</i>	<i>зачет – 4 семестр</i>				
12.	<i>Итого за 4 семестр</i>	<b>72</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>36</b>
13.	<b>ИТОГО:</b>	<b>72</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>36</b>

**Заочная форма обучения  
не реализуется.**

### **III. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Текущая аттестация проводится в форме контрольной работы, теста, реферата, творческого задания, кейса и др.

#### **Типовой вариант контрольной работы**

1. Нарисовать зонную диаграмму собственного полупроводника, полупроводника n-типа, и полупроводника p-типа.
2. Концентрация электронов в начальный момент времени в полупроводнике составляет  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . За время  $10^{-4} \text{ с}$  эта концентрация уменьшилась до  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Определить время жизни в таком полупроводнике.
3. Определить скорость дрейфа электронов и дырок в собственном германии при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , если полупроводник находится в электрическом поле с напряженностью  $E = 1000 \text{ В/см}$ .
4. Определить и сравнить скорость дрейфа электронов в германии при напряженности поля  $E = 10 \text{ см/кВс}$  его скоростью придвижении на расстоянии  $10 \text{ см}$  в таком же поле в вакууме.
5. Определить ширину запрещенной зоны германия (Ge) при температуре  $T = 500 \text{ К}$ , если при  $T = 300 \text{ К}$  ширина запрещенной зоны  $0,658 \text{ эВ}$ .
6. Определить ширину запрещенной зоны в германии (Ge) при  $T = 300 \text{ К}$ , если при  $T = 0 \text{ К}$  ширина запрещенной зоны равна  $0,73 \text{ эВ}$ .
7. Определить будет ли находиться кристалл германия и кремния в состоянии пробоя, если приложено напряжение  $8 \text{ кВ}$ . Толщина кристалла  $200 \text{ мкм}$ .
8. Определить коэффициенты диффузии ( $D_n, D_p$ ) электронов и дырок, длины диффузионного смещения ( $L_n, L_p$ ) в собственном Si при  $T = 300 \text{ К}$ . Известно, что  $t_p = t_n = 10^{-5} \text{ с}$ .
9. Удельное сопротивление собственного германия равно  $0,43 \text{ мОм}$ . Определить собственную концентрацию носителей Ge при  $T = 300 \text{ К}$ .
10. В кремний введены донорные и акцепторные примеси. Концентрации доноров и акцепторов соответственно равны  $N_D = 50 \cdot 10^{13}$ ,  $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Определить удельное сопротивление.
11. Образец германия легирован сурьмой, так что один атом примеси приходится на  $2 \cdot 10^6$  атомов Ge. ( $N_{\text{Ge}} = 4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ). Определить концентрацию электронов и дырок при температуре  $T = 300 \text{ К}$ , удельное сопротивление легированного полупроводника и коэффициенты диффузии электронов и дырок ( $D_n, D_p$ ).  $N_{\text{Ge}}$  – плотность атомов в германии.
12. Определить ширину запрещенной зоны полупроводника при  $T = 300 \text{ К}$ , полагая, что эффективная масса электрона равна эффективной массе дырки и равна  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

#### **Вопросы к зачету**

#### ( 4 семестр, очная форма обучения)

1. Химическая связь и атомная структура полупроводников. Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах.
2. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.
3. Структуры важнейших полупроводников – элементов AIV , A VI и соединений типов AШBV, AПBV|, AIVBVI.
4. Симметрия кристаллов. 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, ее свойства. Зона Бриллюэна.
5. Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.
6. Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз. Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы). Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
7. Методы легирования полупроводников.
8. Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.
9. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
10. Законы дисперсии для важнейших полупроводников.
11. Изознергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний.
12. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле.
13. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса.
14. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.
15. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках. Функция распределения электронов.
16. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний.
17. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.
18. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

19. Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях.
20. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках. Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.
21. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.
22. Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.
23. Оптические явления в полупроводниках. 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.
24. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение. Поглощение света на свободных носителях заряда. Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана-Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна-Мандельштама).
25. 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.
26. Фотоэлектрические явления. Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость. Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость. Фото-разогрев носителей заряда. Фотоэлектромагнитный эффект.
27. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки. Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования.
28. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.
29. Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка. Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза.
30. Квантовый эффект Холла

#### IV. ПЕРЕЧЕНЬ ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зегря, Г.Г. Основы физики полупроводников : учебное пособие / Г.Г. Зегря, В.И. Перель. – Москва : Физматлит, 2009. – 336 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68394> (дата обращения: 01.09.2020).
2. Перлин, Е.Ю. Лекции по физике твердого тела : учебное пособие : [16+] / Е.Ю. Перлин, А.В. Иванов ; Университет ИТМО. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2019. – Ч. 2. – 135 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=566772> (дата обращения: 01.09.2020).
3. Физика: введение в твердотельную электронику / А.Г. Захаров, Н.А. Какурина, Ю.Б. Какурин, А.С. Черепанцев ; Южный федеральный университет, Инженерно-технологическая академия. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2018. – 108 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=500163> (дата обращения: 01.09.2020).

#### V. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ», НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ пп	Ссылка на информационный ресурс	Наименование разработки в элек- тронной форме	Доступность
1.	<a href="http://edu.ru/">http://edu.ru/</a>	<b>Российское образование: Федераль- ный портал.</b> Включает ссылки на порталы и сайты образова- тельных учреждений; государственные образовательные стандарты; норма- тивные документы; каталог экскурсий и обучающих программ.	Свободный доступ
2.	<a href="http://www.profile-edu.ru">http://www.profile- edu.ru</a>	официальный сайт Министерства об- разования и науки; нормативно- правовое и научно-методическое со- провождение профильного обучения	Свободный доступ

#### VI. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПРАВОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

1.	<a href="http://www.biblioclub.ru">http://www.biblioclub.ru</a>	Электронно-библиотечная система (ЭБС) Университетская библиотека он- лайн	Регистрация через любой университетский компь- ютер. В дальнейшем предо- ставляется неограничен- ный индивидуальный доступ из любой точки, в которой имеется доступ к сети Интернет
2.	<a href="http://www.elibrary.ru">www.elibrary.ru</a>	Российский информационный пор- тал в области науки, технологии, медицины и образования	Свободный доступ



## **VII. ЛИЦЕНЗИОННОЕ И СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

При реализации учебной дисциплины применяется следующее лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Windows;
- Microsoft Office;
- LibreOffice и др.

## **VIII. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Учебные занятия проводятся в аудиториях, укомплектованных специализированной мебелью, в том числе стационарными или переносными техническими средствами обучения (проектор, экран, компьютер/ноутбук).

Самостоятельная работа проводится в кабинетах, оснащенных компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.