

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики полупроводников**



УТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н
В.Е.Блинов
2022 г.

Рабочая программа дисциплины

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ПОЛУПРОВОДНИКОВ 1

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	180	32	32	32	82			2		
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 98 часов										
Компетенции ПК-2										

Ответственный за образовательную программу,
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	9

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Курс позволяет обеспечить формирование базовых знаний по физике полупроводников, полупроводниковым технологиям и принципам действия полупроводниковых приборов.

Цель учебного курса «Введение в физику полупроводников-1» – дать студентам базовые знания по основным разделам физики полупроводников: об атомной структуре, электронных свойствах и основных физических явлениях в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

Учебный курс «Введение в физику полупроводников 1» читается классическим способом: проводятся лекции и практические занятия. При подаче материала лекционного курса используется мультимедийная техника. На экран выводятся формулировки теорем, определения, основные понятия, а также графические иллюстрации, помогающие наглядно подать материал. Все практические занятия проводятся в интерактивной форме. Обсуждаются идеи и способы решения поставленных задач, оптимальность предложенных решений. Поощряется элемент соревновательности. Автор наиболее удачного решения рассказывает его у доски. Существенным элементом образовательных технологий является не только умение студента найти решение задачи, но и способность доходчиво донести его до всей аудитории. Умение ответить на вопросы сокурсников и преподавателя развивает навыки, которые будут необходимы в дальнейшей профессиональной деятельности студента. Лабораторные работы выполняются на базе лабораторий Института физики полупроводников СО РАН. Их выполнение помогает студентам более осознанно выбрать научные задачи и руководителей дипломной практики.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-2 Способность использовать специализированные знания в области физики при решении научных и практических задач в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	<p>ПК -2.2. Применяет теоретические основы и базовые представления научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК -2.3. Использует специализированные знания в области физики при выборе методов расчета, проведении статистического анализа экспериментальных данных в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Знать атомную структуру и элементы симметрии основных полупроводников, типы колебаний атомов в кристаллах с простой и сложной примитивной ячейкой; методы определения основных параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей заряда; основы зонной теории кристаллических твёрдых тел, принцип разделения твёрдых тел на металлы и диэлектрики; место полупроводников в этой классификации.</p> <p>Уметь определять основные типы кристаллических решёток, находить элементы симметрии кристалла, строить вектора основных трансляций и элементарные ячейки, обозначать кристаллографические направления и плоскости;</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		определять экспериментально тип носителей заряда в полупроводнике по знаку термо-ЭДС. Владеть основными понятиями физики твёрдого тела и физики полупроводников; информацией об основных свойствах важнейших полупроводников.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Введение в физику полупроводников 1» реализуется в осеннем семестре 3-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики полупроводников.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	180	32	32	32	82			2		
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 98 часов										
Компетенции ПК-2										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, лабораторные занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, зачёт.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задачи для самостоятельного решения, коллоквиум;
- промежуточная аттестация: зачёт.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 5 зачетных единиц.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;

- лабораторные занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 82 часа;
- промежуточная аттестация (зачёт) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, лабораторные занятия, зачёт) составляет 98 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8	10
1.	Атомная структура полупроводников	1-2	22	4	4	4	10	
2.	Колебания решетки.	3-6	46	8	8	8	22	
3.	Основы зонной теории полупроводников	7-8	22	4	4	4	10	
4.	Энергетические зоны в электрическом поле.	9-10	22	4	4	4	10	
5.	Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках.	11-12	22	4	4	4	10	
6.	Поверхностные и контактные явления в полупроводниках	13-15	34	6	6	6	16	
7.	Кинетические явления в полупроводниках	16	10	2	2	2	4	
8.	Зачет	17	2					2
Всего			180	32	32	32	82	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Раздел 1. Атомная структура полупроводников (4 часа)

Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Пространственная решетка, базис, кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Дифракционные методы определения атомной структуры. Условие Брэгга. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна. Структура важнейших полупроводников: Ge, Si, GaAs. Дефекты структуры в кристаллах.

Раздел 2. Колебания решетки (8 часов)

Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Теплоёмкость кристаллической решетки. Экспериментальные методы изучения колебаний решетки: поглощение и комбинационное рассеяние света, рассеяние нейтронов.

Раздел 3. Основы зонной теории полупроводников (4 часа)

Переход от дискретных атомных уровней к энергетическим зонам в кристаллах. Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла; теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Образование разрешенных и запрещенных зон в приближениях сильно и слабо связанных электронов. Закон дисперсии, эффективная масса, изоэнергетические поверхности. Плотность состояний. Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Энергетические зоны в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного резонанса. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Водородоподобные доноры и акцепторы. Глубокие примесные уровни.

Раздел 4. Энергетические зоны в электрическом поле. (4 часа)

Энергетические зоны в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Водородоподобные примесные центры. Глубокие примесные уровни.

Раздел 5. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках (4 часа)

Функция распределения электронов. Металлы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения зонной теории. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. Невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Определение положения уровня Ферми из уравнения электронейтральности. Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках.

Раздел 6. Поверхностные и контактные явления в полупроводниках (6 часов)

Работа выхода и электронное сродство. Поверхностные электронные состояния. Изгиб зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Обедненные и обогащенные слои пространственного заряда. Контакт металл-полупроводник. Вольтамперная характеристика барьера Шоттки. Энергетическая диаграмма p-n перехода. Диффузионный и дрейфовый токи в p-n переходе. Вольтамперная характеристика p-n перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в p-n переходе. Туннельный диод. Биполярный транзистор. Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Варизонные полупроводники. Структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Инверсионные слои в МДП-структурах. Полевой транзистор.

Раздел 7. Кинетические явления в полупроводниках (2 часа)

Характер движения носителей заряда в полупроводниках. Диффузия и дрейф. Тепловая и дрейфовая скорости. Коэффициент диффузии и подвижность, их связь со средним временем между

столкновениями. Соотношение Эйнштейна. Основные кинетические явления: проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС.

Программа практических и лабораторных занятий (64 часа)

1. Элементы симметрии кристаллов, пространственная решётка и базис. Основные вектора трансляции, обратная решётка, ячейка Вигнера-Зейтца и зона Бриллюэна. **(8 часов)**
2. Вычисление закона дисперсии колебаний решётки для простейших моделей кристалла. **(16 часов)**
3. Нахождение зонной структуры в одномерном потенциале с помощью программы «Квант». Происхождение глубоких примесных уровней. **(8 часов)**
4. Движение электронов во внешних полях. Определение эффективных масс с помощью циклотронного резонанса. **(8 часов)**
5. Уравнение электронейтральности и методы его решения. Вычисление концентрации электронов и дырок в легированных полупроводниках. **(8 часов)**
6. Метод слабой связи. Метод сильной связи. Вычисление энергетических зон и щелей, эффективных масс. **(12 часов)**
7. Дифракция рентгеновских лучей: условие Брэгга, построение Эвальда, атомный и структурный факторы. **(4 часа)**

Самостоятельная работа студентов (82 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	32
Подготовка и сдача задач для самостоятельного решения	16
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	34

5. Перечень учебной литературы.

1. А. В. Ненашев, В. Л. Альперович. Колебания кристаллической решётки. Учебное пособие. РИЦ НГУ, Новосибирск, 2015., ISBN 978-5-4437-0417-3 (20 экз.)
2. В. Л. Альперович, А. В. Ненашев. Введение в физику полупроводников. Программа курса, задание, рекомендованная литература. URL: <https://cloud.mail.ru/public/56j4/3AcsnDIUY>.
3. В.Л. Альперович. Дополнительные вопросы и комментарии к программе кандидатского экзамена по физике полупроводников. Методические указания, схема ответов по наиболее сложным разделам, контрольные вопросы, задачи, рекомендованная литература. – URL: <https://cloud.mail.ru/public/52wg/Wk9FeYP8C>.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

4. В. Л. Альперович, А. В. Ненашев. Введение в физику полупроводников. Программа курса, задание, рекомендованная литература. URL: <https://cloud.mail.ru/public/56j4/3AcsnDIUY>.

5. В.Л. Альперович. Дополнительные вопросы и комментарии к программе кандидатского экзамена по физике полупроводников. Методические указания, схема ответов по наиболее сложным разделам, контрольные вопросы, задачи, рекомендованная литература. – URL: <https://cloud.mail.ru/public/52wg/Wk9FeYP8C>.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Интернет-ресурсы:

1. Электронный архив: «Новые полупроводниковые материалы: Характеристики и свойства» - URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/rintroduction.html>
2. Раздел "Образование" сайта ИФП СО РАН - URL: <https://www.isp.nsc.ru/obrazovanie>

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

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

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в виде вопросов на знание материала предыдущих занятий, коллоквиума и сдачи задач для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Зачёт по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-2 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области физических процессов, происходящих в полупроводниковых материалах и структурах. В конце 5-го семестра выставляется зачёт по результатам решения задач из задания. Для получения зачёта необходимо решить и сдать не менее 2/3 задач, запланированных на 5-й семестр (задачи 1–15 из задания).

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК -2.2. Применяет теоретические основы и базовые представления научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать атомную структуру и элементы симметрии основных полупроводников, типы колебаний атомов в кристаллах с простой и сложной примитивной ячейкой; методы определения основных параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей заряда; основы зонной теории кристаллических твёрдых тел, принцип разделения твёрдых тел на металлы и диэлектрики; место полупроводников в этой классификации. Уметь определять основные типы кристаллических решёток, находить элементы симметрии кристалла, строить вектора ос-	Коллоквиум, зачет.

	новых трансляций и элементарные ячейки, обозначать кристаллографические направления и плоскости; определять экспериментально тип носителей заряда в полупроводнике по знаку термоЭДС.	
ПК-2.3. Использует специализированные знания в области физики при выборе методов расчета, проведении статистического анализа экспериментальных данных в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Владеть основными понятиями физики твёрдого тела и физики полупроводников; информацией об основных свойствах важнейших полупроводников.	Коллоквиум, зачет.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Введение в физику полупроводников 1».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 2.2	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

Наличие навыков (владение опытом)	ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.
-----------------------------------	--------	--	--	--	---

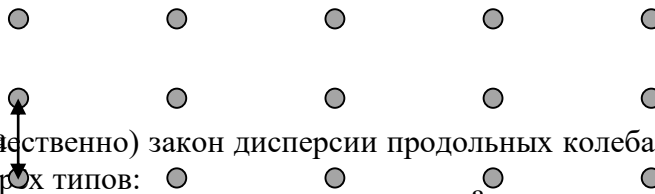
10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Задачи для самостоятельного решения

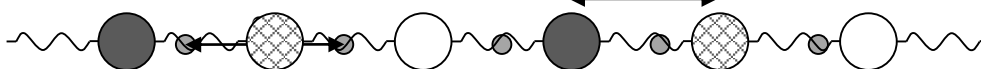
1. Рассчитать следующие параметры кристаллического кремния:
 - а) число атомов, содержащихся в кубической ("кристаллографической") элементарной ячейке;
 - б) расстояние между атомными ядрами соседних атомов, полагая, что длина ребра кубической элементарной ячейки кремния $a_0 = 0.543$ нм;
 - в) объем наименьшей ("примитивной") элементарной ячейки (в единицах объема кубической ячейки);
 - г) число атомов, приходящихся на единицу площади в кристаллических плоскостях (100), (111) и (110).

2. Имеется ли центр симметрии в кристаллической решётке (а) кремния, (б) арсенида галлия? Если имеется, то найдите его.

3. Для изображённой здесь двумерной решётки нарисуйте ячейку Вигнера-Зейтца, обратную решётку и зону Бриллюэна.



4. Изобразите (качественно) закон дисперсии продольных колебаний одномерной цепочки, состоящей из атомов трёх типов:



Считать, что массы атомов разных типов близки друг к другу, но не равны.

5. Нарисуйте законы дисперсии электронов и дырок для Вашего любимого полупроводника.

6. Найдите эффективную плотность состояний зоны проводимости (N_c) в арсениде галлия ($m_e^* = 0.067 m_0$, где m_0 — масса электрона в вакууме) при температуре 100 К, если известно, что для материала с $m_e^* = m_0$ при $T = 300$ К $N_c = 2.5 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

7. Оцените энергию залегания мелких водородоподобных уровней донорного типа в GaAs. Сравните полученные значения с шириной запрещённой зоны и тепловой энергией kT ($T = 300$ К).

8. Для арсенида галлия (GaAs) оцените, при какой минимальной концентрации доноров станут заметны эффекты, связанные с перекрытием электронных оболочек соседних примесей.

9. Найти температурный интервал, в котором концентрация электронов в кремнии с точностью не хуже 10% равна концентрации введённой примеси. Полупроводник легирован фосфором $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, энергия залегания донорного уровня $\varepsilon_d = 45 \text{ мэВ}$.

10. Арсенид галлия легирован мелкой водородоподобной примесью.

а) Нарисуйте (качественно) зависимость $\log n$ от $1/T$, где n — концентрация электронов в зоне проводимости, T — температура, для концентраций примеси 10^{15} см^{-3} и 10^{16} см^{-3} .

б) Оцените значения температур, соответствующих изломам нарисованной ломаной линии.

11. В кристалле GaAs содержится амфотерная примесь Ge. Концентрация германия в узлах галлия 10^{15} см^{-3} , в узлах мышьяка $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

а) Найдите концентрацию электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне при температуре 300 К.

б) Что произойдёт с концентрациями дырок и электронов, если в этом кристалле создать глубокие донорные уровни, расположенные в середине запрещённой зоны, с концентрацией 10^{16} см^{-3} ?

Энергия ионизации донорного уровня Ge в GaAs — 6 мэВ, акцепторного уровня Ge — 30 мэВ, ширина запрещённой зоны GaAs 1,42 эВ, эффективная масса электронов $0,067 \cdot m_0$, эффективная масса плотности состояний в валентной зоне $0,53 \cdot m_0$. Фактором вырождения примесных уровней пренебречь.

12. В зоне проводимости арсенида галлия n -типа при $T=300 \text{ К}$ имеются электроны с концентрацией 10^{16} см^{-3} . Какова концентрация электронов в L-долине зоны проводимости?

(L-долина в GaAs находится на 0,29 эВ выше Γ -долины; эффективная масса плотности состояний в L-долине — $0,85 \cdot m_0$, в Γ -долине — $0,067 \cdot m_0$.)

13. Для кремниевого p - n перехода с уровнями легирования $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в n -типе, $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в p -типе:

а) нарисуйте зонную диаграмму в несмещённом состоянии;

б) нарисуйте зонную диаграмму при обратном смещении 1 В;

в) во сколько раз (приблизительно) изменится ширина области обеднения при приложении обратного смещения 1 В (по сравнению с несмещённым состоянием)?

г) какая часть области обеднения приходится на p -область, и какая — на n -область?

Ширина запрещённой зоны кремния $\approx 1 \text{ эВ}$.

14. Нарисовать зонную диаграмму в масштабе и вычислить толщину слоя обеднения идеального барьера Шоттки металл-кремний, предполагая, что работа выхода металла равна 4,75 эВ, электронное сродство кремния — 4,05 эВ. Кремний легирован донорами с концентрацией

а) $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$;

б) $N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Сравнить толщину с длиной свободного пробега и тепловой длиной волны де Бройля.

15. Вычислить толщину приповерхностной области пространственного заряда (в мкм) и концентрацию поверхностных зарядов (в см^{-2}) для области обеднения n -GaAs с концентрацией доноров $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, если известно, что величина поверхностного изгиба зон составляет $\phi_s = 1 \text{ эВ}$.

**Вопросы для подготовки к коллоквиуму по курсу
«Введение в физику полупроводников 1»:**

1. Перечислить все элементы симметрии куба.
2. Выбрать векторы основных трансляций и элементарную (примитивную) ячейку в двумерной решетке, состоящей из равносторонних треугольников. Показать, что этот выбор неоднозначен. Найти ячейку Вигнера-Зейтца для данной решетки. Чем замечательна ячейка Вигнера-Зейтца?
3. Описать атомную структуру кремния. Нарисовать кристаллографическую элементарную ячейку.
4. Описать атомную структуру арсенида галлия.
5. Как можно получить полупроводниковый кристалл с высоким удельным сопротивлением ("полуизолирующий")?
6. Оценить размер волновой функции электрона, связанного на мелком доноре в GaAs.
7. Имеется коробка, в которой попеременно лежат образцы p- и n-типов. Какими экспериментальными методами можно воспользоваться, чтобы рассортировать образцы по типу проводимости? Какой метод, на ваш взгляд, самый простой и как его реализовать?
8. Какова ширина запрещенной зоны E_g в Ge, Si, GaAs и GaN (в электрон-вольтах)? Какой длине волны λ (в микронах) электромагнитного излучения соответствует порог собственного поглощения в этих полупроводниках?
9. В чем состоят методы сильной и слабой связи?
10. Чем определяется ширина разрешенной зоны в методе сильной связи?
11. Чем определяется ширина запрещенной зоны в методе слабой связи?
12. В чем сходство и различие между импульсом и квазиимпульсом электрона в кристалле?
13. Чему равно произведение концентраций свободных электронов и дырок $n \cdot p$ в невырожденном полупроводнике?
14. Выразить энергию Ферми через концентрацию электронов в вырожденном полупроводнике при низкой температуре.
15. Как получаются вырожденные полупроводники, в которых концентрация электронов n в зоне проводимости при низких температурах не зависит от температуры T ? На первый взгляд, при понижении температуры электроны должны связываться на донорах, и концентрация свободных электронов должна стремиться к нулю $n \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$.
16. Нарисовать зависимость положения уровня Ферми от температуры в некомпенсированном и частично компенсированном полупроводнике n-типа (привязать к зонной диаграмме).
17. Нарисовать график зависимости дрейфовой скорости электронов от электрического поля (качественно).
18. Как зависит время релаксации импульса от энергии электронов при рассеянии (а) на заряженных примесях; (б) на деформационном потенциале акустических фононов (в) на поляризационном потенциале оптических фононов (в полярных полупроводниках типа GaAs)? Нарисовать графики (качественно).
19. Как зависит подвижность электронов от температуры? Нарисовать графики (качественно) для двух образцов полупроводника с различной концентрацией заряженных примесей.
20. В образце действуют два механизма рассеяния: на ионизированных примесях и на фононах. Если бы действовал только первый механизм рассеяния, то подвижность была бы $\mu_1 = 800 \text{ см}^2/(\text{Вс})$, в случае действия только второго механизма – $\mu_2 = 200 \text{ см}^2/(\text{Вс})$. Чему равна подвижность с учётом обоих механизмов рассеяния?
21. Нарисовать на зонной диаграмме полупроводника p-типа (энергия-координата) графики изменения квазиуровней Ферми электронов и дырок с координатой при неоднородном освещении (левая половина полупроводника в темноте, правая – освещена).
22. Выразить произведение концентраций электронов и дырок в неравновесных условиях через квазиуровни Ферми.
23. Нарисовать графики зависимости величины фотопроводимости от времени при периодическом включении и выключении освещения для трёх случаев: (а) период много

больше времени жизни; (б) период много меньше времени жизни; (в) период сравним с временем жизни.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Введение в физику полупроводников 1»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного