

**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**



Рабочая программа дисциплины

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ПОЛУПРОВОДНИКОВ 2

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
6	72	27	16		7	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 47 часов										
Компетенции ПК-1										

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.	7
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.	8

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

Курс выступает как важный фактор формирования у студента целостного научного мировоззрения и физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа явлений в конденсированных средах вообще и в физике полупроводников в частности, конструктивных взглядов на решение научно-технических проблем современной полупроводниковой микро- и наноэлектроники.

Цель учебного курса «Введение в физику полупроводников 2» – дать студентам дополнительные знания по основным разделам физики полупроводников: об атомной структуре, электронных свойствах и основных физических явлениях в полупроводниках и полупроводниковых структурах, а также о технологии создания и физических принципах работы полупроводниковых приборов.

Учебный курс «Введение в физику полупроводников 2» 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.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Знать методы выращивания объёмных кристаллов и эпитаксиальных полупроводниковых структур; основные кинетические явления в полупроводниках;</p> <p>оптические явления в полупроводниках, основы технологии создания и физические принципы работы полупроводниковых приборов.</p> <p>Уметь сопоставлять преимущества и недостатки использования методов выращивания и определения основных параметров полупроводников и полупроводниковых структур; объяснять основные микроскопические механизмы поглоще-</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		<p>ния света в прямозонных и непрямоzonных полупроводниках на языке зонных диаграмм.</p> <p>Владеть основными понятиями физики твёрдого тела и физики полупроводников; методами определения основных параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей заряда.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Введение в физику полупроводников 2» реализуется в весеннем 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. Трудоемкость 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
6	72	27	16		7	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 47 часов										
Компетенции ПК-1										

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, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задачи для самостоятельного решения;

- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 27 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 7 часов;
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка к экзамену, консультации, экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 47 часов.

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ 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		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Кинетические явления в полупроводниках	1-3	9	5	3	1	
2.	Механизмы рассеяния	4-5	7	4	2	1	
3.	Оптические явления в полупроводниках	6-8	9	5	32	1	
4.	Явления с участием неравновесных носителей заряда	9-11	9	5	3	1	
5.	Полупроводниковые излучатели и фотоприемники	12-13	6	3	2	1	
6.	Низкоразмерные полупроводниковые структуры	14-15	5	3	1	1	
7.	Основы технологии полупроводников	16	5	2	2	1	
8.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
9.	Консультации		2				2
10.	Экзамен		4				2
Всего			72	27	16	7	22

Программа и основное содержание лекций (27 часов)

Раздел 1. Кинетические явления в полупроводниках (5 часов)

Кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения электронов во внешних полях. Основные кинетические явления: проводимость, эффект Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, подвижность. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.

Раздел 2. Механизмы рассеяния (4 часа)

Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Рассеяние носителей заряда на акустических и оптических фононах. Рассеяние носителей заряда на заряженных примесях. Явления в сильном электрическом поле. Горячие электроны. Эффект Ганна.

Раздел 3. Оптические явления в полупроводниках (5 часов)

Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Механизмы поглощения света в полупроводниках. Межзонные оптические переходы и край собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Экситонное поглощение. Поглощение света на колебаниях решетки. Поглощение света на свободных носителях заряда. Влияние примесей на оптические свойства. Оптические явления во внешних электрическом и магнитном полях.

Раздел 4. Явления с участием неравновесных носителей заряда (5 часов)

Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Времена жизни. Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов.

Оже-рекомбинация. Диффузия неравновесных носителей заряда. Длина диффузии.

Раздел 5. Полупроводниковые излучатели и фотоприемники (3 часа)

Полупроводниковые излучатели: светодиоды и полупроводниковые лазеры.

Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры. Внутренний фотоэффект. Фотопроводимость и фотоэдс. Полупроводниковые фотоприёмники: фотосопротивления и фотодиоды. Солнечные элементы. Внешний фотоэффект. Фотоэмиттеры с отрицательным электронным средством.

Раздел 6. Низкоразмерные полупроводниковые структуры (3 часа)

Размерное квантование. Квантовые ямы. Композиционные сверхрешетки I и II типов.

Легированные сверхрешетки. Квантовые проволоки. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах. Электронный транспорт в низкоразмерных системах.

Раздел 7. Основы технологии полупроводников (2 часа)

Методы выращивания объемных монокристаллов и эпитаксиальных плёнок. Молекулярно-лучевая и металлорганическая эпитаксия. Методы легирования полупроводников. Оптическая и электронная литография.

Программа практических занятий (16 часов)

1. Контакт металл-полупроводник и p-n переход: зонная диаграмма, вольтамперная характеристика. (2 часа)
2. Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Метод вольтфарадных характеристик. (1 час)
3. Полупроводниковые гетероструктуры. (2 часа)
4. Основы построения усилителей на биполярных транзисторах. (2 часа)
5. Соотношение Эйнштейна. Эффект Холла. Термо-ЭДС. (2 часа)
6. Методы решения кинетического уравнения Больцмана. (2 часа)

7. Кинетика неравновесных носителей заряда. Полупроводниковые фотоприёмники. (2 часа)
8. Решение уравнения Шрёдингера в локализирующем потенциале. Электронные состояния в квантовых ямах, квантовых проволоках, квантовых точках и сверхрешётках. Плотность состояний. (2 часа)
9. Оптические и электрические явления в низкоразмерных системах. (1 час)

Самостоятельная работа студентов (25 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	3
Подготовка к контрольной работе	4
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. А. В. Ненашев, В. Л. Альперович. Колебания кристаллической решётки. Учебное пособие. РИЦ НГУ, Новосибирск, 2015. (20 экз.)
2. В. Л. Альперович, А. В. Ненашев. Введение в физику полупроводников. Программа курса, задание, рекомендованная литература. URL: <https://cloud.mail.ru/public/56j4/3AcsnD1UY>.
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/56j4/3AcsnD1UY>.
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 и сдачи задач для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация – экзамен – проводится в конце 6-го семестра. Оценка знаний, умений, навыков и освоения компетенций обучающимися в рамках промежуточной аттестации проводится с учетом оценки за работу в семестре (РС) и ответов на экзамене.

Оценка за РС учитывает активность студента на занятиях, оцениваемую преподавателем, посещение занятий, а также количество сданных задач из задания для самостоятельного решения. За РС выставляется оценка “неудовлетворительно” в случае сдачи менее 80% задач из заданий.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать методы выращивания объёмных кристаллов и эпитаксиальных полупроводниковых структур; основные кинетические явления в полупроводниках; оптические явления в полупроводниках, основы технологии создания и физические принципы работы полупроводниковых приборов.	Решение заданий, экзамен.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь сопоставлять преимущества и недостатки использования методов выращивания и определения основных параметров полупроводников и полупроводниковых структур; объяснять основные микроскопические механизмы поглощения света в прямозонных и непрямозонных полупроводниках на языке зонных диаграмм.	Решение заданий, экзамен.
ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специ-	Владеть основными понятиями физики твёрдого тела и физики полупроводников; методами определения основных параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей,	Решение заданий, экзамен.

физики объекта исследования	времени жизни неосновных носителей заряда.	
-----------------------------	--	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Введение в физику полупроводников 2».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	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 1.2	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 1.3	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

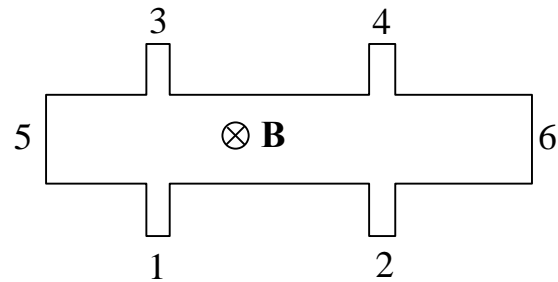
1. Для GaAs рассчитать среднюю тепловую скорость электронов, среднюю длину и время свободного пробега и тепловую длину волны де Бройля. Температура комнатная. Подвижность электронов равна $9400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

2. Измерения на холловском мостике при магнитном поле $B = 0,01 \text{ Тл}$, температуре 300 К и токе $I_{5 \rightarrow 6} = 10 \text{ мА}$ дали следующие показания:

$$U_{12} \equiv \varphi_1 - \varphi_2 = 500 \text{ мВ},$$

$$U_{13} \equiv \varphi_1 - \varphi_3 = 0,15 \text{ мВ}.$$

Найдите концентрацию (в см^{-3}), подвижность (в $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) и коэффициент диффузии (в $\text{см}^2/\text{с}$) основных носителей, а также их знак. Расстояние между контактами 1 и 2 — 1 см, между 1 и 3 — 0,2 см, толщина пластины 0,04 см. Холловский фактор считать равным 1.



3. Рассчитать пороговую длину волны излучения, вызывающего генерацию электрон-дырочных пар в Si, Ge и GaAs. Определить, к какому диапазону на шкале электромагнитных волн относятся данные длины волн. Изобразить переходы на дисперсионных зависимостях.

4. Оценить величину фотоэдс, возникающую на разомкнутых концах p - n кремниевого перехода при равномерном по площади освещении монохроматическим световым потоком $I = 10^{12}$ фотонов/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$), падающим перпендикулярно плоскости перехода и вызывающим рождение электрон-дырочных пар. Коэффициент поглощения света $\alpha = 10^2 \text{ см}^{-1}$, толщина освещаемой n -области $d_n = 3 \text{ мкм}$, толщина p -области $d_p = 1 \text{ мм}$. Уровень легирования p -области $p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, n -области $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Коэффициент диффузии и время жизни электронов в p -области равны $D_n = 25 \text{ см}^2/\text{с}$ и $\tau_n = 0.1 \text{ мс}$, соответственно.

5. Квантовая яма представляет собой слой арсенида галлия толщиной 25 нм, окружённый сверху и снизу твёрдым раствором $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$.

а) Найдите наименьшую энергию электрона в этой квантовой яме, приняв за начало отсчёта энергии край зоны проводимости в объёмном арсениде галлия. Яму считать глубокой. Эффективная масса электронов в арсениде галлия $0,067 \cdot m_0$.

б) Нарисуйте зависимость плотности состояний от энергии в диапазоне энергий 0–0,1 эВ. Проставить все необходимые цифры на осях.

в) Нарисуйте (качественно) закон дисперсии электронов в квантовой яме в том же диапазоне энергий.

г) Эту квантовую яму заполнили электронами с концентрацией 10^{11} см^{-2} . При каких температурах электронный газ будет невырожденным? При каких — сильно вырожденным?

Примерные вопросы на экзамен

1. Нарисовать (качественно) законы дисперсии колебаний одномерной цепочки с периодом a и базисом из двух атомов. Как изменится этот рисунок при переходе от одномерной цепочки к трехмерному кристаллу с таким же периодом решетки?
2. Проиллюстрировать образование энергетических зон из атомных уровней на зависимости энергии электронных состояний от расстояния a между периодически расположенными атомами.
3. Какими квантовыми числами следует характеризовать состояние электрона в кристалле? Написать выражение для волновой функции состояния электрона (теорема Блоха).

4. Нарисовать графики зависимостей плотности состояний в зонах от энергии электронов.
5. Функция распределения Ферми: написать выражение и нарисовать графики.
6. Нарисовать график температурной зависимости концентрации электронов в донорном полупроводнике.
7. Известно, что толщина приповерхностной области пространственного заряда составляет приблизительно 1 мкм для n-GaAs с концентрацией доноров $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и величиной поверхностного изгиба зон $\phi_s = 0.8 \text{ эВ}$. Чему равна эта толщина для n-GaAs с концентрацией доноров $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, если величина изгиба зон неизменна? Нарисовать зонную диаграмму приповерхностной области обеднения.
8. Нарисовать зонную диаграмму несимметричного p-n перехода, в котором уровень легирования n-области втрое выше, чем p-области. Под зонной диаграммой нарисовать графики плотности объемного заряда и электрического поля.
9. Как зависит подвижность электронов от температуры? Нарисовать графики (качественно) для двух образцов полупроводника с различной концентрацией заряженных примесей.
10. Объяснить на качественном уровне природу поверхностных состояний.
11. Нарисовать графики распределения заряда, поля и потенциала вблизи поверхности для случаев обеднения, обогащения и инверсии в полупроводниках n- и p-типа.
12. Объяснить, в чём заключается эффект поля.
13. Нарисовать графики распределения заряда, поля и потенциала (зонную диаграмму) p-n перехода и барьера Шоттки. Пояснить происхождение зарядов.
14. Нарисовать зонную диаграмму варизонного полупроводника, например $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ с составом x , увеличивающимся слева направо.
15. Нарисовать качественно график зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов для прямозонного полупроводника с учётом кулоновского взаимодействия электронов и дырок.
16. При каких условиях поглощение света на свободных носителях заряда может быть описано классической моделью Друде?
17. Сравнить работу светодиода и лазера.
18. В чем состоят основные преимущества полупроводниковых лазеров на двойных гетероструктурах по сравнению с лазерами на обычном p-n переходе?
19. Чем определяется ширина линий поглощения и излучения при переходах примесь-зона?
20. Сверхрешётки какого типа – первого или второго – больше подходят для создания световых приборов и фотоприёмников? Пояснить ответ на зонной диаграмме.
21. Объяснить принципы работы фотодиода и светодиода на p-n переходах.
22. Нарисовать плотность состояний в зависимости от энергии электронов в квантующем магнитном поле. Объяснить, почему в металле или в вырожденном полупроводнике при изменении магнитного поля возникают периодические по $1/H$ осцилляции величины магнетосопротивления (эффект Шубникова-де Гааза) и других физических свойств.

Пример билета на экзамен

- 1 Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Энергетические зоны в электрическом поле.
- 2 Поглощение света на колебаниях решетки и на свободных носителях заряда.

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 2»
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