

**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
КРИСТАЛЛОФИЗИКА 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
6	72	32	32		6			2		
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 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
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
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.

Учебный курс «Кристаллофизика полупроводников-1» направлен на формирование у студентов базовых знаний в области кристаллографии, кристаллофизики и кристаллохимии, знакомство с которыми необходимы для формирования целостной системы знаний в области физики твердого тела и физики полупроводников. Курс выступает как важный фактор формирования у студента научного подхода к решению фундаментальных и практических задач, знакомит с различными методами исследования объёмных и поверхностных свойств твердых тел.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>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 спецификации объекта исследования</p>	<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 спецификации объекта исследования</p>	<p>Знать основные закономерности строения таблицы Д.И. Менделеева, строение атомов и молекул, механизм образования и типы химических связей; связь между кристаллохимическим строением кристалла и основными параметрами полупроводников: шириной запрещенной зоны, подвижностью.</p> <p>Уметь объяснить связь между физическими параметрами полупроводниковых материалов (ширина запрещенной зоны, подвижность носителей заряда, теплопроводность) и их кристаллохимическими характеристиками (длина связи, эффективные заряды, разность электроотрицательностей); определять основные типы кристаллических решёток, находить элементы симметрии кристалла, строить вектора основных трансляций и элементарные ячейки, обозначать кристаллографические направления и плоскости.</p> <p>Владеть основными понятиями кристаллофизики твёрдого тела и физики полупроводников; информацией о современных аналитических методах исследования структуры и электронных свойств объёма и поверхности кристаллов.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Учебный курс «Кристаллофизика полупроводников-1» реализуется в весеннем семестре 3-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению **03.03.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**. Он является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики полупроводников. Курс направлен на формирование у студентов базовых знаний в области кристаллографии, кристаллофизики и кристаллохимии, он знакомит обучающихся с различными методами исследования свойств твёрдых тел.

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
6	72	32	32		6			2		
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 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, зачёт.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

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

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 6 часов;
- промежуточная аттестация (зачёт) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 66 часов.

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

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

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (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.	Структура электронных оболочек атомов	1	6	2	4		
2.	Природа химической связи	2-3	4	4			
3.	Химическая связь и структура кристаллов	4	6	2	4		
4.	Идеальный кристалл	5-6	8	4	4		
5.	Структура кристаллов и физико-химические свойства полупроводников	7	2	2			
6.	Методы анализа структуры кристаллов	8-9	14	4	8	2	
7.	Рост кристаллов (введение)	10-11	14	4	8	2	
8.	Методы выращивания кристаллов	12-13	4	4			
9.	Легирование полупроводников	14-16	12	6	4	2	
10.	Зачет	17	2				2
Всего			72	32	32	6	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

1. Структура электронных оболочек атомов (2 часа).
 - 1.1. Атом водорода. Квантовые числа. Радиальные и угловые функции. Многоэлектронные атомы. Электронные оболочки. Электронная конфигурация атомов. Вырождение. Правило Хунда. Корреляционное взаимодействие. Периодическая система Д.И. Менделеева. Энергия ионизации. Средство к электрону. Атомные радиусы.
2. Природа химической связи (4 часа).
 - 2.1. Феноменологическое описание. Свойства химической связи в молекуле водорода. Метод валентных связей. Спиновая валентность атомов. Приближение молекулярных орбиталей. Связывающие и разрыхляющие орбитали.
 - 2.2. Двухатомные молекулы с одинаковыми атомами. Запреты, обусловленные симметрией. π - и σ - связи. Гетерополярные двухатомные молекулы. Пространственная структура сложных молекул и гибридизация атомных орбиталей.
3. Химическая связь и структура кристаллов (2 часа).
 - 3.1. Общая характеристика элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Кремний, германий, арсенид галлия, теллурид кадмия, теллурид ртути. Химическая связь в полупроводниковых соединениях $A^N B^{8-N}$. Степень ионности связи. Описание возникновения ионности в приближении молекулярных орбиталей. Понятие электроотрицательности. Шкала электроотрицательности по Полингу. Металлическая составляющая связи, ионная составляющая связи и ширина запрещенной зоны в полупроводниках.
4. Идеальный кристалл (4 часа).

- 4.1. Симметрия кристаллов. Кристаллографические характеристики полупроводников: решетки, кристаллографические плоскости, индексы Миллера, связь межплоскостных расстояний с индексами Миллера семейства плоскостей.
- 4.2. Анизотропия. Структура алмаза, сфалерита, вюрцита. Сингонии. Решетки Браве.
5. Структура кристаллов и физико-химические свойства полупроводников (**2 часа**).
 - 5.1. Связь между физическими параметрами полупроводниковых материалов (ширина запрещенной зоны, подвижность носителей заряда, теплопроводность) и их кристаллохимическими характеристиками (длина связи, эффективными зарядами q^* , разностью электроотрицательностей ΔX). Влияние ионной составляющей на ширину запрещенной зоны в изоэлектронных рядах полупроводниковых соединений. Химические связи в полупроводниках, производных от ANB₈-N. Правило нормальной валентности. Полупроводниковые твердые растворы.
6. Методы анализа структуры кристаллов (**4 часа**).
 - 6.1. Методы структурного анализа кристаллических полупроводников. Рентгеновский и электронографический анализ. Кинематическая теория дифракции рентгеновских волн.
 - 6.2. Интерференционная функция Лауэ. Обратная решетка. Атомный фактор. Структурный фактор. Фактор Дебая - Уоллера.
7. Рост кристаллов (введение) (**4 часа**).
 - 7.1. Гомогенное и гетерогенное зародышеобразование, феноменологический подход. Термодинамика и кинетика зародышеобразования. Микроскопические механизмы роста. Возникновение точечных дефектов при росте кристаллов. Термодинамика и кинетика дефектообразования. Энтальпия и энтропия образования и миграции дефектов. Равновесная концентрация дефектов.
 - 7.2. Ионизационное равновесие. Энтропия ионизации. Электростатическое и упругое взаимодействие дефектов. Нестехиометрия. Область гомогенности.
8. Методы выращивания кристаллов (**4 часа**).
 - 8.1. Методы выращивания объемных кристаллов. Метод Чохральского, метод Бриджмена, зонная плавка.
 - 8.2. Генерация дислокаций в растущем кристалле. Получение бездислокационных кристаллов.
9. Легирование полупроводников (**6 часов**).
 - 9.1. Модификация свойств кристаллов легированием. Термодинамика и кинетика легирования.
 - 9.2. Коэффициент распределения, растворимость примесей в полупроводниках. Введение примесей в процессе роста. (3) Диффузионное легирование. Механизмы диффузии. Коэффициент диффузии. Трансмутационное легирование и ионная имплантация.

Программа практических занятий (32 часа)

1. Структура электронных оболочек атомов (4 часа)
2. Химическая связь и структура кристаллов (4 часа)
3. Идеальный кристалл (4 часа)
4. Методы анализа структуры кристаллов (8 часов)
5. Рост кристаллов (введение) (8 часов)
6. Легирование полупроводников (4 часа)

Самостоятельная работа студентов (6 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	3
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	3

5. Перечень учебной литературы.

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990., ISBN 5-02-014032-5 (39 экз.)
2. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. М: Альянс, 2013. (10 экз.)
3. Левинштейн М.Е., Симин Г.С. Барьеры: от кристалла до интегральной схемы М.: Наука, 1987. (5 экз.)
4. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978. (33 экз.)

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

5. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твёрдого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
6. Шалимова К.В. Физика полупроводников: Учеб. пособ. для вузов. М. Энергия, 1971.

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.

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 решения задач.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Зачет по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области физических процессов, происходящих в полупроводниковых материалах и структурах; основные закономерности формирования законов в области теоретической и экспериментальной физики. В конце семестра выставляется зачет по результатам решения задач из задания. Для получения зачета необходимо решить и сдать не менее 2/3 задач, запланированных на 6-й семестр (задачи 1–15 из задания).

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 основные закономерности строения таблицы Д.И. Менделеева, строение атомов и молекул, механизм образования и типы химических связей; связь между кристаллохимическим строением кристалла и основными параметрами полупроводников: шириной запрещенной зоны, подвижностью.	Решение задач, зачет.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь объяснить связь между физическими параметрами полупроводниковых материалов (ширина запрещенной зоны, подвижность носителей заряда, теплопроводность) и их кристаллохимическими характеристиками (длина связи, эффективные заряды, разность электроотрицательностей); определять основные типы кристаллических решёток, находить элементы симметрии кристалла, строить вектора основных трансляций и элементарные ячейки, обозначать кристаллографические направления и плоскости.	Решение задач, зачет.
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	Владеть основными понятиями кристаллофизики твёрдого тела и физики полупроводников; информацией о современных аналитических методах исследования структуры и электронных свойств объёма и поверхности кристаллов.	Решение задач, зачет.

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

Таблица 10.2

		Уровень освоения компетенции
--	--	------------------------------

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Не сформирован (не зачтено)	Пороговый уровень (зачтено)	Базовый уровень (зачтено)	Продвинутый уровень (зачтено)
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

Примеры задач для самостоятельного решения по курсу «Кристаллофизика полупроводников 1»

1. Вычислить относительную долю пространства (коэффициент упаковки), заполненного сферами, в следующих структурах: простая кубическая структура; объёмноцентрированная и гранецентрированная структуры; структура алмаза.
2. Определить в элементарной ячейке алмаза, сфалерита и вюрцита координаты всех атомов базиса.
3. Найдите в элементарной ячейке алмаза:
 - а) координаты всех тетраэдрических междуузлий;
 - б) координаты всех гексагональных междуузлий.

Пояснение: тетраэдрическим (гексагональным) междуузлем называется точка, расстояние от которой до четырёх (шести) ближайших узлов решетки одинаково.

4. Рассчитайте плотность оборванных связей для нереконструированных граней (100), (110) и (111) идеального кристалла кремния.
5. Какие плоскости являются плоскостями спайности в структуре алмаза, сфалерита, вюрцита? Почему?

Пояснение: плоскостью спайности называется плоскость, по которой кристалл раскалывается легче всего.

6. Провести индцирование граней (определить индексы) гексагонального кристалла в системе координат:
 - а) - трёхосной,
 - б) - четырёхосной
7. Осколок разбившейся пластины GaAs имеет форму равностороннего треугольника. Какова ориентация пластины?
8. На подложке кремния (001) изготовлена монослойная сверхрешетка Si/Ge. Постройте элементарную ячейку этой сверхрешетки. Имеет ли данная структура центр инверсии?

Пояснение: сверхрешеткой $(A)_n(B)_m\{hkl\}$ называется кристалл, в котором n атомных слоёв $\{hkl\}$ построены из атомов А, а следующие m атомных слоёв $\{hkl\}$ – из атомов В, затем опять идут n атомных слоёв А и т.д. При $m=n=1$ сверхрешетка называется монослойной.

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 «Кристаллофизика 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