

**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**



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

**Рабочая программа дисциплины**

**КРИСТАЛЛОФИЗИКА 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
7	72	16			34	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 20 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. ....	3
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. ....	4
5. Перечень учебной литературы. ....	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	7

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

Основной целью курса является изучение физико-химических свойств, атомной и электронной структуры кристаллов в контексте наличия пространственной симметрии, знакомство с современными методами исследования структуры и электронных свойств твердых тел, выработка умений и навыков решения соответствующих задач

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-1</b> 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><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <p><b>ПК 1.3</b> Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p><b>Знать</b> основы зонной теории кристаллических твёрдых тел, принцип разделения твёрдых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики; рентгеновский и электронографический анализ, методы роста кристаллов.</p> <p><b>Уметь</b> объяснять сходство и различия электрофизических свойств, атомной и электронной структуры кристаллических полупроводников; решать задачи по дифракции электронов и электромагнитных волн в объеме и на поверхности кристаллов.</p> <p><b>Владеть</b> информацией об основных химических и физических свойствах важнейших полупроводников (кремний, германий, арсенид галлия, нитрид галлия); умением качественно объяснять физические характеристики твердых тел на основе их химического строения.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Учебный курс «Кристаллофизика полупроводников-2» реализуется в осеннем семестре 4-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению 03.03.02 Физика. Курс 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, 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.

**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
7	72	16			34	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 20 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, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, 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 – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 34 часа;
- промежуточная аттестация (подготовка к промежуточной аттестации, консультации, экзамен) – 22 часа.

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, консультации, экзамен) составляет 20 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 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	10
1.	Рост тонких слоев	1-4	12	4		8	
2.	Физико-химические основы атомных процессов на поверхности полупроводников	5-7	13	3		10	
3.	Кристаллофизика поверхности полупроводников	8-10	13	3		10	
4.	Структура электронных зон в алмазоподобных полупроводниках	11-16	12	6		6	
5.	Самостоятельная подготовка		18				18
6.	Консультации		2				2
7.	Экзамен		2				2
<b>Всего</b>			<b>72</b>	<b>16</b>		<b>34</b>	<b>22</b>

### Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. Рост тонких слоев (4 часа).
  - 1.1. Эпитаксия, основные понятия: гомо- и гетероэпитаксия, псевдоморфизм, дислокации несоответствия, изопериодные гетерокомпозиции..
  - 1.2. Общая характеристика методов эпитаксии: газофазная, жидкофазная и твердофазная эпитаксия, эпитаксия из молекулярных пучков. Жидкофазная эпитаксия. Фазовые равновесия и кинетика роста. Точечные дефекты, дислокации и примеси в ЖФЭ.
  - 1.3. Газофазная эпитаксия. Фазовые равновесия и кинетика роста. Точечные дефекты, дислокации и примеси в ГФЭ.
  - 1.4. Эпитаксия из молекулярных пучков. Взаимодействие атомных и молекулярных пучков с поверхностью кристалла. Коэффициент прилипания. Фазовые равновесия в поверхностном слое. Кинетика роста. Точечные дефекты, дислокации и примеси в молекулярно-лучевой эпитаксии. Эпитаксия и квантово-размерная электроника.
2. Физико-химические основы атомных процессов на поверхности полупроводников (3 часа).
  - 2.1. Физико-химические основы атомных процессов на поверхности полупроводников: физическая адсорбция, химическая адсорбция поверхностная диффузия собственных и примесных атомов, поверхностная сегрегация, испарение моноатомных полупроводников и полупроводниковых соединений.
  - 2.2. Атомные процессы на поверхности полупроводников при молекулярно-лучевой эпитаксии: МЛЭ кремния и германия с использованием электронно-лучевых испарителей, и газовых источников.
  - 2.3. МЛЭ GaAs и AlGaAs. Активация процессов эпитаксии и легирования: электроны, ионы, фотоны. Напряженные гетероструктуры и сверхрешетки. Сурфактанты.
3. Кристаллофизика поверхности полупроводников (3 часа).

- 3.1. Идеальная и реальная структура сингулярных и вичинальных граней. Методы создания атомарно-чистых поверхностей.
- 3.2. Поверхностные сверхструктуры на гранях Si: (111), (100), GaAs: (110), (100), (111).
- 3.3. Методы изучения состава и структуры поверхности: дифракция быстрых и медленных электронов, эллипсометрия, сканирующая туннельная микроскопия, отражательная электронная микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, электронная оже-спектроскопия.
4. Структура электронных зон в алмазоподобных полупроводниках **(6 часов)**.
  - 4.1. Электронные состояния и химическая связь в алмазоподобных полупроводниках.
  - 4.2. Трансляционная симметрия зон Бриллюэна. Молекулярные орбитали и параметры перекрытия.
  - 4.3. Зонная структура элементов группы IV по методу сильной связи.
  - 4.4. Параметры перекрытия и расстояния между ближайшими соседями. Полуэмпирические методы решения задачи об энергетическом спектре электронов.
  - 4.5. Изменение структуры энергетических зон при переходе от одноатомных кристаллов к двойным и тройным соединениям.
  - 4.6. Энергетические зоны почти свободных электронов в кристаллах алмаза.

#### **Самостоятельная работа студентов (52 часа)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к задачам для самостоятельного решения	18
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	34

#### **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, проверки решения задач из задания, а также, доклада - в течение семестра каждый студент готовит презентацию на тему «мой любимый полупроводник», в которой раскрывает основные свойства выбранного полупроводника и его практическое использование.

### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка 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 кристаллофизики полупроводников и в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит экзамене. Он проводится в конце семестра в зачетную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### **Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

**Таблица 10.1**

<b>Индикатор</b>	<b>Результат обучения по дисциплине</b>	<b>Оценочные средства</b>
<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	<b>Знать</b> основы зонной теории кристаллических твёрдых тел, принцип разделения твёрдых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики; рентгеновский и электронографический анализ, методы роста кристаллов.	Решение задач, экзамен.
<b>ПК 1.2</b> Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	<b>Уметь</b> объяснять сходство и различия электрофизических свойств, атомной и электронной структуры кристаллических полупроводников; решать задачи по дифракции электронов и электромагнитных волн в объеме и на поверхности кристаллов.	Решение задач, экзамен.
<b>ПК 1.3</b> Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	<b>Владеть</b> информацией об основных химических и физических свойствах важнейших полупроводников (кремний, германий, арсенид галлия, нитрид галлия); умением качественно объяснять физические характеристики твердых тел на основе их химического строения.	Решение задач, экзамен.

### **10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Кристаллофизика 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 задачи 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-2»

1. Провести индентификацию граней (определить индексы) гексагонального кристалла в системе координат:
  - а)- трёхосной,
  - б) - четырехосной
2. Осколок разбившейся пластины GaAs имеет форму равностороннего треугольника. Какова ориентация пластины?
3. 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.

## Примерные вопросы на экзамен

1. Общая характеристика элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений. Кремний, германий, арсенид галлия, теллурид кадмия, теллурид ртути. Влияние ионной составляющей на ширину запрещенной зоны в изоэлектронных рядах полупроводниковых соединений.
2. Фазовые равновесия в полупроводниковых системах. Элементы теории образования фаз. Диаграммы фазового равновесия. Гомогенные и гетерогенные термодинамические системы. Компонент системы. Гетерогенное зарождение новой фазы.
3. На поверхности InAs(001) наблюдается As- стабилизированная структура (2x4)/c(2x8), содержащая в элементарной ячейке (2x4) два димера мышьяка в верхнем слое и два димера индия во втором слое. Проверить устойчивость данной реконструкции в «модели подсчета электронов».
4. Плотность GaAs  $5.32 \text{ g cm}^{-3}$ . Рассчитать параметр решетки,  $a$ , число атомов и число оборванных связей на  $1 \text{ cm}^2$  плоскости (001) и (110), а также межплоскостное расстояние между плоскостями (111). Изобразить дифракционные картины медленных электронов структур (1x1).
5. Нарисовать структуры  $p(2 \times 2)$ ,  $c(2 \times 2)$  и  $c(4 \times 2)$  на поверхности (001) кубического кристалла и соответствующие им картины дифракции медленных электронов, а также структуру и ДМЭ картину (1x1)- (110).

## Пример билета на экзамен

1. Типы химических связей: характеристика и энергии связи; зонная структура; структурные свойства; тепловые свойства; электрические свойства; оптические свойства. Ковалентная связь. Свойства ковалентной связи. Образование молекулярных  $\sigma$ - и  $\pi$ - орбиталей. Ионная связь. Металлическая связь. Сравнительная характеристика физических свойств твердых тел по типу химической связи.
2. Плотность InAs  $5.68 \text{ g cm}^{-3}$ . Рассчитать параметр решетки,  $a$ , число атомов и число оборванных связей на  $1 \text{ cm}^2$  плоскости (001) и (110), а также межплоскостное расстояние между плоскостями (111).

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 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