

**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
ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ**

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика. 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 ра- бота, не включая пе- риод сессии	Самостоятельная подготовка к проме- жуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2026

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.	6
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.	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.	8

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

Цель учебного курса «Гетероэпитаксия» – дать магистрантам базовые знания по некоторым разделам физики кристаллизации, физики твердого тела и физики полупроводников для понимания структурных процессов, протекающих на поверхности кристалла при сублимации, эпитаксиальном росте, термическом отжиге и фазовых переходах, необходимые для осуществления фундаментальных и прикладных исследований в области физики конденсированных сред и физического материаловедения, физики и технологии твердотельных низкоразмерных систем, физических основ полупроводниковых нанотехнологий.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач исследования в области элементарных (атомных) процессов на поверхности кристалла при формировании низкоразмерных структур; основы физики поверхности, в том числе атомные механизмы формирования поверхности кристаллических тел, механизмы роста низкоразмерных структур, многослойных гетероструктурах, базовые определения физики твердого тела и кристаллофизики. Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области синтеза низкоразмерных эпитаксиальных гетероструктур с использованием современной аппаратуры; описывать атомные механизмы роста низкоразмерных структур, фазовых переходов на поверхности, определять параметры формирования кристаллических пленок; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать конкретные задачи по физике кристаллизации. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области синтеза низкоразмерных эпитаксиальных гетероструктур с использованием современной аппаратуры и новейшего российского и зарубежного опыта;

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		описанием механизмов зарождения островков роста, структуры и преобразования дефектов атомной структуры в полупроводниковых кристаллах.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

В результате изучения курса студенты физического факультета НГУ должны усвоить основы физики конденсированных сред и физического материаловедения, физики и технологии твердотельных низкоразмерных систем, технологий получения и обработки кристаллических материалов и подготовку кадров высшей научной квалификации. Кроме того, у студентов должно сформироваться умение применять знания по основам гетероэпитаксиального роста для решения физических задач; умение использовать в познавательной и профессиональной деятельности базовые знания в области физики кристаллизации; умение приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.

Для успешного освоения курса «Гетероэпитаксия» студенты должны обладать предварительными знаниями основ теории твердого тела, кристаллофизики полупроводников. В свою очередь, учебный курс «Гетероэпитаксия» предоставляет студентам теоретические знания и практические навыки, необходимые для изучения курсов «Физика полупроводниковых тонких слоев и низкоразмерных систем», «Радиационная физика», «Физические основы нанотехнологии», «Квантовый транспорт в низкоразмерных структурах».

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.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 2 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			2
1		Лекции, ч	16
2		Практические занятия, ч	16
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	36
5		аудиторных занятий, ч	32
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	36

10	Всего, ч	72
----	----------	----

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.

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

Раздел 1. Термодинамика поверхности (4 часа)

Однокомпонентные и многокомпонентные системы. Энергия связи. Симметрия кристалла. Термодинамическое равновесие. Адсорбционный слой. Движение атомов. Поверхностная динамика атомной решетки. Атомная структура поверхности. Визцинальные и сингулярные грани. Атомные ступени. Морфология поверхности кристалла-подложки. Дефекты поверхности.

Раздел 2. Равновесная форма кристалла (3 часа)

Равновесная форма кристалла. Теорема Вульфа. Поверхностное натяжение. Равновесная структура поверхности. Форма двумерных кристаллов. Фасетирование. Фазовый переход порядок-беспорядок. Шероховатость ступеней и поверхности. Адсорбированные атомы. Структура ступеней и изломов. Среднее расстояние между изломами. Адсорбция примеси. Дефекты в кристаллах.

Раздел 3. Поверхностная диффузия (2 часа)

Поверхностная диффузия адатомов. Самодиффузия и гетеродиффузия. Подвижность адатомов. Диффузионная длина и длина миграции. Коэффициент диффузии. Энергия активации диффузии. Пересыщение. Химический потенциал. Коэффициент встраивания адатомов. Источники атомных ступеней. Особенности процесса сублимации.

Раздел 4. Механизмы роста кристаллов (4 часа)

Модель роста кристаллов по Косселю. Теория роста БКФ (Бартона, Кабреры и Франка). Кинетика при росте кристаллов. Движение одиночной ступени. Перемещение прямых параллельных ступеней. Движение круговой ступени. Винтовая дислокация и спираль роста. Энергия моноатомной ступени. Поверхностные вакансии. Термические флуктуации ступеней. Коэффициент линейного натяжения ступеней. Притяжение и расталкивание ступеней.

Раздел 5. Нестабильность поверхностной морфологии (3 часа)

Нестабильность поверхностной морфологии. Анизотропия поверхностной энергии. Термодинамические и кинетические аспекты. Эшелоны ступеней и макроступени. Центры торможения ступеней. Локальное деформационное поле. Взаимодействие ступеней с дефектами и дислокациями. Интерпретация взаимодействия в рамках механических подобий. Эффект Швебеля.

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Энергия связи. Симметрия кристалла. Термодинамическое равновесие, фазовые переходы, поверхностная энергия (решение задач). Адсорбционный слой. Движение атомов. Потоки атомов на поверхность из газовой среды и обратный поток атомов с поверхности в вакуум (решение задач). **(2 часа).**

Занятие 2. Атомная структура поверхности. Визцинальные и сингулярные грани. Атомные ступени. Морфология поверхности кристалла-подложки. Применение дифракционных методов

для исследования структуры вещества (решение задач). Фазовый переход порядок — беспорядок. Шероховатость ступеней и поверхности, причины появления трехмерных, двумерных и нульмерных дефектов поверхности (решение задач). **(2 часа).**

Занятие 3. Равновесная форма кристалла. Теорема Вульфа, уравнение Брэгга-Вульфа. Поверхностное натяжение. Равновесная структура поверхности. Форма двумерных кристаллов. Фасетирование. Обратная решетка, дифракция электронных лучей как отражение серией атомных плоскостей (решение задач). **(2 часа).**

Занятие 4. Фазовый переход порядок-беспорядок. Шероховатость ступеней и поверхности. Адсорбированные атомы. Структура ступеней и изломов. Среднее расстояние между изломами и концентрация адсорбированных атомов при эпитаксиальном росте и сублимации (решение задач). **(1 час).**

Занятие 5. Поверхностная диффузия адатомов. Самодиффузия и гетеродиффузия. Подвижность адатомов. Диффузионная длина и длина миграции. Коэффициент диффузии. Энергия активации диффузии. Пересыщение. Химический потенциал. Коэффициент встраивания адатомов. Законы Фика для описания диффузионных процессов на поверхности при эпитаксиальном росте (решение задач). **(2 часа).**

Занятие 6. Источники атомных ступеней. Особенности атомных процессов при сублимации и эпитаксиальном росте. Линейное натяжение атомных ступеней и механизмы зарождения ступеней, формирование микрорельефа поверхности полупроводников и металлов (решение задач) **(2 часа).**

Занятие 7. Модель роста кристаллов по Косселю. Теория роста БКФ (Бартона, Кабреры и Франка). Кинетика при росте кристаллов. Движение одиночной ступени. Перемещение прямых параллельных ступеней. Движение круговой ступени. Зарождение двумерных островков на террасе (решение задач). **(2 часа).**

Занятие 8. Нестабильность поверхностной морфологии: термодинамические и кинетические аспекты. Анизотропия поверхностной энергии и реконструкции поверхности (решение задач). **(2 часа).**

Занятие 9. Центры торможения ступеней. Локальное деформационное поле. Взаимодействие ступеней с дефектами и дислокациями (решение задач). **(1 час).**

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	12
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Латышев А.В. Атомные процессы на поверхности кристалла: учеб. пособие / А. В. Латышев; Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. Новосибирск: НГУ, 2006. 96 с., ISBN 5-94356-356-3 (9 экз.)
2. А.А.Чернов, Е.И.Гиваргизов, Х.С.Багдасаров, В.А.Кузнецов, Л.Н.Демьянец, А.Н.Лобачев Т.З. Образование кристаллов 1980. 407 с. М.: Наука, 1980. / (Т1-1 экз., Т2- 1 экз., Т3- 4 экз.)
3. Современная кристаллография: в 4 т. / редкол.: Б.К. Вайнштейн (гл. ред.) и др. ; [предисл. Б.К. Вайнштейна] ; АН СССР, Ин-т кристаллографии им. А.В. Шубникова. Москва:

Наука, 1979-1981. (Т1-1 экз., Т2-1 экз., Т3-4 экз., Т4-4 экз.)

4. Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (1964-2014), под редакцией А.В.Латышева, А.В.Двуреченского, А.Л.Асеева, Новосибирск, Параллель, 2014., ISBN 978-5-98901-144-5 (2 экз.)
5. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / [Л. Эсаки, Б.А. Джойс, Р. Хекинг-боттом и др.] ; под ред. Л. Ченга, К Плога ; пер. с англ. под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. Москва : Мир, 1989. 582 с., ISBN 5-03-000737-7 (2 экз.)

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

6. Латышев А.В. Атомные процессы на поверхности кристалла: учеб. пособие / А. В. Латышев; Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. Новосибирск: НГУ, 2006. 96 с.

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.

Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль успеваемости

Текущий контроль успеваемости осуществляется на практических занятиях преподавателем при решении студентом задач, рекомендованных для практических занятий и домашних заданий, обсуждаются идеи и способы решения. Одновременно с этим проводятся индивидуальные консультации обучающихся.

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 физики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Он проводится 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. Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

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 решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать методы и способы постановки и решения задач исследования в области элементарных (атомных) процессов на поверхности кристалла при формировании низкоразмерных структур; основы физики поверхности, в том числе атомные механизмы формирования поверхности кристаллических тел, механизмы роста низкоразмерных структур, многослойных гетероструктурах, базовые определения физики твердого тела и кристаллофизики.	Опрос в начале каждой лекции, экзамен.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области синтеза низкоразмерных эпитаксиальных гетероструктур с использованием современной аппаратуры; описывать атомные механизмы роста низкоразмерных структур, фазовых переходов на поверхности, определять параметры формирования кристаллических пленок; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать конкретные задачи по физике кристаллизации. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области синтеза низкоразмерных эпитаксиальных гетероструктур с использованием современной аппаратуры и новейшего российского и зарубежного опыта; описанием механизмов зарождения островков роста, структуры и преобразования дефектов атомной структуры в полупроводниковых кристаллах.	Опрос в начале каждой лекции, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Гетероэпитаксия».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>

Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
Экзамен: – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>
Экзамен: – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>

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

Примеры задач для самостоятельного решения

1. Рассчитать нестабильность регулярного распределения атомных ступеней при сублимации и эпитаксии с учетом эффекта Швебеля.
2. Оценить среднее расстояние между изломами атомной ступени произвольной кристаллографической ориентации.
3. Вывести уравнение движения атомной ступени в пространственно-неоднородном химическом потенциале.
4. Время жизни атома в состоянии адсорбции известно при двух температурах. Найти энергию активации процесса десорбции.
5. Рассчитать релаксацию формы атомной ступени при отрыве из центра торможения ступени.
6. Рассчитать скорость движения ступеней в присутствии постоянно действующей силы, приложенной к адсорбированным атомам.

7. Оцените время образования одного монослоя в рамках кинетической теории газов и предложите методы формирования атомно-чистых поверхностей.
8. Определить скорость движения моноатомных ступеней на поверхности кремния (001) с чередующимися сверхструктурными террасами (1x2) и (2x1).
9. Определить скорость движения моноатомной ступени при экспозиции в кислородной атмосфере при известном давлении.
10. Определить амплитудный и частотный спектр флуктуаций моноатомных ступеней. Вычислить среднее расстояние между моноатомными ступенями с учетом диффузионного обмена и упругого расталкивания.

Вопросы, выносимые на экзамен

1. Однокомпонентные и многокомпонентные системы. Симметрия кристалла. Термодинамическое равновесие. Адсорбционный слой. Движение атомов. Поверхностная динамика атомной решетки. Разориентация поверхности.
2. Равновесная структура поверхности. Адсорбированные атомы на поверхности кристалла. Зарождение атомных ступеней на поверхности. Кинетическая нестабильность распределения атомных ступеней. Модели поверхностной реконструкции.
3. Атомная структура поверхности. Визцинальные и сингулярные грани. Двумерная кристаллография. Атомные ступени. Морфология поверхности кристалла-подложки. Атомный форм-фактор. Дефекты поверхности. Уравнение Гиббса-Томпсона.
4. Фазовые переходы порядок-порядок и порядок-беспорядок. Шероховатость ступеней и поверхности. Источники атомных ступеней. Особенности процесса сублимации. Десорбция. Твердофазная эпитаксия.
5. Равновесная форма кристалла. Теорема Вульфа. Поверхностное натяжение. Равновесная структура поверхности. Анизотропия свободной энергии. Форма двумерных кристаллов. Фасетирование. Несоответствие решеток.
6. Модель роста кристаллов по Косселю. Адсорбированные атомы. Структура ступеней и изломов. Среднее расстояние между изломами. Адсорбция примеси.
7. Поверхностная диффузия адатомов. Самодиффузия и гетеродиффузия. Подвижность адатомов. Диффузионная длина и длина миграции. Коэффициент диффузии. Энергия активации диффузии. Пересыщение по адатомам. Химический потенциал. Коэффициент встраивания адатомов.
8. Теория роста БКФ (Бартона, Кабреры и Франка). Гомоэпитаксиальный рост. Ступенчато-слоевой механизм роста. Двумерное и трехмерное зарождение. Кинетика при росте кристаллов. Движение одиночной ступени. Перемещение прямых параллельных ступеней.
9. Энергия моноатомной ступени. Анизотропия поверхностной энергии. Термические флуктуации ступеней. Коэффициент линейного натяжения ступеней. Притяжение и расталкивание ступеней. Доменная стенка и антифазная граница. Предложить экспериментальные методы измерения диффузионной длины адатома на поверхности кристалла.
10. Центры торможения ступеней. Декорирование ступеней примесью. Взаимодействие ступеней с дефектами и дислокациями. Интерпретация взаимодействия в рамках механиче-

ских подобий. Движение круговой ступени. Винтовая дислокация и спираль роста. Перечислить и указать количество дефектов в элементарных ячейках поверхностной реконструкции (7x7) и (11x11).

11. Нестабильность поверхностной морфологии. Термодинамические и кинетические аспекты. Эшелоны ступеней и макроступени. Эффект Швебеля.
12. Виды точечных дефектов. Поверхностные вакансии. Движение атомных ступеней с учетом поверхностных вакансий. Диффузионная длина вакансий. Рекомбинация вакансий с адсорбированными атомами. Нанокластеры.

Пример билета на экзамен

1. Равновесная структура поверхности. Адсорбированные атомы на поверхности кристалла. Зарождение атомных ступеней на поверхности. Кинетическая нестабильность распределения атомных ступеней. Модели поверхностной реконструкции.
2. Оценить среднее расстояние между изломами атомной ступени произвольной кристаллографической ориентации.

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.