

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

Теория роста кристаллов

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
Фундаментальная и прикладная физика

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования

ИПК 1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

2. Задачи освоения дисциплины

– Получить представления о связи формы кристалла с его кристаллической структурой, об элементарных процессах роста кристаллов, об источниках элементарных ступеней на поверхности кристалла, о роли анизотропии кристалла в кинетике роста кристаллов, о механизмах эпитаксии.

– Научиться применять понятийный и математический аппарат теории роста кристаллов для анализа влияния условий кристаллизации на морфологию поверхности и скорость роста кристаллов.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Седьмой семестр, устный экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: общая физика, математический анализ, кристаллография, кристаллохимия полупроводников, термодинамика материалов, кинетика фазовых переходов.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часа, из которых:

-лекции: 32 ч.

-практические занятия: 16 ч.

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Поверхностная энергия и равновесная форма кристалла.

Классификация поверхностей по Гартману (метод ПЦС). Анизотропия поверхностной энергии. Равновесие на искривленной границе анизотропной фазы. Уравнение Херринга. Равновесная форма кристалла. Правило Вульфа. Кинематические теории формы роста. Теоремы Франка.

Тема 2. Атомная структура поверхности в модели Косселя.

Поверхностные конфигурации и их энергии. Метод средних работ отрыва. Шероховатость ступени. Равновесная концентрация изломов. Шероховатость поверхности. Связь с задачей Изинга. Модель Джексона и модель Темкина. Современные модели перехода от гладкой грани к шероховатой грани.

Тема 3. Кинетика роста на вицинальной поверхности.

Элементарные поверхностные процессы роста: адсорбция, десорбция, поверхностная диффузия, встраивание в ступень. Общая формулировка краевой задачи поверхностной диффузии. Краевая задача поверхностной диффузии для системы вицинальных ступеней. Режимы перемещения ступеней при росте из пара и из молекулярного пучка. Роль барьера Эрлиха-Швебеля в устойчивости системы прямолинейных ступеней.

Тема 4. Источники ступеней на сингулярной грани.

Рост за счет винтовых дислокаций. Нелинейная зависимость скорости роста грани от пересыщения. Образование зародышей на поверхности кристалла. Термодинамическое описание. Атомистическая картина зарождения. Рост по механизму образования и разрастания двумерных островков.

Тема 5. Механизмы эпитаксии.

Образование зародыша на инородной поверхности. Энергия адгезии. Соотношение Дюпре. Механизмы эпитаксии Франка – ван-дер Мерве, Фольмера – Вебера и Странского – Крастанова. Релаксация упругих напряжений. Дислокации несоответствия и когерентные трехмерные островки.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Устный экзамен в седьмом семестре проводится в устной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса и задачу. Продолжительность экзамена 1.5 часа.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - [Курс: Теория роста кристаллов 4 курс \(ФФ.Б.1 сем.\) \(tsu.ru\)](https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/)

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

- Современная кристаллография. Т.3. Образование кристаллов. Под ред. Б.К.Вайнштейна. М.: Наука, 1980. – 407 с.
- Введение в физику поверхности / К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин [и др.] - М: Наука, 2006. – 490 с.
- Филимонов С.Н. Динамика ступеней при росте кристалла из газовой фазы и молекулярного пучка. Учебно-методическое пособие / Филимонов С.Н., Эрвье Ю.Ю. Издательство Томского госуниверситета, 2019. – 54 с.
- Рашкович Л.Н. Физика кристаллизации. М.: Научный мир, 2015. -101 с.

б) дополнительная литература:

- Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М: БИНОМ. Лаб. знаний, 2009. - 400 с.
- Гармашов С. И. Методы исследования процессов кристаллизации: учебное пособие. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2019. — 84 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/170341>
- Чернов А.А. Слоисто-спиральный рост кристаллов // Успехи физических наук. - 1961. - Т.73, N2. - С.277–331.

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юпайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

15. Информация о разработчиках

Эрвье Юрий Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, ТГУ, кафедра физики полупроводников, профессор