

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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

**Теория роста кристалла**

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. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами**

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. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания**

Элементы текущего контроля:

- опросы по лекционному материалу;
- домашние задания (в виде практических задач).

Примеры контрольных вопросов: (ПК-1):

1. Классификация граней кристалла по Гартману.
2. Что такое сингулярные и вицинальные поверхности?
3. Назовите основные элементарные поверхностные процессы роста кристалла.
4. В связи с чем полагают, что встраивание атомов в кристалл происходит, в основном, в изломах на ступенях?
5. Какой вид имеет зависимость шероховатости ступени от температуры?
6. Как зависит скорость отдельной вицинальной ступени от расстояния между ступенями?
7. Как барьер Эрлиха-Швёбеля влияет на устойчивость системы вицинальных ступеней относительно образования ступков (эшелонов)?
8. Какие существуют источники элементарных ступеней на сингулярной поверхности?
9. Как барьер Эрлиха-Швёбеля влияет на переход от послыонного (одноуровневого) роста к многоуровневому росту.
10. Перечислите основные механизмы эпитаксии.

Примеры практических задач (ПК-1, ИОПК 2.2):

1. Показать, что отношение констант присоединения адатомов к ступени с верхней и нижней террас равно отношению констант отрыва атомов на верхнюю и нижнюю террасу:  $k_u^+ / k_l^+ = k_u^- / k_l^-$ .
2. Используя квазистационарное приближение, решить краевую задачу поверхностной диффузии адатомов для системы эквидистантных прямолинейных вицинальных ступеней в случае одинаковых барьеров для присоединения адатомов к краю ступени с верхней и нижней террас. Получить выражение для скорости перемещения ступеней.
3. Оценить величину дополнительного (к диффузионному) барьера для присоединения адатома к ступени, при которой движение ступени может происходить в кинетическом режиме. Принять для энергий активации поверхностной диффузии и десорбции значения 0.7 эВ и 3.0 эВ, соответственно.

4. Используя приведенное в лекции выражение для распределения адатомов по террасам при наличии барьера Эрлиха-Швёбеля, показать, что наличие данного барьера приводит к смещению максимума концентрации адатомов на террасе в сторону нижней ступени.

Критерии оценивания:

Положительный результат текущего контроля по дисциплине (контрольная точка) предполагает посещаемость более половины лекций, правильные ответы на контрольные вопросы и выполнение не менее половины домашних заданий.

### **3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания**

Экзаменационный билет состоит из двух частей.

Первая часть содержит два теоретических вопроса, проверяющих ПК-1, ИПК 1.1. Ответ на вопросы первой части дается в развернутой форме.

Вторая часть содержит 2 контрольных вопроса, проверяющих ИОПК 2.2. Ответы на вопросы второй части даются в краткой форме.

Примеры теоретических вопросов:

1. Винтовые дислокации как источник ступеней на сингулярной грани. Скорость роста грани за счет перемещения спиральной ступени.
2. Релаксация упругих напряжений при эпитаксии по механизму Странского-Крастанова. Дислокации несоответствия. Упруго-напряженные 3D-островки.
3. Атомная структура поверхности в модели Косселя. Поверхностные конфигурации и их энергии.
4. Кинетика перехода к многоуровневому росту. Модель среднего поля.
5. Кинематические теории роста. Теоремы Франка. Форма кристалла, растущего в стационарном режиме.
6. Рост по механизму образования двумерных островков. Макроскопическая (феноменологическая) модель.

Примеры контрольных вопросов:

1. Сформулируйте правило Кюри-Вульфа для равновесной формы кристалла.
2. Перечислите основные положения (позиции) атома на поверхности кристалла Косселя.
3. Запишите выражение для концентрации изломов единичной глубины на крае элементарной ступени.
4. Какие элементарные поверхностные процессы роста учитываются в моделях послыного роста кристалла?
5. В чем заключается квазистационарное приближение при описании динамики ступеней?
6. Как барьер Эрлиха-Швёбеля влияет на устойчивость прямолинейной формы вицинальных ступеней?
7. Какой характерный вид имеет зависимость скорости перемещения спиральной ступени от пересыщения?
8. Как температура подложки и величина потока адсорбирующихся атомов влияют на плотность двумерных островков, образующихся на начальной (субмонослойной) стадии кристаллизации из молекулярного пучка?
9. Что такое энергия адгезии кристалла на инородной подложке?

10. Каким образом может происходить релаксация упругих напряжений в случае эпитахии по механизму Странского-Крастанова?

Критерии оценивания:

Результаты экзамена с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» ставится, если студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность. Оценка «хорошо» ставится, если студент твердо знает материал, грамотно излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе. Оценка «удовлетворительно» ставится, если студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия. Оценка «неудовлетворительно» ставится, если студент не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.

#### **4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)**

Примеры контрольных вопросов

Вопрос 1 (ИОПК 2.2)

Корректно ли использование закона действующих масс по отношению к элементарным химическим реакциям?

Ответ. Нет, поскольку закон действующих масс предполагает отсутствие корреляций между протеканием отдельных актов реакции.

Вопрос 2 (ИОПК 2.2)

Может ли диффузия атомов в бинарном растворе протекать в направлении градиента их концентрации?

Ответ. Да, при положительной парциальной парной энергии смешения, когда образование связей между одноименными атомами выгоднее, чем между разноименными.

Вопрос 3 (ИОПК 2.2)

Может ли размер критического зародыша быть равным одному атому (одной частице)?

Ответ. Да может, при большом пересыщении в маточной среде, например, размер критического зародыша двумерного островка на поверхности кристалла при низкотемпературной кристаллизации из молекулярного пучка.

Вопрос 4 (ИОПК 2.2)

Какие грани - быстро или медленно растущие - присутствуют в огранке кристалла, растущего в стационарном режиме?

Ответ. Кристалл ограняется медленно растущими гранями, быстро растущие грани «выклиниваются».

Примеры теоретических вопросов (ПК-1, ИОПК 2.2):

1. При каких условиях рост вицинальной грани происходит в квазиравновесном режиме?

Ответ должен содержать представления о элементарных процессах роста и о диффузионном взаимодействии ступеней.

2. Кинетика образования зародышей в модели Беккера-Дёринга.

Ответ должен содержать описание роста зародыша как результат протекания обратимых бимолекулярных реакций и представление о стационарной скорости образования зародышей.

3. Почему при понижении температуры подложки происходит переход от ступенчато-слоевого роста к островковому росту?

Ответ должен быть основан на представлении о роли поверхностной диффузии адатомов в доставке кристаллизующегося вещества к ступеням на поверхности кристалла и о влиянии температуры на образование двумерных островков на террасах.

### **Информация о разработчиках**

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