

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им.
Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО

Решением ученого совета ННГУ

протокол от

«53»

2025 г. №8

Рабочая программа дисциплины

Образование кристаллов

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы

"

"

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород – 2023

1. Место дисциплины «Образование кристаллов» в структуре ООП

Дисциплина «Образование кристаллов» относится к дисциплинам по выбору вариативной части профессионального цикла основной образовательной программы по направлению 03.03.02 «Физика», профиль подготовки «Кристаллофизика», изучается на 4 году обучения в 7,8 семестрах.

Программа «Образование кристаллов» органически входит в образовательную программу по кристаллографии имеет тесную связь с геометрической кристаллографией. В курсе «Образование кристаллов» изучаются физические процессы, прежде всего явления массо- и теплопереноса, взаимодействия атомов, молекул и ионов на поверхности кристаллов, адсорбция примесей и т.д. Для усвоения данного курса необходимо изучить дисциплину «Методы математической физики».

Цели освоения дисциплины «Образование кристаллов»

Целями освоения дисциплины «Образование кристаллов» являются знакомство с теорией зарождения и роста кристаллов, изучение технологии выращивания монокристаллов из пара, раствора и расплава и связи ростовых дефектов с условиями роста кристаллов.

1. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3. Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта	ПК-1. Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта ОПК 1.2 Умеет проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта ОПК 1.3 Иметь навыки проводить научные исследования с помощью	Знать: основные понятия термодинамики, механизмы роста кристаллов, кинетику кристаллизации, особенности влияния примесей на процессы кристаллизации, особенности кристаллизации из пара, раствора и расплава. Уметь: объяснить влияние состава и свойств кристаллообразующей среды на процессы роста кристаллов, самостоятельно изучать особенности кристаллизации разных веществ. Владеть: навыками экспериментального исследования процессов роста кристаллов, навыками выращивания кристаллов из	Контрольная работа	Экзамен: Контрольные вопросы Задания

	<i>современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</i>	<i>растворов, основными приемами подготовки растворов и кристаллизационной аппаратуры к выращиванию водорастворимых кристаллов</i>		
--	--	--	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	9
Часов по учебному плану	324
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	42
-лабораторные работы	116
- КСР	36
самостоятельная работа	111
Промежуточная аттестация	Зачет, экзамен

Содержание дисциплины «Образование кристаллов»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
		7 семестр очное				
Равновесие и фазовые превращение	20	4	4	12	20	
Возникновение новой фазы	20	4	4	14	7	13
Рост и равновесная форма	22	3	3	14	12	10
Рост из пара	21	3	3	14	11	10
Рост из расплава	21	2	2	10	7	14
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация – зачет						
	8 семестр очное					
Рост из раствора	8		4	4	8	
Рост в присутствии примеси	26		4	4	6	20
Качество и условия выращивания кристаллов	34		4	4	12	22
Массовая кристаллизация	21		2	2	10	21
Выращивание из расплава	8		4	4	8	
Выращивание из раствора	31		4	4	10	21
Выращивание из газовой фазы	28		2	2	7	21
Твердофазное превращение	30		2	2	9	21
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация – экзамен						

Содержание разделов дисциплины.

I. Теория зарождения и роста кристаллов

1.Равновесие и превращение фаз

1.1 Фазы и компоненты. Условия протекания кристаллизации.

- 2.1 Равновесие и превращение фаз. Кристаллизация в однокомпонентной системе.
- 3.1 Кристаллизация в двухкомпонентной системе.
Двойные диаграммы. Усложненные диаграммы состояния. Правило отрезков.
- 4.1 Изображение диаграмм трехкомпонентных систем.
- 5.1 Поверхностное натяжение. Формула Лапласа. Уравнение Гиббса-Томсона.

2. Возникновение новой фазы

- 2.1. Теория гомогенного зарождения. Уравнение Гиббса-Томсона. Работа образования зародыша. Экспериментальные критерии гомогенного зарождения кристаллов.
- 2.2 Гетерогенное зарождение кристаллов. Скорость роста граней и форма кристаллов. Дезактивация и активирование механических примесей.
- 2.3 Роль очистки исходной фазы. Образование кристаллов на изоморфных и эпитаксиальных подложках и примесях.

3. Рост и равновесная форма кристаллов

- 3.1 Теория Косселя-Странского. Модели роста гомеополярного и ионного кристаллов.
- 3.2 Механизм роста идеального кристалла. Двумерное зародышеобразование.
- 3.3 Равновесная форма кристаллов. Принцип Гиббса-Кюри.
- 3.4 Влияние температуры на равновесную структуру граней.

4. Рост кристаллов из пара

- 4.1 Адсорбционный слой и поверхностная диффузия.
Скорость продвижения ступеней.
- 4.2 Нормальная скорость роста грани.
Законы роста (нормальный, экспоненциальный, параболический).
- 4.3 Дислокационный рост граней кристаллов. Скорость спирального роста грани.
- 4.4 Рельеф поверхности в случае роста на дислокациях.
- 4.5 Эпитаксия. Квантово-размерные структуры.

5. Рост из расплава

- 5.1 Затвердевание чистого расплава. Кинетический коэффициент.
- 5.2 Зонная плавка (теория).
- 5.3 Концентрационное переохлаждение расплава.

6. Рост из раствора (теория).

- 6.1 Тепло- и массоперенос при росте кристаллов из раствора. Рост шероховатой грани.
- 6.2 Послойный рост.
- 6.3 ПД и ПВ модели роста из раствора.

7. Скорость роста и форма кристаллов в присутствии примесей.

- 7.1 Влияние примеси на свойства кристаллообразующей среды.
- 7.2 Адсорбционное влияние примесей.
- 7.2 Влияние растворителя на форму и качество кристаллов.

8. Зависимость качества кристаллов от условий роста.

8.1 Включение примесей в кристалл.

8.2 Секториальное строение кристаллов.

8.3 Аномальная оптическая двуосность.

9. Массовая кристаллизация

9.1 Особенности массовой кристаллизации.

9.2 Массовая кристаллизация из раствора и в твердом теле.

II. Методы выращивания кристаллов

1. Методы выращивания кристаллов из расплава. Классификация методов. Кристаллизация в замкнутых, полукоткрытых формах и без участия ограничивающих кристалл стенок. Требования к оборудованию для выращивания кристаллов. Метод Бриджмена-Стокбаргера, его особенности. Методы Киропулоса и Чохральского. Аппаратура для выращивания. Общая характеристика выращивания при вытягивании из расплава. Описание теплового поля при выращивании кристаллов методом Чохральского. Выращивание кристаллов металлов и полупроводников. Разновидности метода Чохральского. Зонная плавка. Использование ее для очистки вещества. Направленная кристаллизация. Газопламенный метод (метод Вернейля).
2. Выращивание кристаллов из растворов. Классификация методов. Выращивание из низкотемпературных растворов. Метод испарения, метод охлаждения, метод температурного перепада. Скоростные методы выращивания кристаллов из водных растворов. Выращивание кристаллов KDP и ADP. Выращивание кристаллов в гидротермальных условиях. Особенности метода и аппаратуры. Выращивание кристаллов кварца. Применение химических реакций для выращивания кристаллов. Кристаллизация в геле. Электрохимические реакции. Выращивание кристаллов из растворов в расплавах солей. Требования к растворителям и материалам аппаратуры. Жидкостная эпитаксия. Выращивание кристаллов алмаза.
3. Выращивание из газовой фазы. Классификация методов. Эпитаксия. Методы физической конденсации. Метод катодного распыления, разновидности метода. Методы химического транспорта. Кристаллизация в замкнутой и проточной системах. Выращивание гетероэпитаксиальных структур. Комбинированный метод выращивания кристаллов (ПЖК-механизм). Твердофазные превращения. Деформационный отжиг. Рекристаллизация при спекании. Рекристаллизация при полиморфных превращениях. Расстекловывание.

Список лабораторных работ.

1. Реальная форма кристаллов и построение идеальной формы
2. Возникновение и рост кристаллов в капле раствора и расплава
3. Ориентированная кристаллизация из растворов
4. Выращивание кристаллов из раствора
5. Определение температуры насыщения раствора по концентрационным потокам
6. Выращивание кристаллов из гелей
7. Зонарное и секториальное строение кристаллов
8. Выявление ростовых дефектов в кристаллах методом избирательного травления
9. Рост нитевидных кристаллов KDP при наличии примеси $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме, в форме семинаров и лабораторных занятий, на которых проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студентов предусматривает теоретическую подготовку к семинарам, выполнению лабораторных работ, изучение рекомендованной литературы и подготовку к зачету и экзамену.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на лабораторных занятиях, активность в обсуждении качественных вопросов.

Вопросы к экзамену.

1. Термодинамическое описание фазового перехода первого рода. Потенциал Гиббса, химический потенциал.
2. Рост кристаллов из пара.
3. Выращивание из газовой фазы. Классификация методов. Эпитаксия. Выращивание гетероэпитаксиальных структур.
4. Фазовые диаграммы однокомпонентной системы. Правило отрезков.
5. Рост кристаллов из раствора. Рост шероховатой грани.
6. Выращивание кристаллов из растворов. Классификация методов. Выращивание из низкотемпературных растворов. Метод испарения, метод охлаждения, метод температурного перепада.
7. Фазовые диаграммы для двухкомпонентной системы первого, второго и третьего типов.
8. Рост кристаллов из раствора. Послойный рост.
9. Скоростные методы выращивания кристаллов из водных растворов. Выращивание кристаллов KDP и ADP.
10. Теория гомогенного зарождения. Уравнение Гиббса-Томсона. Гомогенное зарождение капель жидкости из пара.
11. Энергетическое воздействие примеси на рост кристалла (уравнение Шишковского).
12. Выращивание кристаллов из растворов в расплавах солей. Требования к растворителям и материалам аппаратуры. Выращивание кристаллов алмаза.
13. Теория гомогенного зарождения. Уравнение Гиббса-Томсона. Гомогенное зарождение кристаллов из жидкости.

14. Модель роста кристаллов Косселя-Странского.
15. Газопламенный метод (метод Вернейля).
16. Гетерогенное зарождение кристаллов.
17. Классификация граней. Влияние температуры на структуру кристаллической поверхности.
18. Методы Киропулоса и Чохральского.
19. Равновесная форма кристаллов. Теорема Вульфа.
20. Кристаллизационное давление.
21. Выращивание углеродных нанотрубок.
22. Механизмы роста кристаллов. Двумерное зародышеобразование.
23. Рост кристаллов из расплава.
24. Методы выращивания кристаллов из расплава. Классификация методов. Метод Бриджмена-Стокбаргера, его особенности.
25. Влияние примеси на рост кристаллов, модели Близнакова и Кабреры-Вермили.
26. Дефекты, характерные для кристаллов, выращенных из растворов.
27. Применение химических реакций для выращивания кристаллов. Кристаллизация в геле. Электрохимические реакции (электролиз).
28. Правило фаз Гиббса
29. Рост кристаллов в присутствии примесей. Адсорбция примеси. Изотерма адсорбции Ленгмюра. Равновесная и неравновесная адсорбция.
30. Зонная плавка. Использование ее для очистки вещества. Направленная кристаллизация. Выращивание кристаллов в гидротермальных условиях. Особенности метода и аппаратуры. Выращивание кристаллов кварца.

**6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине
«Образование кристаллов» - в приложении**

- 6.1** Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

(ПК-3)

Индикаторы компетенции	ОЦЕНКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем

	обучающег ося от ответа						програ мму подгот овки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимал ных умений . Невозмож ность оценить наличие умений вследствие отказа обучающег ося от ответа	При решении стандартны х задач не продемонст рированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продемонстр ированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продемонстр ированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстр ированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстр ированы все основные умения, реше ны все основные задачи с отдельными несущественн ым недочетам и, выполнены все задания в полном объеме.	Проде монстр ирован ы все основн ые умения „ Решен ы все основн ые задачи. Выпол нены все задани я, в полно м Объем е без недоче тов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом . Невозмож ность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающег ося от ответа	При решении стандартны х задач не продемонст рированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимал ный набор навыков для решения стандартны х задач с некоторыми недочетами	Продемонстр ированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстр ированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстр ированы навыки при решении нестандартны х задач без ошибок и недочетов.	Проде монстр ирован творче ский подход к решен ию нестан дартны х задач
Шкала оценок по проценту правильн о выполнен ных	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

контроль ных заданий							
----------------------------	--	--	--	--	--	--	--

6.2 Описание шкал оценивания

Критерии оценок экзамена:

Оценка *отлично* – исчерпывающее владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, твёрдое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, свободное владение источниками. Практическая часть курса успешно выполнена.

Оценка *хорошо* – достаточно полные знания программного материала, правильное понимание сути вопросов, знание определений, умение формулировать тезисы и аргументы. Ответы последовательные и в целом правильные, хотя допускаются неточности, поверхностное знакомство с отдельными теориями и фактами, достаточно формальное отношение к рекомендованным для подготовки материалам. Практическая часть курса успешно выполнена.

Оценка *удовлетворительно* – фрагментарные знания, расплывчатые представления о предмете. Ответ содержит как правильные утверждения, так и ошибки, возможно, грубые. Испытуемый плохо ориентируется в учебном материале, не может устранить неточности в своем ответе даже после наводящих вопросов. Практическая часть курса успешно выполнена.

Оценка *неудовлетворительно* – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией. Практическая часть курса не выполнена или выполнена не в полном объеме.

Критерии оценок зачета:

зачтено – успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания.

незачтено – невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации.

6.3 Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по модулю, характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

- установление последовательности (описать алгоритм выполнения действия),
- указать возможное влияние факторов на последствия реализации умения и т.д.
- отчет

6.4 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции. (В приложении)

6.5 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания. (В приложении)

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Образование кристаллов»

а) Основная литература:

1)) Портнов В.Н., Чупрунов Е.В. Возникновение и рост кристаллов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во Физматлит, 2006, 328 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=227563&DB=1> (47 экз)

2) Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. Изд-во «Мир», 1974

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=98091> (2 экз)

3) Кристаллография. Лабораторный практикум. / Под ред. проф. Чупрунова Е.В.: Учеб. пособие для вузов. – М.: Физматлит, 2005, 412 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=46674&DB=1> (30 экз)

б) Дополнительная литература:

1) Портнов В.Н., Чупрунов Е.В. Кинетика и морфология дислокационного роста граней кристаллов из раствора: Учеб. пособие – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2010, 131 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=398170> (28 экз)

Портнов В.Н., Чупрунов Е.В. Возникновение и рост кристаллов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во Физматлит, 2006, 328 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=227563&DB=1>

2) Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. Изд-во «Мир», 1974

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=98091>

3) Кристаллография. Лабораторный практикум. / Под ред. проф. Чупрунова Е.В.: Учеб. пособие для вузов. – М.: Физматлит, 2005, 412 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=46674&DB=1>

б) Дополнительная литература:

1) Портнов В.Н., Чупрунов Е.В. Кинетика и морфология дислокационного роста граней кристаллов из раствора: Учеб. пособие – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2010, 131 с.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=398170>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Образование кристаллов» кристаллов»

помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Автор(ы): к.ф.-м.н. Воронцов Д.А.

Рецензент (ы) _____

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., профессор Чупрунов Е.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от 20 мая 2023 года, протокол № б/н.