

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

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 10 от 02.12.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Образование кристаллов

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Физика конденсированного состояния

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.ДВ.02.02.03 Образование кристаллов относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

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
<i>ПК-3: Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</i>	<i>ИД ПК-3: Демонстрация способности проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</i>	<i>ИД ПК-3: Знание теоретических моделей роста кристаллов, основных методов выращивания кристаллов наблюдения процессов кристаллизации. Умение получать экспериментальные данные о кинетике роста кристаллов, проводить описание форм роста кристаллов, выращивать кристаллы из растворов. Владение терминологией, применяемой при изучении роста кристаллов, навыками выращивания кристаллов из растворов, основными приемами подготовки растворов и кристаллизационной аппаратуры к выращиванию водорастворимых кристаллов.</i>	<i>Доклад-презентация</i>	<i>Экзамен: Контрольные вопросы Зачёт: Отчет по лабораторным работам</i>

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	8
Часов по учебному плану	288
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	

- занятия лекционного типа	42
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	132
- КСР	3
самостоятельная работа	75
Промежуточная аттестация	36 Экзамен, Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	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 (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	Ф Ф Ф	
Вводная лекция	2	2		2	
Равновесие и фазовые превращения	20	8	8	16	4
Зарождение кристаллов	16	6	4	10	6
Равновесная форма кристаллов	26	4	14	18	8
Рост из пара	16	4	8	12	4
Рост из расплава	22	6	8	14	8
Рост из раствора	32	8	16	24	8
Рост кристаллов в присутствии примеси	26	4	16	20	6
Качество и условия выращивания кристаллов	8		4	4	4
Массовая кристаллизация	8		4	4	4
Выращивание кристаллов из расплава	16		12	12	4
Выращивание кристаллов из раствора	28		24	24	4
Выращивание кристаллов из газовой фазы	8		4	4	4
Твердофазные превращения	6		2	2	4
Образование жидких кристаллов	7		4	4	3
Биокристаллизация	8		4	4	4
Аттестация	36				
КСР	3			3	
Итого	288	42	132	177	75

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение.

Какие кристаллы, в основном, выращивают в промышленности, для каких целей и где. Основные термины. Основные тематические конференции и публикации.

2. Равновесие и фазовые превращения.

Фазы и компоненты. Условия протекания кристаллизации. Кристаллизация в однокомпонентной системе. Кристаллизация в двухкомпонентной системе. Двойные диаграммы. Усложненные диаграммы состояния. Правило отрезков. Изображение диаграмм трехкомпонентных систем. Возникновение новой фазы. Теория гомогенного зарождения. Уравнение Гиббса-Томсона. Работа образования зародыша. Экспериментальные критерии гомогенного зарождения кристаллов. Гетерогенное зарождение кристаллов. Скорость роста граней и форма кристаллов. Дезактивация и активирование механических примесей. Роль очистки исходной фазы. Образование кристаллов на изоморфных и эпитаксиальных подложках и примесях.

3. Рост и равновесная форма кристаллов

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

4. Рост кристаллов из пара

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

5. Рост из расплава

Затвердевание чистого расплава. Кинетический коэффициент. Зонная плавка (теория).

Концентрационное переохлаждение расплава.

6. Рост из раствора (теория).

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

7. Скорость роста и форма кристаллов в присутствии примесей.

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

8. Качество и условия выращивания кристаллов.

Включение примесей в кристалл. Секториальное строение кристаллов. Аномальная оптическая двуосность.

9. Массовая кристаллизация

Особенности массовой кристаллизации. Массовая кристаллизация из раствора и в твердом теле.

10. Выращивание кристаллов из расплава

Методы выращивания кристаллов из расплава. Классификация методов. Кристаллизация в замкнутых, полукрытых 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).

11. 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.

12. Выращивание кристаллов 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).

13. Твердофазные превращения.

Деформационный отжиг. Рекристаллизация при спекании.

Рекристаллизация при полиморфных превращениях. Расстекловывание.

14. Образование жидких кристаллов

Что такое жидкие кристаллы. Классификация жидких кристаллов. Условия образования жидких кристаллов. Применение жидких кристаллов.

15. Биокристаллизация.

Пептидная связь, аминокислоты, белки. Классификация белков. История исследований белков и их кристаллов. Методы кристаллизации белков. Кристаллизация белков в космосе.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 90 ч.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Методические описания к лабораторным работам, учебные пособия по росту кристаллов.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Доклад-презентация) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Биокристаллизация.

Методы выращивания кристаллов из расплава. Классификация методов. Кристаллизация в замкнутых, полукрытых формах и без участия ограничивающих кристалл стенок.

Требования к оборудованию для выращивания кристаллов. Метод Бриджмена-Стокбаргера, его особенности.

Выращивание кристаллов в гидротермальных условиях. Особенности метода и аппаратуры.
Выращивание кристаллов кварца.

Метод катодного распыления, разновидности метода.

Методы химического транспорта. Кристаллизация в замкнутой и проточной системах.

Выращивание гетероэпитаксиальных структур.

Критерии оценивания (оценочное средство - Доклад-презентация)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Представлен доклад в рамках заданной темы по сути и с указанием дополнительной информации (например, спецификация оборудования, примеры и т.п.)
не зачтено	Доклад не представлен или представленных сведений недостаточно для описания заданной системы.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	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 несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие	При решении стандартных задач не продемонстрированы	Продемонстрированы основные умения. Решены	Продемонстрированы все основные умения.	Продемонстрированы все основные умения.	Продемонстрированы все основные умения.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все

	умений вследствие отказа обучающегося от ответа	основные умения. Имели место грубые ошибки	типичные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Термодинамическое описание фазового перехода первого рода. Потенциал Гиббса, химический потенциал.
2. Фазовые диаграммы однокомпонентной системы. Правило отрезков.
3. Рост кристаллов из раствора. Рост шероховатой грани.
4. Гетерогенное зарождение кристаллов.
5. Правило фаз Гиббса

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	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.
отлично	Твёрдое знание основных положений дисциплины, умение применять концептуальный аппарат при анализе актуальных проблем. Логически последовательные, содержательные, конкретные ответы на все вопросы экзаменационного билета. Практическая часть курса успешно выполнена
очень хорошо	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
хорошо	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
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	Критерии оценивания
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.
плохо	Отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, незнание терминологии. Практическая часть курса не выполнена.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-3

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

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Представлен отчет по каждой из лабораторных работ с учетом требований к оформлению отчетов (с теоретической частью, результатами эксперимента, выводами и списком литературы).
не зачтено	Не представлен(ы) отчет(ы) хотя бы по одной из лабораторных работ с учетом требований к оформлению отчетов (с теоретической частью, результатами эксперимента, выводами и списком литературы).

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Современная кристаллография : в 4 т. Т. 3. Образование кристаллов / авт. т.: А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х. С. Багдасаров [и др.] ; редкол.: Б. К. Вайнштейн (гл. ред.) [и др.]. - М. : Наука, 1980. - 408 с. : ил. - 3.20., 2 экз.

2. Портнов Вадим Николаевич. Возникновение и рост кристаллов : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальностям 010400 - физика и 010600 - физика конденсированного состояния вещества и по направлению 510400 - физика. - М. : Физматлит, 2006. - 328 с. - ISBN 5-94052-129-0 : 128.00., 50 экз.

3. Кристаллография : лабораторный практикум : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям физика и физика конденсир. состояния вещества... / под ред. Е. В. Чупрунова. - М. : Физматлит, 2005. - 412 с. - ISBN 5-94052-103-7 : 140.25., 49 экз.

Дополнительная литература:

1. Лодиз Р. А. Рост монокристаллов : пер. с англ. / под ред. А. А. Чернова и А. Н. Лобачева. - М. : Мир, 1974. - 540 с. : ил. - 2.84., 2 экз.

2. Портнов Вадим Николаевич. Кинетика и морфология дислокационного роста граней кристаллов из раствора : учебное пособие / ННГУ. - Н. Новгород : Изд-во Нижегород. госун-та, 2010. - 131 с. - ISBN 978-5-91326-131-1 : 110.08., 30 экз.

3. Портнов В. Н. Влияние примесей на скорость роста граней кристаллов из раствора : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Горьковский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Физ. фак. - Горький, 1966. - 241 с. - Библиогр.: с. 234 - 241., 1 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

AxioVision SE64. Rel. 4.8

<https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

<https://www.researchgate.net/>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Химические реактивы, химическая посуда, термометры, электроплитка, кристаллизаторы с вкладышами, оптические поляризационные микроскопы Zeiss, установка для определения температуры насыщения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

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

Автор(ы): Ким Екатерина Леонидовна, кандидат физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Чупрунов Евгений Владимирович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 30.11.2024, протокол № б/н.

