

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Электронная микроскопия
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

Б.А. Кульницкий, д-р физ.-мат. наук

И.А. Пережогин, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и химии наноструктур 29.05.2020

## **Аннотация**

Курс "Электронная микроскопия" предусматривает освоение студентами фундаментальных знаний в области электронной микроскопии, изучение физических основ и возможностей работы просвечивающего электронного микроскопа.

Задачи дисциплины:

- освоение студентами базовых знаний в области физического материаловедения;
- приобретение теоретических знаний в области исследования различных процессов, происходящих при взаимодействии электронного пучка с образцом, принципов и физических основ работы просвечивающего электронного микроскопа;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области электронной микроскопии;
- обучение навыков обработки данных, полученных на электронном микроскопе применительно к конкретным образцам – наноматериалам.

По результатам изучения курса студент должен:

Знать:

- виды приборов электронной микроскопии: просвечивающая электронная микроскопия;
- просвечивающая растровая(сканирующая) электронная микроскопия (ПРЭМ);
- растровая (сканирующая) электронная микроскопия;
- методики подготовки изучаемых объектов, обработки и анализа результирующей информации;
- численные порядки величин, характерные для различных разделов физики;
- современные проблемы физики и химии.

Уметь:

осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получить и провести содержательную интерпретацию научного результата;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

Владеть:

методом исследования объектов с помощью потока электронов, позволяющих изучить структуру этих объектов на макромолекулярном уровне;

навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами;

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Введение в дифракцию электронов
2. Волны и интерференция. Волновая механика и формирование изображения
3. Идеальные или гауссовы изображения
4. Коллективные возбуждения и энергетические потери в твердых телах
5. Сечения рассеяния.
6. Темнопольная микроскопия.
7. Электронная микроскопия высокого разрешения.

## **1. Цели и задачи**

### **Цель дисциплины**

- освоение студентами фундаментальных знаний в области электронной микроскопии, изучение физических основ и возможностей работы просвечивающего электронного микроскопа.

### **Задачи дисциплины**

- освоение студентами базовых знаний в области физического материаловедения;
- приобретение теоретических знаний в области исследования различных процессов, происходящих при взаимодействии электронного пучка с образцом, принципов и физических основ работы просвечивающего электронного микроскопа;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области электронной микроскопии;
- обучение навыков обработки данных, полученных на электронном микроскопе применительно к конкретным образцам – наноматериалам.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

виды приборов электронной микроскопии: просвечивающая электронная микроскопия;  
просвечивающая растровая(сканирующая) электронная микроскопия (ПРЭМ);  
растровая (сканирующая) электронная микроскопия;  
методики подготовки изучаемых объектов, обработки и анализа результирующей информации;  
численные порядки величин, характерные для различных разделов физики;  
современные проблемы физики и химии.

уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получить и провести содержательную интерпретацию научного результата;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

методом исследования объектов с помощью потока электронов, позволяющих изучить структуру этих объектов на макромолекулярном и субклеточном уровнях;  
навыками решения типовых задач и задач повышенной трудности теоретического и экспериментального плана с использованием методов вычислительной математики и информатики;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами;

#### **4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

##### **4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий**

---

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение в дифракцию электронов.	6	6		6
2	Волны и интерференция. Волновая механика и формирование изображения.	4	4		6
3	Идеальные или гауссовы изображения.	4	4		6
4	Коллективные возбуждения и энергетические потери в твердых телах.	4	4		7
5	Сечения рассеяния.	4	4		7
6	Темнопольная микроскопия.	4	4		7
7	Электронная микроскопия высокого разрешения.	4	4		6
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

##### 1. Введение в дифракцию электронов.

Введение в дифракцию электронов. Кинематическая теория дифракции электронов. Геометрия электронограмм. Интенсивность дифракции. Кинематическая теория контраста.

Динамическая теория контраста на изображениях.

Эффекты диффузного рассеяния на электронограммах. Форма узлов. Тонкие пластинки. Игольчатые выделения. Дифракционный контраст. Эффекты, связанные с наличием упругой деформации. Диффузное рассеяние. Экстинционные контуры. Качество изображения и разрешение.

##### 2. Волны и интерференция. Волновая механика и формирование изображения.

Когерентная длина. Волновой пакет. Интенсивность волны. Волновая механика и формирование изображения.

##### 3. Идеальные или гауссовы изображения.

Сила Лоренца. Линзы. Формула линзы. Ход лучей в микроскопе. Диафрагмы. Аберрации.

##### 4. Коллективные возбуждения и энергетические потери в твердых телах.

Коллективные возбуждения и энергетические потери в твердых телах.

Плазменное возбуждение. Нагрев образца и радиационные нарушения. Неупругие столкновения.

##### 5. Сечения рассеяния.

Дифференциальное эффективное сечение. Эффективная толщина. Кривая распределения интенсивности. Однократное и многократное рассеяние.

#### 6. Темнопольная микроскопия.

Темнопольная микроскопия. Стереомикроскопия и анализ следов.

Кристаллографические данные, получаемые из электронограмм. Эффект формы. Двойники. Экстра –рефлексы. Лоренцева микроскопия магнитных доменов.

#### 7. Электронная микроскопия высокого разрешения.

Электронная микроскопия высокого разрешения. Особенности современных просвечивающих электронных микроскопов. Дополнительные приставки к электронному микроскопу.

### **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

### **6.Перечень рекомендуемой литературы**

#### Основная литература

1. Л.М.Утевский, Дифракционная электронная микроскопия, Москва, Металлургия, 1973, 584 стр.
2. Основы аналитической электронной микроскопии, под редакцией Дж.Дж.Грена, Дж. И. Гольдштейна, Д.К.Джоя и А.Д.Ромига, Москва, Металлургия, 1990, 584 стр. 3.
3. Эндрюс К, Дайсон, Д., Киоун С., Электронограммы и их интерпретация, М., Мир, 1971, с. 259.
4. Д.Синдо, Т.Оикава, Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия, Москва, Техносфера, 2006, 249 с.

#### Дополнительная литература

1. П.Хирш, Ф.Хови, Р.Николсон, Д.Пэшли, М.Уэлан, Электронная микроскопия тонких кристаллов, Москва, Мир, 1968, 574 стр.

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Обеспечение самостоятельной работы (доступ в Интернет и т. д.)

[www.xumuk.ru](http://www.xumuk.ru)

[femto.com.ua](http://femto.com.ua)

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

программный пакет Carine.

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;

– напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

– чтение рекомендованной литературы;

– проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

– решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;

– подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики и химии наноструктур
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

Б.А. Кульницкий, д-р физ.-мат. наук  
И.А. Пережогин, канд. физ.-мат. наук



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Электронная микроскопия» обучающийся должен:

**знать:**

виды приборов электронной микроскопии: просвечивающая электронная микроскопия;  
просвечивающая растровая(сканирующая) электронная микроскопия (ПРЭМ);  
растровая (сканирующая) электронная микроскопия;  
методики подготовки изучаемых объектов, обработки и анализа результирующей информации;  
численные порядки величин, характерные для различных разделов физики;  
современные проблемы физики и химии.

**уметь:**

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получить и провести содержательную интерпретацию научного результата;  
эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

**владеть:**

методом исследования объектов с помощью потока электронов, позволяющих изучить структуру этих объектов на макромолекулярном и субклеточном уровнях;  
навыками решения типовых задач и задач повышенной трудности теоретического и экспериментального плана с использованием методов вычислительной математики и информатики;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами;

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

1) Комплект задач.

1. Построить стереопроекцию полюсов типа  $\{111\}$  кубической решетки; направление в центре круга проекций (ось зоны) –  $[112]$ .
2. Построить стереопроекцию направлений типа  $[110]$  кубической решетки; направление в центре круга проекций (ось зоны) –  $[110]$ .
3. Построить стереопроекцию направлений типа  $[111]$  и  $[001]$  кубической решетки; направление в центре круга проекций (ось зоны) –  $[001]$ .
4. Построить стереопроекцию направлений типа  $[110]$  кубической решетки; направление в центре круга проекций (ось зоны) –  $[111]$ .
5. Построить сечение обратной решетки для гранецентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[110]$ .
6. Построить сечение обратной решетки для гранецентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[112]$ .
7. Построить сечение обратной решетки для гранецентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[111]$ .
8. Построить сечение обратной решетки для гранецентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[100]$ .
9. Построить сечение обратной решетки для объемцентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[110]$ .
10. Построить сечение обратной решетки для объемцентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[111]$ .
11. Построить сечение обратной решетки для объемцентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[112]$ .
12. Построить сечение обратной решетки для объемцентрированной кубической решетки; ось зоны:  $[113]$ .

2) Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена:

1. Определение векторов и операции над векторами в атомной решетке.
2. Определение базисных векторов обратной решетки.
3. Межплоскостные расстояния.
4. Соотношения между базисными векторами атомной и обратной решеток.
5. Определение межплоскостных расстояний, их связь с векторами обратной решетки.
6. Переход от трехиндексного к четырехиндексному (и обратно) обозначению направлений и плоскостей в гексагональной решетке.
7. Определение оси зоны плоскостей.
8. Определение индексов плоскости, содержащей заданные направления.
9. Матрицы ориентационных соотношений, определение.
10. Параллельность плоскостей в разных решетках – связь между индексами.
11. Параллельность направлений – связь между индексами.
12. Связь между направлениями в прямой и обратной решетке.
13. Простые и сложные решетки.
14. «Разрешенные» и «запрещенные» плоскости (рефлексы на дифрактограмме).
15. Структурные факторы.
16. Стереографическая проекция.
17. Методы решения наиболее распространенных задач при помощи стереопроекции – построение направления или плоскости, составляющего известный угол с заданными, построение оси зоны плоскостей, построение плоскости, в которой лежат данные направления, определение угла между двумя плоскостями или двумя направлениями.
18. Двойникование кристаллов.
19. Связь между кристаллографическими индексами плоскостей и направлений в кристалле и его двойнике.
20. Построение сечений обратных решеток.
21. Эффекты диффузного рассеяния на электронограммах.
22. Плазменное возбуждение. Нагрев образца и радиационные нарушения.
23. Эффекты, связанные с наличием упругой деформации. Экстинционные контуры.

24. Кристаллографические данные, получаемые из электронограмм. Эффект формы. Двойники. Экстра –рефлексы.
25. Лоренцева микроскопия магнитных доменов
26. Особенности современных просвечивающих электронных микроскопов. Дополнительные приставки к электронному микроскопу.
27. Идеальные или гауссовы изображения. Сила Лоренца. Линзы. Формула линзы. Ход лучей в микроскопе.
28. Аберрации.
29. Дифференциальное эффективное сечение. Эффективная толщина.
30. Темнопольная микроскопия. Стереомикроскопия и анализ следов
31. Эффекты двойной дифракции.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Соотношения между базисными векторами атомной и обратной решеток.
2. Определение межплоскостных расстояний, их связь с векторами обратной решетки.

Пример 2.

1. Кристаллографические данные, получаемые из электронограмм. Эффект формы. Двойники. Экстра –рефлексы.
2. Лоренцева микроскопия магнитных доменов

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 бала - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 бала - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 бал - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.