

**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>	Синхротронные методы в нанометрологии
<b>по направлению:</b>	Электроника и наноэлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и наноэлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: К.В. Николаев, phd

Программа обсуждена на заседании кафедры нанометрологии и наноматериалов 04.04.2022

## Аннотация

Курс "Синхротронные методы в нанометрологии" предусматривает изучение теоретических основ синхротронных методов исследования наноструктур, а также преследует цель сформировать представление о том, каким образом эти методы используются в исследованиях и разработке современных концепций микроэлектроники.

Задачи курса:

- Ознакомить студентов с основными теоретическими концепциями рассеяния синхротронного излучения в конденсированных средах
- Сформировать умение подобрать нужный метод исследования для анализа структур различных типов
- Выработать навык построения математических моделей, адекватных выбранным методам исследования, для анализа экспериментальных данных.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Источники синхротронного излучения и методы исследования
2. Взаимодействие синхротронного излучения с конденсированными средами
3. Теория возмущений и стохастические процессы
4. Исследование планарных наноструктур
5. Фазочувствительные методы исследования
6. Исследование магнитных свойств материалов
7. Сверхбыстрое рассеяние рентгеновских лучей
8. Математические методы анализа данных

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Изучить теоретические основы синхротронных методов исследования наноструктур. Сформировать представление о том, каким образом эти методы используются в исследованиях и разработке современных концепций микроэлектроники.

### Задачи дисциплины

- Ознакомить студентов с основными теоретическими концепциями рассеяния синхротронного излучения в конденсированных средах
- Сформировать умение подобрать нужный метод исследования для анализа структур различных типов
- Выработать навык построения математических моделей, адекватных выбранным методам исследования, для анализа экспериментальных данных.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основы теории рассеяния синхротронного излучения и современные синхротронные методы исследования, а также знать какой метод применим к тем или иным типам наноструктур.

уметь:

Поставить задачу и планировать эксперимент для исследования конкретной наноструктуры.

владеть:

Методами моделирования синхротронного эксперимента и анализа экспериментальных данных

### 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	Источники синхротронного излучения и методы исследования	2			2
2	Взаимодействие синхротронного излучения с конденсированными средами	4			4
3	Теория возмущений и стохастические процессы	6			4
4	Исследование планарных наноструктур	6			4
5	Фазочувствительные методы исследования	4			4
6	Исследование магнитных свойств материалов	2			4
7	Сверхбыстрое рассеяние рентгеновских лучей	2			4
8	Математические методы анализа данных	4			4
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Источники синхротронного излучения и методы исследования

Поколения источников синхротронного излучения (СИ). Основные параметры источников: яркость, эмиттанс, когерентность, энергия. Специфика синхротронного эксперимента. Типы наноструктур, исследующиеся с помощью СИ: тонкие плёнки, монокристаллы и поликристаллы, химические соединения, структурированные поверхности, наночастицы.

##### 2. Взаимодействие синхротронного излучения с конденсированными средами

Волновое уравнение и уравнения Максвелла в сплошных средах. Стационарные решения волнового уравнения. Аналогия со стационарным уравнением Шредингера. Рассеивающий потенциал конденсированной среды для синхротронного излучения. Волновое уравнение и квантовая электродинамика. Волновые процессы на языке операторов рождения и уничтожения.

Кинематическая теория рассеяния. Вывод из электродинамических принципов. Вывод из квантовомеханических принципов. Приближение Борна. Границы применимости кинематической теории. Проблема потери фазы. Введение понятия обратного пространства. Наивная модель дифракции в идеальных кристаллах: гребёнка Дирака.

Динамическая теория рассеяния. Вывод из электродинамических принципов. Теорема Блоха. Ширина дифракционного пика - ширина Дарвина. Представление о ближнем и дальнем поле ( $r$ - и  $k$ -представления). Когерентность рассеянного синхротронного излучения

### 3. Теория возмущений и стохастические процессы

Принцип взаимности электродинамики. Приближение Борна для искаженной волны (Distorted wave Born approximation – DWBA) как следствие принципа взаимности. Квантовомеханическое описание DWBA. Диффузное рассеяние синхротронных лучей. Интерференция диффузного рассеяния в коррелированных средах.

Математическое описание коррелированных сред. Стохастические процессы. В чём отличие стохастического процесса от случайной переменной. Стационарность и эргодичность стохастических процессов. Характеристики стохастических процессов: автокорреляционная функция и спектральная плотность. Теорема Хинчина – Колмогорова. Спектральная плотность как представление коррелированной среды в обратном пространстве.

### 4. Исследование планарных наноструктур

Зеркальное отражение синхротронного излучения от тонкопленочных аморфных структур (метод: X-ray reflectivity – XRR). Дифракция рентгеновских лучей на монокристаллах, на эпитаксиальных пленках и на эпитаксиальных сверхструктурах. (метод: High-resolution X-ray diffraction HRXRD). Динамическая теория в двухлучевом приближении. Исследование параметров кристаллической решётки. Влияние дефектов кристаллической структуры на дифракционную картину. Исследование структуры поверхности кристалла с атомарным разрешением по глубине. Распределение интенсивности между дифракционными пиками и стержни усечения кристалла (метод: Crystal truncation rod – CTR).

Дифракция на поликристаллах (X-ray powder diffraction – XRPD). Исследование структуры тонких плёнок на поверхности жидкости. Плёнки Ленгмюра. Малоугловая дифракция в скользящей геометрии (метод: Grazing-incidence diffraction – GID). Структурный фактор двумерной периодической структуры. Связь картины рассеяния и формы органической молекулы в плёнках Ленгмюра – форм-фактор.

Исследование структуры коррелированных систем (наночастицы, квантовые точки, дефекты, шероховатость поверхности) - малоугловое рассеяние рентгеновских лучей в скользящей и нормальной геометрии (методы: Small-angle X-ray scattering – SAXS, Grazing-incidence small-angle X-ray scattering – GISAXS).

### 5. Фазочувствительные методы исследования

Исследование структуры отдельных микрообъектов. Методы когерентной визуализации, голография, птихография. Задача восстановления фазы. (методы: Coherent diffraction imaging – CDI, Holography, Ptychography). Алгоритм Финапа. Задачи восстановления фазы.

Раздельное исследование профилей концентрации различных химических элементов. Стоячие рентгеновские волны. (методы: X-ray standing wave – XSW, Grazing-exit X-ray fluorescence GEXRF). Разработка оптической системы для литографии в глубоком ультрафиолете.

Трехмерные стоячие рентгеновские волны. (метод 3D-XSW) Многоволновое диффузное рассеяние. Нанометрология микроэлектронных систем со сложной трёхмерной архитектурой: Fin-FET транзисторы, GAA транзисторы. Нанометрология для литографии в глубоком ультрафиолете с многократным экспонированием: детектирование дрейфа периода и шероховатости стенок структуры

## 6. Исследование магнитных свойств материалов

Исследование магнитных свойств материалов. Магнитная рефлектометрия. Рентгеновский магнитный круговой/линейный дихроизм. (методы: XMCD/XMLD) Нанометрология магнитных структуры, исследования в области разработки устройств памяти следующего поколения.

## 7. Сверхбыстрое рассеяние рентгеновских лучей

Исследование динамики процессов с фемтосекундным временным разрешением. Сверхбыстрая дифракция рентгеновских лучей. (метод: ultrashort X-ray pulses) Фундаментальные исследования теплообменных процессов в кристаллах и наночастицах для нанолитографии в глубоком ультрафиолете

## 8. Математические методы анализа данных

Сравнение прямого моделирования с экспериментальными данными. Функция правдоподобия и критерий  $\chi^2$ . Их связь с теоремой Байеса.

Линейное программирование. Задачи оптимизации. Метод максимального правдоподобия и моделирование ошибок. Алгоритм Метрополиса. (Monte-Carlo Markov chain – MCMC)

Суррогатные математические модели для решения прямой задачи. Полиномиальный хаос (Polynomial chaos expansion – PCE). Нейронные сети. (Optimal transport map)

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

учебная аудитория, доска, маркеры, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Боуэн, Д. К., and Б. К. Таннер. Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография. Наука, 2002.
2. Фетисов, Геннадий. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. Litres, 2018.

### Дополнительная литература

1. Daillant, Jean, and Alain Gibaud, eds. X-ray and neutron reflectivity: principles and applications. Vol. 770. Springer, 2008.
2. Als-Nielsen, Jens, and Des McMorrow. Elements of modern X-ray physics. John Wiley & Sons, 2011.

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

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

на занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, прослушавший курс семинаров, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к докладчику.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра нанометрологии и наноматериалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	К.В. Николаев, phd

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Синхротронные методы в нанометрологии» обучающийся должен:

### знать:

Основы теории рассеяния синхротронного излучения и современные синхротронные методы исследования, а также знать какой метод применим к тем или иным типам наноструктур.

### уметь:

Поставить задачу и планировать эксперимент для исследования конкретной наноструктуры.

### владеть:

Методами моделирования синхротронного эксперимента и анализа экспериментальных данных

## 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.

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

Вопросы для подготовки к экзамену:

Вопросы по теоретической части курса:

1. Уравнения Максвелла для сплошных сред, волновое уравнение, стационарные решения.
2. Операторы рождения и уничтожения. Показать связь с классической электродинамикой.
3. Вывести принцип взаимности в дипольном приближении из уравнений Максвелла для сплошных сред.
4. Кинематическая теория рассеяния. Вывод из квантовомеханических соображений. Приближение Борна.
5. Динамическая теория рассеяния. Вывод с помощью теоремы Блоха. Показать связь между шириной Дарвина и глубиной экстинкции
6. Стационарные стохастические процессы. Доказать теорему Хинчина-Колмогорова.
7. Стержни кристаллического усечения. На основе приближения Борна показать как структура поверхности влияет на распределение интенсивности между дифракционными пиками.
8. Описать алгоритм Финапа. Математически обосновать сходимость этого алгоритма.
9. Самоподобные поверхности. Оценить асимптотическое поведение стохастических процессов с экспоненциальной автокорреляционной функцией. Для описания фракталов каких размерностей применим такой подход?
10. Вывести метод оптических матриц.



Вопросы по экспериментальным методам (задачи):

1. Зеркальное отражение синхротронного излучения (XRR).
2. Дифракция на монокристаллах и сверхрешётках (HRXRD).
3. Порошковая дифракция (XRPD).
4. Малоугловая порошковая дифракция в геометрии скользящего падения (GID)
5. Малоугловое рентгеновское рассеяния на ансамблях наночастиц в геометрии нормального падения (SAXS)
6. Малоугловое рентгеновское рассеяние на ансамблях наночастиц в геометрии скользящего падения (GISAXS)
7. Методы когерентной визуализации, голография, птихография.
8. Метод стоячих рентгеновских волн. (XSW)
9. Трёхмерные стоячие рентгеновские волны и нанометрология структурированных поверхностей.
10. Рентгеновский магнитный круговой/линейный дихроизм. (методы: XMCD/XMLD)
11. Сверхбыстрая дифракция рентгеновских лучей.
12. Математические методы анализа данных. Алгоритм метрополиса (MCMC).
13. Математические методы анализа данных. Полиномиальный хаос (PCE).

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Стационарные стохастические процессы. Доказать теорему Хинчина-Колмогорова.
2. Порошковая дифракция (XRPD).
3. Задача

Пример 2.

1. Описать алгоритм Финапа. Математически обосновать сходимость этого алгоритма.
2. Малоугловое рентгеновское рассеяние на ансамблях наночастиц в геометрии скользящего падения (GISAXS)
3. Задача

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;

- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

Билет состоит из двух вопросов и задачи. Первый вопрос теоретический - требуется провести математические выкладки и изложить их физический смысл. Второй вопрос практический - требуется дать качественное описание экспериментального метода. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать одного астрономического часа в устной форме.