

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 № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Сканирующая зондовая микроскопия

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Сканирующая зондовая микроскопия» относится к вариативной части Блока 1 «Дисциплины, модули» ОПОП. Является дисциплиной по выбору в третьем семестре (второй год обучения) в магистратуре.

Целями освоения дисциплины являются:

1. формирование у студентов представления о физических основах зондовой микроскопии;
2. формирование у студентов общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

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
ПК-3. Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	<i>ПК-3.1. Знание основных законов физики ПК-3.2. Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности ПК-3.3. Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности и зарубежного опыта</i>	(ПК-3) Знать физические основы различных методов сканирующей зондовой микроскопии; теоретические основы физики взаимодействия локальных зондов различных типов (туннельный, атомно-силовой, оптический ближнепольный, магнитный, электростатический и др.) с поверхностью исследуемых материалов в различных средах (вакуум, газы, жидкости); устройство, физические принципы работы и особенности конструкции различных типов зондовых микроскопов и зондов; теорию артефактов СЗМ изображений и методы учета и исключения артефактов в процессе эксперимента и при анализе экспериментальных данных; (ПК-3) Уметь выбирать подходящую методику, учитывать особенности методики при исследовании поверхности и свойств твердых тел, проводить	Индивидуальные собеседования	Индивидуальные практические задания, экзамен

		<p>исследования методом сканирующей зондовой микроскопии и правильно интерпретировать и представлять результаты эксперимента;</p> <p>(ПК-3) основными методиками сканирующей зондовой микроскопии, математическим аппаратом, используемом в методах обработки и анализа экспериментальных данных в СЗМ.</p>		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	34
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	110
Промежуточная аттестация	54 экзамен

3.2. Содержание дисциплины

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Тема 1. Введение. Общие свойства зондовых микроскопов	6	2			2	4
Тема 2. Сканирующая туннельная	9	2		2	4	5

микроскопия (СТМ)						
Тема 3. Режимы работы СТМ	9	2		2	4	5
Тема 4. Система автоматизации СТМ	7	1		1	2	5
Тема 5. Туннельная спектроскопия	8	1		2	3	6
Тема 6. Атомно-силовая микроскопия	8	1		2	3	6
Тема 7. Магнитно-силовая микроскопия	7	1		1	2	5
Тема 8. Ближнепольная оптическая микроскопия	7	1		1	2	5
Тема 9. Пространственное разрешение зондовых микроскопов	7	1		1	2	5
Тема 10. Модификация свойств поверхности с помощью СТМ/АСМ/МСМ	9	2		2	4	5
Тема 11. Модификация свойств поверхности с помощью СБОМ	9	2		2	4	5
в т.ч. текущий контроль		2				
Промежуточная аттестация – Экзамен						54

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

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

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен	
Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видеоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.

Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

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

– индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

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

– выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Критерии ответа студента на экзамене

Оценка «отлично» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «хорошо» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три

несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «удовлетворительно» – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «неудовлетворительно» – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1 Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Получение первого СЗМ изображения. Обработка и представление результатов эксперимента. (9 часов).
2. Исследование поверхности твердых тел методом сканирующей туннельной микроскопии. (СТМ) (9 часов).
3. Исследование топографии поверхности твердых тел методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в неконтактном режиме (9 часов).

Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии (9 часов).

Вопросы для собеседования

1. Назовите основные компоненты СЗМ и их назначение.
2. Назовите виды сенсоров и принципы их действия.
3. Объясните понятие пьезоэлектрического эффекта и принцип действия пьезоэлектрического двигателя. Опишите различные конструкции сканеров.
4. Опишите общую конструкцию прибора NanoEducator.
5. Объясните конструкцию зондового датчика туннельного тока/ силового взаимодействия прибора NanoEducator и принцип его действия.
6. Опишите механизм подвода зонда к образцу в приборе NanoEducator. Поясните параметры, определяющие силу взаимодействия зонда с образцом.
7. Объясните принцип сканирования и работы системы обратной связи. Расскажите о критериях выбора параметров сканирования.
8. Назовите основные компоненты СТМ и их назначение. Объясните принцип работы СТМ на примере туннельного контакта двух проводников.
9. Поясните устройство и принцип действия туннельного сенсора. Опишите основные параметры, которые вы будете определять в работе.
10. Опишите зависимость силы взаимодействия от расстояния зонд-образец.
11. Назовите основные режимы работы АСМ и их назначение.
12. Объясните основные способы детектирования силы в контактном режиме АСМ.
13. Объясните принцип работы неконтактного АСМ.
14. Для чего используется режим измерения фазового контраста при работе в неконтактном режиме АСМ?
15. Поясните устройство и принцип действия неконтактного силового сенсора прибора NanoEducator.
16. Опишите режим выполнения спектроскопии в приборе NanoEducator.
17. Что такое прямой и обратный пьезоэффект? Объясните понятие пьезоэлектрического эффекта на примере кварца и принцип действия пьезоэлектрического двигателя.

18. Объясните возможные артефакты, вносимые пьезокерамикой: нелинейность, гистерезис, ползучесть, температурный дрейф. Каковы способы борьбы с ними?
19. Какие виды сканеров Вы знаете? Назовите виды искажений, вносимые сканерами в СЗМ изображение.
20. Перечислите основные виды зондов, используемых в СЗМ, и способы их изготовления.
21. Опишите идеальный СЗМ зонд. Какие искажения способны вызвать зонды при отображении различных поверхностных особенностей?
22. Опишите устройство для изготовления СЗМ зондов для прибора NanoEducator. Расскажите о методе электрохимического травления.

Вопрос 1.

Какой из перечисленных методов предназначен для исследования рельефа поверхности образца?

Варианты ответа:

1. Атомно-силовая микроскопия.
2. Просвечивающая электронная микроскопия.
3. Оже-спектроскопия.
4. Ионная микроскопия.

Шкала оценки:

- 1 балл – ответ (1);
0 баллов – ответы (2, 3, 4).

Вопрос 2.

Что происходит с резонансной частотой кантилевера при приближении зонда к образцу?

Варианты ответа:

1. Уменьшается.
1. Увеличивается.
2. Не изменяется.

Шкала оценки:

- 1 балл – ответ (1);
0 баллов – ответы (2, 3).

Вопрос 3.

По какой причине объекты одинакового размера в начале и в конце сканируемого изображения могут иметь различные размеры?

Варианты ответа:

1. Нелинейность пьезокерамики.
2. Не идеальность формы зонда.
3. Вибрации в помещении
4. Особенности конструкции сканера

Шкала оценки:

- 1 балл – ответ (1);

0 баллов – ответы (2, 3, 4).

Вопрос 4.

При анализе СЗМ изображения дифракционной решетки с высотой столбца 540 нм, измеренная высота составила 920 нм. Чем вызвана такая ошибка?

Варианты ответа:

1. Неверной калибровкой сканера по оси Z.
2. Нелинейностью пьезокерамики
3. Особенности формы зонда
4. Вибрациями в помещении

Шкала оценки:

1 балл – ответ (1);

0 баллов – ответы (2, 3, 4).

Вопрос 5.

Требуется определить период дифракционной решетки, табличное значение которого составляет 3 мкм. Какой размер области сканирования необходимо выбрать для этой цели?

Варианты ответа:

1. 2 на 2 мкм
2. 15 на 15 мкм
3. 3 на 3 мкм
4. 1 на 1 мкм

Шкала оценки:

1 балл – ответ (2);

0 баллов – ответы (1, 3, 4).

Вопрос 6.

При анализе СЗМ изображения мастер диска определено расстояние между дорожками – 0.6 мкм, тогда как табличное значение – 1.6 мкм. С чем связана ошибка?

Варианты ответа:

1. Неверной калибровкой сканера по оси Z.
2. Нелинейностью пьезокерамики
3. Особенности формы зонда
4. Вибрациями в помещении

Шкала оценки:

1 балл – ответ (3);

0 баллов – ответы (1, 2, 4).

Вопрос 7.

Для чего используется калибровочная решетка в виде длинных острых игл?

Варианты ответа:

1. Для калибровки сканера по оси Z.
2. Для калибровки сканера по осям X и Y.
3. Для определения кривой подвода-отвода.
4. Для определения формы зонда.

Шкала оценки:

- 1 балл – ответ (4);
0 баллов – ответы (1, 2, 3).

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Методы микроскопического исследования поверхности твердых тел. Краткая сравнительная характеристика.
2. Краткий обзор истории СЗМ. Профилометр/профилограф. Ионный микроскоп Эдвина Мюллера, топографайнер Рассела Янга.
3. Сканирующая туннельная микроскопия. Зонная диаграмма туннельного контакта двух проводников. Конструкция сканирующего туннельного микроскопа. Режимы постоянного тока и постоянной высоты в СТМ.
4. Отображение плотности состояний в СТМ (V-модуляция). Контраст локальной работы выхода (Z-модуляция). Сканирующая туннельная спектроскопия полупроводниковых материалов. ВАХ туннельного контакта металл-полупроводник.
5. Атомно-силовая микроскопия. Зависимость силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца от расстояния. Методы регистрации взаимодействия зонд-образец (оптический, пьезорезистивный, емкостной, интерферометрический).
6. Контактная мода АСМ. Режим постоянной высоты и постоянной силы. Кривые подвода/отвода.
7. Микроскопия латеральных сил. Топографические артефакты. Микроскопия локальной твердости (Z-модуляция).
8. Неконтактный режим работы АСМ. Эффект «прилипания» кантилевера. Колебания кантилевера при наличии периодической вынуждающей силы.
9. Малые колебания кантилевера в силовом поле.
10. Полуконтактный режим работы АСМ. Фазовый контраст. Амплитудная, фазовая и частотная спектроскопии.
11. Изучение взаимодействия зонд-образец. Кривые подвода/отвода в неконтактном режиме.
12. Устройство и физические основы работы зондового датчика СЗМ NanoEducator. Принцип работы преобразователя ток-напряжение туннельного датчика
13. Режим самовозбуждения (частотная модуляция). Управление добротностью (Q-контроль). Анализ амплитудных кривых (кривая нормированного частотного сдвига).
14. Конструкция СЗМ NanoEducator. Конструкция сканера СЗМ NanoEducator. Принцип действия механизма автоматизированного подвода (захвата взаимодействия) СЗМ NanoEducator.
15. Основные компоненты СЗМ. Принцип работы системы обратной связи СЗМ.
16. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии.
17. Магнитно-силовая микроскопия. Статическая и динамическая моды.
18. Сканирующая зондовая литография.
19. Методы линеаризации характеристик сканеров.

20. Устройство, принципы работы и характеристики СЗМ сканеров. Артефакты СЗМ изображения, обусловленные сканером, и методы борьбы с ними.
21. Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ). Понятие ближнего поля.
22. Артефакты конволюции. Метод деконволюции СЗМ изображений.
23. Электросиловая микроскопия. Сканирующая микроскопия Кельвина. Динамическая контактная электросиловая микроскопия.
24. Сканирующая тепловая микроскопия. Физические основы, методы реализации и их характеристики
25. Сканирующая емкостная микроскопия. Микроскопия сопротивления растекания
26. Конструкция БСОМ. "Shear-force" метод контроля расстояния зонд-поверхность в ближнепольном оптическом микроскопе
27. Ближнепольный сканирующий оптический микроскоп: конфигурации, применения, зонды
28. Сканирующая электрохимическая микроскопия. Сканирующая микроскопия ионной проводимости. Сканирующая акустическая микроскопия
29. Защита СЗМ от внешних воздействий. Устройства для прецизионного перемещения зонда и образца

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

ведущий научный сотрудник отдела магнитных наноструктур (отд. 150) ИФМ РАН, д. ф.-м. н. В.Л. Миронов.

доцент кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники, к. ф.-м. н. Н.О. Кривулин.

Зав. каф. "Физика наноструктур и нанoeлектроника" _____

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.