

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  
Кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ  
протокол № 4 от «14» декабря 2021 г.

**Рабочая программа дисциплины  
Сканирующая зондовая микроскопия**

Уровень высшего образования  
Бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника  
Направленности (профили):  
материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения  
очная

Нижний Новгород, 2022

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Сканирующая зондовая микроскопия» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника. Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Физика» и «Химия».

Цель дисциплины - дать студентам знания о физических основах сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), теоретических основах физики взаимодействия локальных зондов различных типов (туннельный, атомно-силовой, и др.) с поверхностью исследуемых материалов, устройстве и физических принципах работы различных типов зондовых микроскопов, методах и методиках исследования различных характеристик материалов и физических свойств поверхности твердых тел, областях применения методов СЗМ в области физики и химии поверхности, физике и технологии твердотельных микро- и наноструктур, а также, кратко, в смежных областях: химии и молекулярной биологии.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

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	
ПК-4. Готовность проводить исследования и разработки в области нанофизики, наноматериалов, нанодиагностики, нанотехнологий и микросистемной техники с использованием современных методов анализа и контроля свойств наноструктурированных материалов и систем	ПК-4.1. Знает методики измерений параметров и свойств наноматериалов и наноструктур ПК-4.2. Умеет совершенствовать и внедрять новые методы и методики измерений параметров и свойств наноматериалов и наноструктур ПК-4.3. Владеет навыками использования различных методов и методик	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	Вопросы по темам/разделам дисциплины.  Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.  Фонд тестовых заданий

	измерений параметров и свойств наноматериалов и наноструктур	типов зондовых микроскопов и зондов; теорию артефактов СЗМ изображений и методы учета и исключения артефактов в процессе эксперимента и при анализе экспериментальных данных. уметь: выбирать подходящую методику, учитывать особенности методики при исследовании поверхности и свойств твердых тел, проводить исследования методом сканирующей зондовой микроскопии и правильно интерпретировать и представлять результаты эксперимента. владеть: основными методиками сканирующей зондовой микроскопии, математическим аппаратом, используемом в методах обработки и анализа экспериментальных данных в СЗМ.	
--	--	---	--

### 3. Структура и содержание дисциплины «Сканирующая зондовая микроскопия»

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа	32
- КСРИФ	1
самостоятельная работа	43 (работа в семестре)
Промежуточная аттестация	5 семестр – зачет

### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации	Всего (часы)	В ТОМ ЧИСЛЕ					
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы					Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				Всего	
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации		
1. Введение	18	4		8		12	6
2. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ).	18	4		8		12	6
3. Атомно-силовая микроскопия (АСМ).	18	4		8		12	6
4. Магнитная силовая микроскопия.	10	4				4	6
5. Электросиловая микроскопия.	10	4				4	6
6. Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ).	12	6				6	6
7. Особенности конструкции СЗМ. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии	21	6		8		14	7
<b>Промежуточная аттестация</b>							
<b>Зачет</b>	<b>1</b>						
<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>48</b>	<b>43</b>

#### Содержание разделов дисциплины

##### 1. Введение.

Методы микроскопического исследования, сравнительная характеристика. Устройство и принципы работы сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Краткий обзор истории СЗМ.

##### 2. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ).

Устройство и физические принципы работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Устройство и принципы работы туннельного сенсора. Одномерные и трехмерные

модели протекания туннельного тока. Туннельный матричный элемент. Латеральное разрешение СТМ Эффект последнего атома. СТМ-моды: режимы постоянного тока и постоянной высоты. Методика изготовления и особенности применения различных СТМ зондов. Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС). Вольт-амперная характеристика туннельного контакта. СТС плотности состояний на поверхности образца. СТС цветных атомов и нанокластеров на поверхности, кулоновская блокада, резонансное туннелирование. V-модуляция, Z-модуляция.

### 3. Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

Устройство и физические основы работы АСМ сенсора. Кантилеверы. Взаимодействие АСМ зонда с поверхностью твердого тела на микроскопическом уровне. Методы изготовления и особенности применения различных видов АСМ-зондов. Конволюционные артефакты. Контактная АСМ мода (Contact Mode). Режимы постоянной силы и постоянной высоты. Режим латеральной силы (Lateral Force Mode, LFM). Z- модуляция. F/S спектроскопия. Зависимость силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца от расстояния. Измерение упругих и адгезионных свойств поверхности твердых тел. Неконтактная АСМ мода (Non-Contact Mode). Физические принципы работы атомно-силового сенсора в неконтактной моде. Линейная теория колебаний кантилевера. Режим периодического контакта (Tapping Mode). Режим фазового контраста (Phase Imaging Mode).

### 4. Магнитная силовая микроскопия.

Многопроходные моды. Магнитная силовая микроскопия (Magnetic Force Microscopy, MFM).

### 5. Электросиловая микроскопия.

Электросиловая микроскопия (Electric Force Microscopy, EFM). Сканирующая Кельвиновская микроскопия (Kelvin Mode). Сканирующая емкостная микроскопия (Scanning Capacitance Microscopy, SCM).

### 6. Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ).

Теория дифракции света на субволновой апертуре. Распространение света в нестационарных оптических волноводах. Устройство и методы изготовления БСОМ зондов. Пьезоэлектрический сенсор сдвиговой силы (Tuning Fork Shear-Force Sensor). Применение БСОМ для исследования наноструктур, элементов волоконной и интегральной оптики, в химии и молекулярной биологии.

### 7. Особенности конструкции СЗМ. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии

Устройство, принципы работы и характеристики СЗМ сканеров. Характеристики пьезоэлектрических материалов. Нелинейность, гистерезис, дрейбзг, усталость. Артефактами сканера. Методы линеаризации характеристик сканеров. Устройство и принципы работы системы обратной связи (ОС) СЗМ. Аналоговая и цифровая ОС. Теория PID регуляторов. Постоянные цепи ОС пропорциональная, интегральная, дифференциальная. Особенности конструкции СЗМ. Подвод зонда к образцу. Контроль позиционирования зонда относительно зонда. СЗМ, совмещенный с растровым электронным микроскопом. Виброустойчивость. Шумоизоляция.

## **4. Образовательные технологии**

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме и в форме лабораторных практикумов, позволяющих формировать у студентов навыки работы со сканирующим зондовым микроскопом и умения получать и анализировать результаты исследования топографии поверхности и свойств твердых тел.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся.**

Самостоятельная работа студентов связана с теоретической подготовкой к допуску и написанием отчётов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводится как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в

учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на лабораторных занятиях. Для прохождения итоговой аттестации проводится зачёт по темам, изученным в 5-м семестре.

Для контроля промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Сканирующая зондовая микроскопия» используются приведенные ниже вопросы, включенные в билеты к зачету.

#### **Вопросы для контроля**

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. Режим самовозбуждения (частотная модуляция). Управление добротностью (Q-контроль). Анализ амплитудных кривых (кривая нормированного частотного сдвига).
13. Магнитно-силовая микроскопия. Статическая и динамическая моды.
14. Приближение эффективного дипольного магнитного момента. Методы экспериментального определения параметров магнитного кантилевера (калибровка).
15. Электросиловая микроскопия. Сканирующая микроскопия Кельвина. Динамическая контактная электросиловая микроскопия.
16. Сканирующая емкостная микроскопия. Микроскопия сопротивления растекания.
17. Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ). Понятие ближнего поля.
18. Конструкция БСОМ. "Shear-force" метод контроля расстояния зонд-поверхность в ближнепольном оптическом микроскопе.
19. Ближнепольный сканирующий оптический микроскоп: конфигурации, применения, зонды.
20. Сканирующая тепловая микроскопия. Физические основы, методы реализации и их характеристики.
21. Сканирующая электрохимическая микроскопия. Сканирующая микроскопия ионной проводимости. Сканирующая акустическая микроскопия.

22. Устройство, принципы работы и характеристики СЗМ сканеров. Артефакты СЗМ изображения, обусловленные сканером, и методы борьбы с ними.
23. Основные компоненты СЗМ. Принцип работы системы обратной связи СЗМ.
24. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии.
25. Методы линейаризации характеристик сканеров.
26. Артефакты конволюции. Метод деконволюции СЗМ изображений.
27. Защита СЗМ от внешних воздействий. Устройства для прецизионного перемещения зонда и образца.
28. Сканирующая зондовая литография.
29. Конструкция СЗМ NanoEducator. Конструкция сканера СЗМ NanoEducator. Принцип действия механизма автоматизированного подвода (захвата взаимодействия) СЗМ NanoEducator.
30. Устройство и физические основы работы зондового датчика СЗМ NanoEducator. Принцип работы преобразователя ток-напряжение туннельного датчика.

## 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).

## 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых учувствует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности 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, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения.  Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами .	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельным и несущественным недочетами , выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. 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 недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Описание шкал оценивания

При выставлении оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибальная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе бакалавра) трансформируется в пятибальную. Обе шкалы привязаны к 100-бальной системе, в которой баллы набираются в ходе текущего контроля при сдаче допусков и отчетов по лабораторным работам, при проверке рефератов и непосредственно на зачете.

За одну полностью выполненную лабораторную работу или реферат начисляется максимум 10 баллов. Поскольку за семестр необходимо выполнить четыре работы, то всего за семестр можно набрать не более 40 баллов.

По итогам освоения дисциплины сдается зачет. Билет содержит два вопроса. За ответ на каждый из вопросов начисляется максимум 30 баллов.



Итого с учётом успешного выполнения лабораторных работ можно набрать максимум 100 баллов.

### **Критерии выставления оценки при сдаче зачета:**

Зачтено	Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление графиков полностью соответствует общепринятым требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно.
Не зачтено	Не выполнены одно или более заданий лабораторных работ. Отчеты выполнены с ошибками, не все рисунки и схемы представлены. Оформление графиков не соответствует общепринятым требованиям. Требования к оформлению отчетов не соблюдены.

## **6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения**

### **6.2.1 Контрольные вопросы**

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.

#### 6.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-4

##### 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);  
1. баллов – ответы (1, 2, 3).

**6.3.Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.**

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ.

**7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины  
«Сканирующая зондовая микроскопия»**

а) основная литература:

1. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии / Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. Российская академия наук, Институт физики микроструктур. Нижний Новгород, 2004 - 110 с.

2. Сканирующая зондовая микроскопия, спектроскопия и литография. Учебное пособие для студ. вузов / сост. А. В. Круглов, Д. О. Филатов .— Н. Новгород , 2004 .— 159 с.
3. Г.Бинниг, Х.Рорер. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности. Нобелевские лекции по физике – 1986 // Успехи физических наук, т. 154 (1988), вып.2, с. 261.
4. А.А. Бухараев, Д.Б. Овчинников, А.А. Бухараева. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор). // Заводская Лаборатория. Исследование структуры и свойств, Физические методы исследования и контроля. 1996, №1, с.10-27.
5. П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. // Часть I: Микроэлектроника, 1999, том 28, № 6, с. 405-414.
6. П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. // Часть II: Микроэлектроника, 1999, том 29, № 1, с. 13-22.
7. С. А. Рыков Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур : Учебное пособие для вузов по направлению "Техническая физика" / С. А. Рыков ; Общ. ред. В. И. Ильин, А. Я. Шик . – СПб. : Наука, 2001 . – 52 с.
8. Р.З. Бахтизин Сканирующая туннельная микроскопия - новый метод изучения поверхности твердых тел // Соросовский образовательный журнал, 2000, т.6, №11 С. 1-7.
9. К. Л. Сорокина, А. Л. Толстихина Модификация атомно-силовой микроскопии для изучения электрических свойств кристаллов и пленок. Обзор // Кристаллография, 2004, том 49, №3, с. 541-565.
10. П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина, В.Н. Демидов Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии //Заводская лаборатория Диагностика материалов.-1999.-т.65.-№9.-с.27-37

б) дополнительная литература:

1. Н.С. Маслова, В.И. Панов. Сканирующая туннельная микроскопия атомной структуры, электронных свойств и поверхностных химических реакций // Успехи физических наук, 1989.-т.157.- вып.1.- с.185.
2. Г.С. Жданов, М.Н. Либенсон, С.А. Марциновский. Оптика за дифракционным пределом: принципы, результаты, проблемы // Успехи физических наук, 1998.-№7.- с.801.
3. В.С. Эдельман. Сканирующая туннельная микроскопия (обзор) // Приборы и техника эксперимента, 1989.-№5.- с.25.
4. C. Bai. Scanning Tunneling Microscopy and its Application. 2nd rev. ed, Springer-Verlag. 2000.
5. T. Sakurai. Advances in scanning probe microscopy. Springer-Verlag, 2000.
6. N.J. DiNardo. Nanoscale Characterization of Surfaces and Interfaces. Wiley, 1994.

7. M.A. Paesler, P.J. Moyer. Near-Field Optics: Theory, Instrumentation and Applications. Wiley, 1996.
8. J.A. Kubby, J.J. Boland. Scanning Tunneling Microscopy of Semiconductor Surfaces // Surface Science Reports, 26, 61 (1996).
9. B. Cappella, G. Dietler. Force-distance curves by atomic force microscopy // Surface Science Reports 34, 1 (1999).
10. J. W.P. Hsu. Near-field scanning optical microscopy studies of electronic and photonic materials and devices // Materials Science and Engineering Reports, 33, 1 (2001).

#### в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Методики СЗМ. (С) NT-MDT, 2001-2016. <http://www.ntmdt.ru/spm-principles>
2. Основы СЗМ. (С) NT-MDT, 2001-2016. <http://www.ntmdt.ru/spm-basics>

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Сканирующая зондовая микроскопия» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и в электронном виде на специализированных ресурсах сети Интернет.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатория Научно-образовательного центра "Физика твердотельных наноструктур" и соответствующее оборудование:

**Лаборатория Сканирующей зондовой микроскопии:** Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator.

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 28.03.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

Автор:

ст. преподаватель

кафедры физики полупроводников

электроники и наноэлектроники

\_\_\_\_Н.О.Кривулин

Рецензент:

заведующий кафедрой

теоретической физики, д.ф.-м.н.

В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников

электроники и наноэлектроники

д.ф.-м.н. профессор

\_\_\_\_\_Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ, протокол б/н от «14» декабря 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ

А.А. Перов