

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 № 6 от 31.05.2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Сканирующая зондовая микроскопия

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника

---

Направленность образовательной программы

Радиофотоника и оптоэлектроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2021 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.08 Сканирующая зондовая микроскопия относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

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

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-4: Способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	<p>ПК-4.1: Знает методики измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения</p> <p>ПК-4.2: Умеет совершенствовать и внедрять новые методы и методики измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники.</p> <p>ПК-4.3: Владеет навыками использования различных методов и методик измерений параметров и свойств наноматериалов и наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники.</p>	<p>ПК-4.1: 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.</p> <p>ПК-4.2: Уметь: выбирать подходящую методику, учитывать особенности методики при исследовании поверхности и свойств твердых тел, проводить исследования методом сканирующей</p>	Допуск к лабораторной работе Отчет по лабораторным работам	Зачёт: Отчет по лабораторным работам

		зондовой микроскопии и правильно интерпретировать и представлять результаты эксперимента.  ПК-4.3: Владеть: основными методиками сканирующей зондовой микроскопии, математическим аппаратом, используемом в методах обработки и анализа экспериментальных данных в СЗМ.		
--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>43</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>зачёт</b>

#### 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	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Введение	4	2		2	2

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)	26	8	8	16	10
Атомно-силовая микроскопия (АСМ)	30	8	12	20	10
Магнитная силовая микроскопия	5	2		2	3
Электросиловая микроскопия	5	2		2	3
Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ)	5	2		2	3
Особенности конструкции СЗМ. Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии	32	8	12	20	12
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	32	65	43

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

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 32 ч.

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

##### **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

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.

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

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

**5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ПК-4**

1. Опишите зависимость силы взаимодействия от расстояния зонд-образец.
2. Назовите основные режимы работы АСМ и их назначение.
3. Объясните основные способы детектирования силы в контактном режиме АСМ.
4. Объясните принцип работы неконтактного АСМ.
5. Для чего используется режим измерения фазового контраста при работе в неконтактном режиме АСМ?
6. Поясните устройство и принцип действия неконтактного силового сенсора прибора NanoEducator.
7. Опишите режим выполнения спектроскопии в приборе NanoEducator.

**Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Даны ответы на все вопросы допуска к лабораторной работе.
не зачтено	Даны ответы не на все вопросы допуска к лабораторной работе.

**5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-4**

1. Что такое прямой и обратный пьезоэффект? Объясните понятие пьезоэлектрического эффекта на примере кварца и принцип действия пьезоэлектрического двигателя.
2. Объясните возможные артефакты, вносимые пьезокерамикой: нелинейность, гистерезис, ползучесть, температурный дрейф. Каковы способы борьбы с ними?
3. Какие виды сканеров Вы знаете? Назовите виды искажений, вносимые сканерами в СЗМ изображение.
4. Перечислите основные виды зондов, используемых в СЗМ, и способы их изготовления.
5. Опишите идеальный СЗМ зонд. Какие искажения способны вызвать зонды при отображении различных поверхностных особенностей?
6. Опишите устройство для изготовления СЗМ зондов для прибора NanoEducator. Расскажите о методе электрохимического травления.

**Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)**

Оценка	Критерии оценивания
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.

**5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации****Шкала оценивания сформированности компетенций**

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			

<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

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

<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации

#### 5.3.1 Типовые задания, выносимые на промежуточную аттестацию:

#### Оценочное средство - Отчет по лабораторным работам

#### Зачёт

#### Критерии оценивания (Отчет по лабораторным работам - Зачёт)

Оценка	Критерии оценивания
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.

#### Типовые задания (Отчет по лабораторным работам - Зачёт) для оценки

**сформированности компетенции ПК-4 (Способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения)**

1. Назовите основные компоненты СТМ и их назначение. Объясните принцип работы СТМ на примере туннельного контакта двух проводников.
2. Поясните устройство и принцип действия туннельного сенсора. Опишите основные параметры, которые вы будете определять в работе.
3. Что такое режим постоянного тока и постоянной высоты? Что такое V- и Z-модуляция? Для чего они применяются?
4. Туннельная спектроскопия. Объясните влияние направления туннелирования электронов на изображение поверхности кремния.
5. Назовите факторы, определяющие качество изображения в СТМ. Какие требования предъявляются к СТМ-зонду?

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

#### Основная литература:

1. Миронов В. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие для студентов



старших курсов вузов / РАН, Ин-т физики микроструктур. - М. : Техносфера, 2005. - 144 с. - (Мир физики и техники ; 2 - 02). - Лит.: с. 140 - 143. - ISBN 5-94836-034-2 : 225.00., 1 экз.

2. Рыков Сергей Александрович. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур : учеб. пособие для студентов вузов / под ред. В. И. Ильина, А. Я. Шика. - СПб. : Наука, 2001. - 52 с. : 29 ил. - (Новые разделы физики полупроводников). - Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки на 1997-2000 г.". - ISBN 5-02-024956-4 : 15.00., 10 экз.

3. Плескова Светлана Николаевна. Атомно-силовая микроскопия в биологических и медицинских исследованиях : [учеб. пособие]. - Долгопрудный : Интеллект, 2011. - 184 с. - ISBN 978-5-91559-108-9 : 220.00., 4 экз.

4. Филимонова Нина Ивановна. Методы исследования микроэлектронных и нанoeлектронных материалов и структур: сканирующая зондовая микроскопия. Часть 1 : Учебное пособие. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 2013. - 134 с. - Профессиональное образование. - ISBN 978-5-7782-2158-1., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=601832&idb=0>.

5. Методы исследования микроэлектронных и нанoeлектронных материалов и структур: сканирующая зондовая микроскопия / Филимонова Н.И., Кольцов Б.Б. - Москва : НГТУ, 2013., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=654559&idb=0>.

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

Не используется

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: 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 ОС ННГУ по направлению 11.03.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Кривулин Николай Олегович, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: .

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.