

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УТВЕРЖДАЮ
Директор по образовательной
деятельности

_____ С.Т. Князев
«___» _____

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА МОДУЛЯ

Код модуля	Модуль
1158568	Основы сканирующей зондовой микроскопии

Екатеринбург

Перечень сведений о рабочей программе модуля	Учетные данные
Образовательная программа 1. Физика	Код ОП 1. 03.03.02/33.01
Направление подготовки 1. Физика	Код направления и уровня подготовки 1. 03.03.02

Программа модуля составлена авторами:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Тебеньков Александр Владимирович	кандидат физико- математических наук, без ученого звания	Доцент	физики конденсированного состояния и наноразмерных систем

Согласовано:

Управление образовательных программ

Е.С. Комарова

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОДУЛЯ Основы сканирующей зондовой микроскопии

1.1. Аннотация содержания модуля

1.2. Структура и объем модуля

Таблица 1

№ п/п	Перечень дисциплин модуля в последовательности их освоения	Объем дисциплин модуля и всего модуля в зачетных единицах
1	Основы сканирующей зондовой микроскопии	3
ИТОГО по модулю:		3

1.3. Последовательность освоения модуля в образовательной программе

Пререквизиты модуля	Не предусмотрены
Постреквизиты и кореквизиты модуля	Не предусмотрены

1.4. Распределение компетенций по дисциплинам модуля, планируемые результаты обучения (индикаторы) по модулю

Таблица 2

Перечень дисциплин модуля	Код и наименование компетенции	Планируемые результаты обучения (индикаторы)
1	2	3
Основы сканирующей зондовой микроскопии	ПК-1 - Способен использовать знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач в области физики магнитных явлений, медицинской и теоретической физики, физики конденсированного состояния	З-1 - Знать основные методы теоретических и экспериментальных физических исследований У-1 - Самостоятельно формулировать задачу в рамках рассматриваемой проблемы П-1 - Предлагать использование методов теоретических и экспериментальных физических исследований при решении поставленных задач

1.5. Форма обучения

Обучение по дисциплинам модуля может осуществляться в очной формах.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
Основы сканирующей зондовой
микроскопии

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Должность	Подразделение
1	Пелегов Дмитрий Вячеславович	кандидат физико-математических наук, без ученого звания	Доцент	физики конденсированного состояния и наноразмерных систем
2	Тебеньков Александр Владимирович	кандидат физико-математических наук, без ученого звания	Доцент	физики конденсированного состояния и наноразмерных систем

Рекомендовано учебно-методическим советом института Естественных наук и математики

Протокол № 1 от 18.01.2021 г.

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Авторы:

- Пелегов Дмитрий Вячеславович, Доцент, физики конденсированного состояния и наноразмерных систем
- Тебеньков Александр Владимирович, Старший преподаватель, физики конденсированного состояния и наноразмерных систем

1.1. Технологии реализации, используемые при изучении дисциплины модуля

- Традиционная (репродуктивная) технология
- Разноуровневое (дифференцированное) обучение
 - Базовый уровень

**Базовый I уровень – сохраняет логику самой науки и позволяет получить упрощенное, но верное и полное представление о предмете дисциплины, требует знание системы понятий, умение решать проблемные ситуации. Освоение данного уровня результатов обучения должно обеспечить формирование запланированных компетенций и позволит обучающемуся на минимальном уровне самостоятельности и ответственности выполнять задания;*

Продвинутый II уровень – углубляет и обогащает базовый уровень как по содержанию, так и по глубине проработки материала дисциплины. Это происходит за счет включения дополнительной информации. Данный уровень требует умения решать проблемы в рамках курса и смежных курсов посредством самостоятельной постановки цели и выбора программы действий. Освоение данного уровня результатов обучения позволит обучающемуся повысить уровень самостоятельности и ответственности до творческого применения знаний и умений.

1.2. Содержание дисциплины

Таблица 1.1

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины*	Содержание
P1	Введение	Краткий обзор содержания курса. Введение и терминология. Основные этапы развития нанотехнологий. Особенности поведения объектов наномира. Подходы «сверху-вниз» и «снизу-вверх» к получению наноматериалов. Примеры наноматериалов и наноустройств. Примеры нанотехнологических процессов: нанопечатная литография, литографически индуцированная самосборка. Обзор основных методов.
P2	Электронная микроскопия	Введение в электронную микроскопию. Идея электронного микроскопа. История создания. Особенности электронных микроскопов. Методы получения изображения. Элементы электронного микроскопа и их основные параметры. Длина волны электронов и ее зависимость от ускоряющего напряжения. Классификация электронных микроскопов. Механизмы контраста в электронном микроскопе. Взаимодействие электронов с веществом. Вторичные эффекты. Аналитическая электронная микроскопия – варианты детекторов. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Получение пучка электронов. Держатель образца. Основные режимы работы ПЭМ. Амплитудный контраст. Дифракция электронов

		<p>в ПЭМ. Особенности дифракционных измерений в ПЭМ. ПЭМ высокого разрешения, фазовый контраст. Высоковольтный ПЭМ. Сканирующий ПЭМ.</p> <p>Сканирующий (растровый) электронный микроскоп (РЭМ) Сигналы в РЭМ. Электроны. Топографический контраст. Другие методы контраста. Химический и структурный анализ с помощью РЭМ, микроанализ. Сопутствующие методики: сфокусированный электронный пучок, ионный и электронный полевые проекционные микроскопы. Низковакуумные РЭМ, РЭМ работающие в режиме естественной среды. Применения в биологии.</p> <p>Разрешение ПЭМ и РЭМ. Подготовка образцов. Основные производители электронных микроскопов.</p>
Р3	Сканирующие элементы зондовых микроскопов	<p>Типы сканеров, применяемых в СЗМ, основные свойства пьезокерамических материалов, лежащие в основе их изготовления. Устройство триподных, трубчатых, биморфных и гибридных сканеров.</p> <p>Устройства для грубого подвода и перемещения зонда относительно исследуемой поверхности: редукторы перемещений, шаговые электро- и пьезодвигатели.</p> <p>Защита СЗМ от механических вибраций. Пассивные и активные виброизолирующие системы. Защита от акустических шумов. Стабилизация термодрейфа положения зонда над поверхностью.</p>
Р4	Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия	<p>Физические основы работы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Функция состояния системы, уравнение Шредингера. Туннельный эффект. Туннельный эффект в квазиклассическом приближении. Зонная структура металлов, энергетическое распределение электронов в металле. Туннельный ток в системах металл-диэлектрик-металл и металл-диэлектрик-полупроводник.</p> <p>Устройство и принцип работы СТМ: туннельный сенсор, требования и методы изготовления туннельных зондов, режимы постоянного тока и постоянной высоты. Ограничения СТМ. Реализация атомарного разрешения в сканирующем туннельном микроскопе.</p> <p>"Наблюдаемые" физические величины в СТМ. Измерение характеристики ток-расстояние и локальной работы выхода. СТМ спектроскопия: измерение вольт-амперных характеристик туннельного контакта и распределения плотности электронных состояний.</p> <p>Примеры использования СТМ для исследования наноматериалов.</p>
Р5	Атомно-силовая микроскопия	<p>Основные типы кантилеверов – зондовых датчиков, используемых в атомно-силовой микроскопии (АСМ). Технология изготовления кантилеверов. Потенциал взаимодействия зонда с образцом, зависимость силы взаимодействия от расстояния между зондом и образцом.</p>

		<p>Режимы работы АСМ: контактная АСМ, бесконтактная и полуконтактная АСМ.</p> <p>Особенности силового взаимодействия кантилеверов с поверхностью: упругие взаимодействия (задача Герца), капиллярные силы, сила Ван-дер-Ваальса, адгезионные силы, электростатическое и магнитное взаимодействие. Закон Гука и отклонения кантилевера под действием вертикальной (нормальной), продольной и поперечной сил. Тензор обратной жесткости кантилевера. Эффективная масса и собственная частота механических колебаний кантилевера.</p> <p>Устройство и принцип работы СЗМ в контактном режиме АСМ, оптический силовой сенсор. Режимы постоянной высоты и постоянной силы, назначение и принципы работы обратной связи. Предельное разрешение в контактном режиме. Недостатки контактной АСМ.</p> <p>Исследование механических свойств материалов с помощью контактной АСМ. Микроскопия сил трения: регистрация латеральных силы взаимодействия зонда и образца, вклады топографии и неоднородности коэффициента трения. Качественная интерпретация результатов микроскопии сил трения.</p> <p>Модуляционные методики на базе контактной АСМ. Микроскопия модуляции силы и атомно-силовая акустическая микроскопия: измерение пространственного распределения микротвердости, упругих констант, адгезионных свойств.</p> <p>Теория колебаний кантилевера: свободные и вынужденные, линейные и нелинейные колебания кантилевера, моды колебаний. Зависимость амплитуды и фазы вынужденных колебаний кантилевера от расстояния между зондом и образцом. Бесконтактный режим колебаний кантилевера. Полуконтактный режим колебаний кантилевера.</p> <p>Устройство и принцип работы СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах АСМ. Методы введения обратной связи для контроля расстояния между зондом и образцом. Метод отображения фазы. Преимущества бесконтактной и полуконтактной АСМ. Стратегия выбора оптимальных параметров колебаний кантилевера и режима сканирования при исследовании различного типа объектов.</p> <p>Примеры использования бесконтактной и полуконтактной АСМ для исследования наноматериалов.</p>
Р6	Артефакты в сканирующей зондовой микроскопии	<p>Параметры, влияющие на качество и пространственное разрешение изображений, получаемых с помощью СЗМ. Источники искажений и артефактов в СЗМ измерениях.</p> <p>Искажения, обусловленные несовершенством сканирующих элементов СЗМ: нелинейность, крип, гистерезис пьезокерамики. Программные и аппаратные методы компенсации недостатков сканирующих элементов, устройство сканеров с линеаризующими элементами.</p> <p>Влияние формы зондов на качество СЗМ изображений, эффект конволюции. Методы диагностики наличия искажений,</p>

		<p>обусловленных несовершенной формой зонда, методы определения формы зонда и деконволюции результатов измерений.</p>
P7	<p>Магнитная силовая микроскопия</p>	<p>Исследование магнитных свойств материалов методом магнитной силовой микроскопии (МСМ): принцип работы СЗМ в режиме МСМ, требования к зондовым датчикам, особенности взаимодействия зонда с магнитным полем образца, проблема топографических артефактов и качество получаемых изображений. Возможные варианты реализации двухпроходных магнитных методик. Квазистатические методики МСМ. Колебательные методики МСМ.</p> <p>Примеры исследования магнитных наночастиц методом МСМ.</p>
P8	<p>Электрические методики сканирующего зондового микроскопа</p>	<p>Исследование электрических свойств материалов с помощью СЗМ. Зондовые датчики для электрических методик измерения. Электромеханическое взаимодействие между кантилевером и образцом в контактном режиме. Сканирующая микроскопия сопротивления растекания. Контактная сканирующая емкостная микроскопия. Силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика. Сканирующая микроскопия нелинейной диэлектрической проницаемости. Факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в контактных электрических методиках СЗМ.</p> <p>Примеры СЗМ исследований кинетики нанодоменов в сегнетоэлектриках.</p> <p>Реализация электрических двухпроходных методик СЗМ в бесконтактном и полуконтактном режимах. Особенности вынужденных колебаний кантилевера при электростатическом взаимодействии зонда с поверхностью при приложении постоянного и переменного электрического напряжения между зондом и образцом. Электрическая силовая микроскопия. Микроскопия поверхностного потенциала (метод зонда Кельвина). Сканирующая емкостная микроскопия. Особенности подбора параметров измерения на первом и втором проходах сканирования в различных методиках. Факторы, определяющие пространственное разрешение, достижимое в двухпроходных электрических методиках СЗМ.</p>
P9	<p>Оптические методики сканирующей зондовой микроскопии</p>	<p>Преимущества методов оптической микроскопии при исследовании материалов. Дифракционный предел пространственного разрешения классической оптической микроскопии. Идея конфокальной оптической микроскопии, повышение пространственного разрешения. Устройство и принцип работы сканирующего лазерного конфокального микроскопа, трехмерное сканирование, горизонтальное и вертикальное разрешение методики в сравнении с классической оптической микроскопией. Сканирующая лазерная конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния: физические основы, техническая реализация и аналитические возможности.</p> <p>Области ближнего и дальнего поля при прохождении света через субволновую диафрагму, преодоление оптического дифракционного предела, идея сканирующего ближнепольного</p>

		оптического микроскопа. Устройство, принцип действия, типы используемых зондов и основные режимы работы сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. Методика регистрации резонанса поперечных сил для контроля расстояния между зондом и поверхностью, реализация системы обратной связи и регистрации топографии поверхности. Безапертурная сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия. Эффект гигантского усиления сигнала комбинационного рассеяния вблизи острия проводящего зонда.
P10	Сканирующая зондовая литография	Физические основы зондовой литографии в различных режимах СЗМ: СТМ литография, АСМ силовая литография, анодно-окислительная литография, локальное переключение поляризации в сегнетоэлектриках, литография с помощью зонда сканирующего ближнепольного оптического микроскопа, наноманипуляции отдельными атомами и молекулами. Векторная и растровая зондовая литографии. Примеры нанолитографии в различных средах с использованием СЗМ.
P11	Обработка и количественный анализ СЗМ изображений	Основные типы данных, получаемых при СЗМ измерениях: спектроскопические кривые, изображения, многослойные изображения, параметрические изображения. Варианты визуализации СЗМ изображений: двухмерное и трехмерное представление, проведение сечений. Методы коррекции изображений на примере обработки результатов измерения топографии поверхности. Вычитание систематических составляющих: постоянная компонента (общее смещение), постоянный наклон, поверхности высших порядков, соответствующие неидеальной траектории движения сканера. Методы фильтрации СЗМ изображений. Количественный анализ СЗМ изображений. Использование преобразования Фурье и функции автокорреляции для определения геометрических характеристик периодических и квазирегулярных структур. Проведение статистического анализа СЗМ изображений: определение шероховатости, статистика зерен, фрактальный анализ.

1.3. Направление, виды воспитательной деятельности и используемые технологии

Таблица 1.2

Направление воспитательной деятельности	Вид воспитательной деятельности	Технология воспитательной деятельности	Компетенция	Результаты обучения
Профессиональное воспитание	профориентационная деятельность	Технология самостоятельной работы	ПК-1 - Способен использовать знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для	У-1 - Самостоятельно формулировать задачу в рамках рассматриваемой проблемы

			решения профессиональных задач в области физики магнитных явлений, медицинской и теоретической физики, физики конденсированного состояния	
--	--	--	---	--

1.4. Программа дисциплины реализуется на государственном языке Российской Федерации .

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основы сканирующей зондовой микроскопии

Электронные ресурсы (издания)

1. Филимонова, Н. И.; Методы исследования микроэлектронных и наноэлектронных материалов и структур: сканирующая зондовая микроскопия : учебное пособие. I. ; Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск; 2013; <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228943> (Электронное издание)
2. Неволин, В. К.; Зондовые нанотехнологии в электронике : монография.; Техносфера, Москва; 2014; <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=260697> (Электронное издание)
3. Филимонова, Н. И.; Методы исследования микроэлектронных и наноэлектронных материалов и структур: сканирующая зондовая микроскопия : учебное пособие. I. ; Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск; 2013; <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228943> (Электронное издание)

Печатные издания

1. Рыков, С. А., Ильин, В. И., Шик, А. Я.; Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур : Учеб. пособие для вузов.; Наука, Санкт-Петербург; 2001 (12 экз.)
2. Головин, Ю. И.; Введение в нанотехнику; Машиностроение, Москва; 2007 (20 экз.)
3. Кобаяси, Н., Патрикеев, Л. Н., Хачоян, А. В.; Введение в нанотехнологию; БИНОМ. Лаборатория знаний, Москва; 2008 (20 экз.)
4. Миронов, В. Л.; Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие для студентов старших курсов вузов.; Техносфера, Москва; 2005 (3 экз.)
5. Неволин, В. К.; Зондовые нанотехнологии в электронике; Техносфера, Москва; 2005 (5 экз.)

Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы

1. Электронная научная библиотека <https://elibrary.ru>
2. Университетская библиотека онлайн: <http://biblioclub.ru>
3. Зональная научная библиотека УрФУ. URL: <http://lib.urfu.ru>

Материалы для лиц с ОВЗ

Весь контент ЭБС представлен в виде файлов специального формата для воспроизведения синтезатором речи, а также в тестовом виде, пригодном для прочтения с использованием экранной лупы и настройкой контрастности.

Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

1. Интернет-сайт компании «НТ-МДТ»: <http://www.ntmdt.ru>
2. Интернет-сайт «Нанометр»: <http://www.nanometer.ru>
3. Интернет-сайт «Центра перспективных технологий»: <http://www.nanoscopy.net>
4. Интернет-сайт учебно-научного центра «Бионаноскопия»: <http://www.nanoscopy.org>

3. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основы сканирующей зондовой микроскопии

Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием и программным обеспечением

Таблица 3.1

№ п/п	Виды занятий	Оснащённость специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения
1	Лекции	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов Рабочее место преподавателя Доска аудиторная Периферийное устройство Подключение к сети Интернет	Office Professional 2003 Win32 Russian CD-ROM Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES
2	Практические занятия	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов Рабочее место преподавателя Персональные компьютеры по количеству обучающихся Оборудование, соответствующее требованиям организации учебного процесса в соответствии с санитарными правилами и нормами	Office Professional 2003 Win32 Russian CD-ROM Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES

		Подключение к сети Интернет	
3	Консультации	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов Рабочее место преподавателя Подключение к сети Интернет	Office Professional 2003 Win32 Russian CD-ROM Office 365 EDUA5 ShrdSvr ALNG SubsVL MVL PerUsr B Faculty EES
4	Текущий контроль и промежуточная аттестация	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов	Не требуется
5	Самостоятельная работа студентов	Мебель аудиторная с количеством рабочих мест в соответствии с количеством студентов	Не требуется