

Программа утверждена на заседании
Ученого совета Факультета наук о материалах
МГУ имени М.В.Ломоносова
Протокол № 173 от 25 сентября 2014 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

1. Наименование дисциплины (модуля): Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения
2. Уровень высшего образования – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре.
3. Направление подготовки: 04.06.01 Химические науки.
4. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП: вариативная часть ООП, блок 1 «Дисциплины (модули)». Дисциплина по выбору аспиранта.
5. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-2: способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки	31 (УК-2) Знать методологию научно-исследовательской деятельности
ОПК-1: способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-	У1 (ОПК-1) Уметь выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования

коммуникационных технологий	
ПК-4: способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 02.00.04 Физическая химия	31 (ПК-4) Знать современное состояние науки в области физической химии
ПК-16: способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности (научной специальности) 02.00.21 Химия твердого тела	31 (ПК-16) Знать современное состояние науки в области химии твердого тела

6. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (34 часа занятия лекционного типа, 2 часа мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 72 часа составляет самостоятельная работа учащегося

7. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

В специалитете или магистратуре должны быть освоены общие курсы «Математический анализ», «Обыкновенные дифференциальные уравнения», «Механика деформируемого твердого тела», «Введение в физику твердого тела», «Электромагнетизм и оптика», «Квантовая физика», «Общая химия и химия элементов», «Электрохимия», а также спецкурс, в котором излагались основы физики низкоразмерных структур.

8. Формат обучения.

очная форма обучения, лекционные занятия.

9. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам.

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов.п..	Всего
Раздел 1. Обзор методов зондовой микроскопии. История развития зондовой микроскопии. Принципы работы атомно-силового (АСМ) и сканирующего туннельного микроскопов (СТМ). Возможности и ограничения метода. Виды кантилеверов и зондов. Атомно-гладкие подложки. Наиболее яркие примеры применения зондовой микроскопии: сканирование поверхности кристаллов с атомным разрешением, визуализация отдельных молекул, изучение гетерогенного катализа на атомном уровне, манипуляция атомами на	6	2					2	4	0	4

поверхности, управление химическими реакциями, нанолитография, исследование в реальном времени фазовых переходов в полимерах и биологических процессов в нативной среде.										
Раздел 2. Инструментарий зондовой микроскопии. Принцип работы пьезоэлектрических актюаторов. Продольный, поперечный и сдвиговый пьезоэффект. Пьезокерамические трубки: константы пьезоэффекта и резонансные частоты. Нелинейность отклика, гистерезис и крип. Современные механизмы перемещения на основе пьезоэлектрических актюаторов: инерционные слайдеры, слайдер Пана, привод «Коала». Электроника для зондовой микроскопии: фильтры, усилители тока и напряжения, АЦП и ЦАП, контроллер обратной связи на основе операционного усилителя. Пропорциональные и интегральные контроллеры. Синхронный усилитель и принципы детектирования сильно зашумленного сигнала.	6	2					2	4		4

Раздел 3. Атомно-силовая микроскопия. Кантилеверы и кварцевые вилки для атомно-силовой микроскопии. Технология их изготовления. Константы упругости и резонансные частоты. Вычисление их методами теории упругости. Экспериментальная методика калибровки кантилеверов: метод Садера, метод тепловых колебаний. Различные способы определения величины отклонения кантилевера: оптический, интерферометрический, пьезоэлектрический. Реализация оптического метода. Четырехсекционный фотоэлемент. Вычисление чувствительности и предела измерений оптического метода. Атомно-силовая микроскопия: контактный метод, фрикционно-силовая микроскопия, квази-атомное разрешение. Капиллярные силы. Проведение измерений в различных средах.	6	2					2	4		4
Раздел 4. Обработка изображений. Представление данных. Палитры. Роль наклона образца. Вычитание плоскости и поверхности второго порядка. Фильтры, маски. Медианное усреднение. Фурье-фильтрация. Анализ данных.	6	2					2	4		4

Среднеквадратичная шероховатость поверхности. Артефакты в зондовой микроскопии. Эффекты, обусловленные кривизной острия кантилевера и наличием нескольких острий. Пространственное разрешение. Артефакты, связанные с нелинейностью и крипом пьезоэлектрических актюаторов. Шумы и настройки обратной связи.										
Раздел 5. Динамические режимы атомно-силовой микроскопии: амплитудная модуляция. Силы, действующие между кантилевером и образцом. Прыжок в контакт. Линейный режим колебаний. Виброизоляция. Связь сдвига резонансной частоты и вертикального градиента силового профиля. Принцип атомно-силовой микроскопии с амплитудной модуляцией и его экспериментальная реализация. Ограничение временного окна измерений величиной добротности. Эффекты диссипации. Зависимость фазы колебаний от вертикального градиента силового профиля и затухания. Немонотонность зависимости сдвига резонансной частоты от расстояния до образца как причина нестабильности работы	6	2					2	4		4

обратной связи.										
Раздел 6. Динамические режимы атомно-силовой микроскопии: тэппинг. Атомно-силовая микроскопия с большой амплитудой колебаний. Сильная нелинейность силового профиля вблизи поверхности образца. Резонансные кривые и фазовые портреты ангармонического осциллятора. Амплитудная неустойчивость, бистабильность и переключения. Выбор рабочей точки на силовом профиле по фазовому сдвигу. Определение энергии диссипативного взаимодействия между зондом и образцом по сдвигу фазы. Достоинства тэппинга: нечувствительность к капиллярным силам, возможность получения топографии с высоким разрешением на воздухе, отсутствие латеральных сил трения, повреждающих образец. Примеры.	6	2					2	4		4
Раздел 7. Силовая микроскопия. Принцип измерения силового профиля по отклонению кантилевера: квазистатический режим работы. Гистерезис силового профиля при подводе и отводе кантилевера. Измерение силы	6	2					2	4		4

адгезии, глубины проникновения и диссипированной энергии. Механические модели контакта для определения модуля Юнга. Метод максимальной силы. Картирование механических свойств поверхности. Силовая спектроскопия. Эффект подложки при определении механических свойств образца.										
Раздел 8. Динамические режимы атомно-силовой микроскопии: фазовая модуляция. Принцип работы АСМ с фазовой модуляцией: самовозбуждение кантилевера на резонансной частоте. Связь сдвига резонансной частоты и вертикального силового профиля. Реконструкция силового профиля по частотному сдвигу. Устройство АСМ с фазовой модуляцией. Метод фазовой автоподстройки частоты и его использование для сканирования поверхности. Контроль амплитуды и диссипация. Немонотонность зависимости частотного сдвига от расстояния до поверхности и связанные с этим неустойчивости. Достоинства метода: слабая зависимость временного окна измерений от добротности, возможность работы в вакууме. Сравнение различных режимов	6	2					2	4		4

работы АСМ.										
Раздел 9. Кельвиновская микроскопия и элементы электронной теории металлов. Внешняя и термодинамическая работа выхода металла, уровень Ферми. Вклад поверхности в работу выхода: силы изображения, дипольный слой и заряд поверхности. Контактная разность потенциалов. Измерение работы выхода методом Кельвина. Двухпроходные методики сканирования поверхности. Кельвиновская силовая микроскопия. Поверхностные состояния Тамма и Шокли. Одномерная модель. Трехмерный кристалл: спектр поверхностных состояний и резонансов.	6	2					2	4		4
Раздел 10. Электросиловая и сканирующая резистивная микроскопия. Методы измерения поверхностной электрической проводимости: двухточечный и четырехточечный. Электрические характеристики поверхности: удельные сопротивление и проводимость, сопротивления растекания. Расчет электрического сопротивления	6	2					2	4		4

контакта зонд-поверхность. Сканирующая резистивная микроскопия и ее разновидности. Многомерная спектроскопия поверхности: синхронное измерение F(z, U) и I(z, U). 2x2D измерения и 4D представления. Процесс образования контакта в сканирующей резистивной микроскопии. Измерение вольт-амперных характеристик поверхности. Особенности проводящих свойств поверхностей материалов. Проводимость поверхности кристаллов, влияние дефектов.										
Раздел 11. Сканирующая туннельная микроскопия. Квантовомеханическая теория туннелирования: одночастичное уравнение Шредингера, коэффициенты прохождения, их асимптотика, ВКБ приближение. Плотность состояний, ток. Золотое правило Ферми. Модель Бардина. Потенциальный профиль контакта зонд-образец, вычисление матричных элементов перехода, коэффициента прохождения и вольт-амперной характеристики (ВАХ) в модели плоского интерфейса. Модель Терсоффа-Хаманна. Режимы	6	2					2	4		4

постоянного тока и постоянной высоты. Атомное разрешение. СТМ изображения GaAs. Инверсия контраста.										
Раздел 12. Сканирующая туннельная спектроскопия. Связь дифференциальной проводимости с плотностью состояний в образце. Фоновый вклад от окна туннелирования. Принцип измерения дифференциальной проводимости dI/dV и d^2I/dV^2 при помощи синхронного усилителя. Роль нормализации дифференциальной проводимости. Определение плотности состояний по ВАХ. Асимметрия туннельного спектра. Разрешение по энергии в сканирующей туннельной спектроскопии, температурное уширение. Спектроскопическое определение высоты туннельного барьера. Осцилляции надбарьерного отражения в дифференциальной проводимости. Неупругое туннелирование. Определение спектра возбуждений по пикам во второй производной d^2I/dV^2 ВАХ. Колебательная туннельная спектроскопия CO, фуллеренов, C₂H₂, C₂D₂, C₂HD. Изотопический сдвиг в колебательном спектре.	6	2					2	4		4

Спектроскопия поверхностных состояний.										
Раздел 13. Сканирующая туннельная микроскопия твердого тела. СТМ изображения полупроводников: поверхность кремния Si(111)-(7x7), GaN. Реконструкция поверхности, адатомы и области дефекта упаковки. Нанокластеры металлов на поверхности полупроводников. Поверхности металлов, адсорбция на металлических поверхностях. Поверхности диэлектриков. Квантовые точки, нанотрубки и квантовые провода. Динамические процессы на поверхности и вблизи нее: поверхностная диффузия, движение дислокаций и точечных дефектов. Измерение локальной работы выхода с помощью СТМ. СТМ графита, графена и углеродных материалов. Ступени, дислокации.	6	2					2	4		4
Раздел 14. Сканирующая тепловая и термоэлектрическая микроскопия. Кантилеверные сенсоры. Сканирующая тепловая микроскопия. Терморезистивные зонды. Пространственное разрешение. Локальный термический анализ. Измерение поверхностной теплопроводности. Изучение	6	2					2	4		4

процессов стеклования, плавления, кристаллизации и других фазовых переходов. Микромеханические сенсоры. Статический режим. Резонансный режим. Реализация датчика температуры и химического сенсора на основе массивов кантилеверов.										
Раздел 15. Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля. Принцип работы сканирующей оптической микроскопии ближнего поля. Устройство ближнепольного оптического микроскопа. Зонды на основе оптического волокна. Флуоресцентная микроскопия. Рамановская микроскопия. Исследование поверхностных плазмонов в наноструктурах. Изучение фотонных кристаллов. Инфракрасная спектроскопия. Спектроскопия локального усиления рамановского рассеяния (TERS).	6	2					2	4		4
Раздел 16. Ион-проводящая, электрохимическая и магнитно-силовая микроскопия. Исследование локальных электрохимических свойств. Сканирующая ион-проводящая микроскопия. Совмещение АСМ с другими видами микроскопии:	6	2					2	4		4

флуоресцентной и конфокальной микроскопией, электронной микроскопией. Магнитно-силовая микроскопия. Магнитные зонды. Исследование магнитных запоминающих устройств.										
Раздел 17. Манипуляция нанообъектами. Нанолитография. Применение зондовой микроскопии в soft matter и биологии. Использование зонда СТМ для манипуляции атомами и молекулами на поверхности кристаллов. Латеральное позиционирование и вертикальный перенос. Формирование квантовых точек на поверхности. Конфайнмент электронов в квантовых корнях. Фриделевские осцилляции. Визуализация электронных волновых функций. Манипуляция электронами в квантовых проводах. Управление спином в квантовых точках при помощи СТМ. Нанолитография. Механическая литография. Локальное анодное окисление. Электростатическая нанолитография. Термомеханическая литография. Литография погружным пером. Исследование самособирающихся	10	2					2	8		8

слоев, пленок Ленгмюра-Блоджетт, коллоидных частиц, микрокапсул, многослойных частиц и покрытий. Исследование супергидрофобных поверхностей, широко разветвленных поверхностей. Исследование биологических объектов. Наблюдение биомакромолекул. Изучение специфического связывания между биомолекулами. Разворачивание биомакромолекул. Исследование упругих свойств клеток. Фосфолипидные двойные слои и модели клеточных мембран.										
Промежуточная аттестация <u>зачет</u>	2					2	2			
Итого	108	34				2	36	72		72

10. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы аспирантов по дисциплине (модулю):

Конспекты лекций, списки задач к лекциям, основная и дополнительная учебная литература.

11. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю).

- Перечень компетенций: *УК-2, ОПК-1, ПК-4, ПК-16.*
- Описание шкал оценивания: *зачет*
- Вопросы к зачету

1. Для каких задач используются режимы постоянного тока и постоянной высоты в СТМ?
2. Как форма острия влияет на пространственное разрешение в АСМ?
3. Как готовятся зонды для СТМ? Почему с помощью иглы, полученной при механическом разрыве Pt-Ir проволоки, удастся достигнуть атомного разрешения?

4. Можно ли исследовать диэлектрические образцы с помощью СТМ? Приведите примеры.
5. Какими методами СЗМ можно визуализировать углеродные нанотрубки внутри пленки из полиэтилена?
6. Что такое дефекты упаковки в кристаллах? Какими методами СЗМ их можно обнаружить?
7. Как отличить реальный периодический рельеф от наводки с постоянной частотой?
8. Как подготовить образцы ДНК для исследования с помощью АСМ?
9. Какие подложки используют для наблюдения наночастиц с помощью АСМ? Какая пробоподготовка при этом требуется?
10. Какие преимущества имеют методы СЗМ перед другими методами микроскопии?

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Уровень знаний аспиранта оценивается на «зачтено», «незачтено». Оценка «зачтено» выставляется, если по шкале оценивания учащийся демонстрирует знания и умения, соответствующие категориям 3, 4 и 5.

- Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)	КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю) и ШКАЛА оценивания					ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ*
	1	2	3	4	5	
31 (УК-2)	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о методах научно-исследовательской деятельности	Неполные представления о методах научно-исследовательской деятельности	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о методах научно-исследовательской деятельности	Сформированные систематические представления о методах научно-исследовательской деятельности	Зачет в форме индивидуального собеседования
У1 (ОПК-1)	Отсутствие умений	Фрагментарное использование умения выбирать и использовать экспериментальные и расчетно-теоретические методы для	В целом успешное, но не систематическое умение выбирать и использовать экспериментальные и расчетно-теоретические методы для решения	В целом успешное, но содержащие отдельные пробелы умение выбирать и использовать экспериментальные и расчетно-теоретические методы для решения научной задачи	Сформированное умение выбирать и использовать экспериментальные и расчетно-теоретические методы для решения научной задачи	Зачет в форме индивидуального собеседования

		решения научной задачи	научной задачи			
31 (ПК-4)	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современном состоянии науки в области физической химии	Неполные представления о современном состоянии науки в области физической химии	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о современном состоянии науки в области физической химии	Сформированные систематические представления о современном состоянии науки в области физической химии	Зачет в форме индивидуального собеседования
31 (ПК-16)	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современном состоянии науки в области химии твердого тела	Неполные представления о современном состоянии науки в области химии твердого тела	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о современном состоянии науки в области химии твердого тела	Сформированные систематические представления о современном состоянии науки в области химии твердого тела	Зачет в форме индивидуального собеседования

12. Ресурсное обеспечение:

Перечень основной учебной литературы:

1. B. Voigtländer. Scanning Probe Microscopy. Springer, 2015.
2. Справочник по микроскопии для нанотехнологии. Под ред. Нан Яо, Чжун Лин Ван. – М.: Научный мир, 2011, 712 с.
3. Миронов В.Л Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004
4. V. V. Tsukruk and S. Singamaneni. Scanning Probe Microscopy of Soft Matter: Fundamentals and Practices. Willey-VCH, 2012.
5. Г. Бинниг, Г. Рорер. «Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности», УФН 154 261–278 (1988)

Перечень дополнительной учебной литературы:

1. P. Eaton, P. West. Atomic force microscopy, Oxford University Press, 2010. ISBN: 978-0199570454.
2. Большакова А.В., Киселева О.И., Никонорова Н.И., Яминский И.В. Сканирующая зондовая микроскопия блоксополимеров/. Учебное пособие, описание задачи лабораторного практикума — М.: Центр перспективных технологий, 2011, 25 с.
3. Dror Sarid. Exploring Scanning Probe Microscopy with MATHEMATICA. 2007
4. Sergei N. Magonov, Myung-Hwan Whangbo. Surface Analysis with STM and AFM. 1996

13. Язык преподавания: русский.

14. Преподаватели:

Синицына Ольга Валентиновна, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатория физической химии полимеров ИНЭОС РАН, sinitsyna@gmail.com, (499) 135-65-02;

Мешков Георгий Борисович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ, meshkov@polly.phys.msu.ru, (495) 939-10-09;

Гиндикин Яков Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории теоретических проблем микроэлектроники ФИРЭ РАН, gindikina@gmail.com, (496) 565-26-80.