

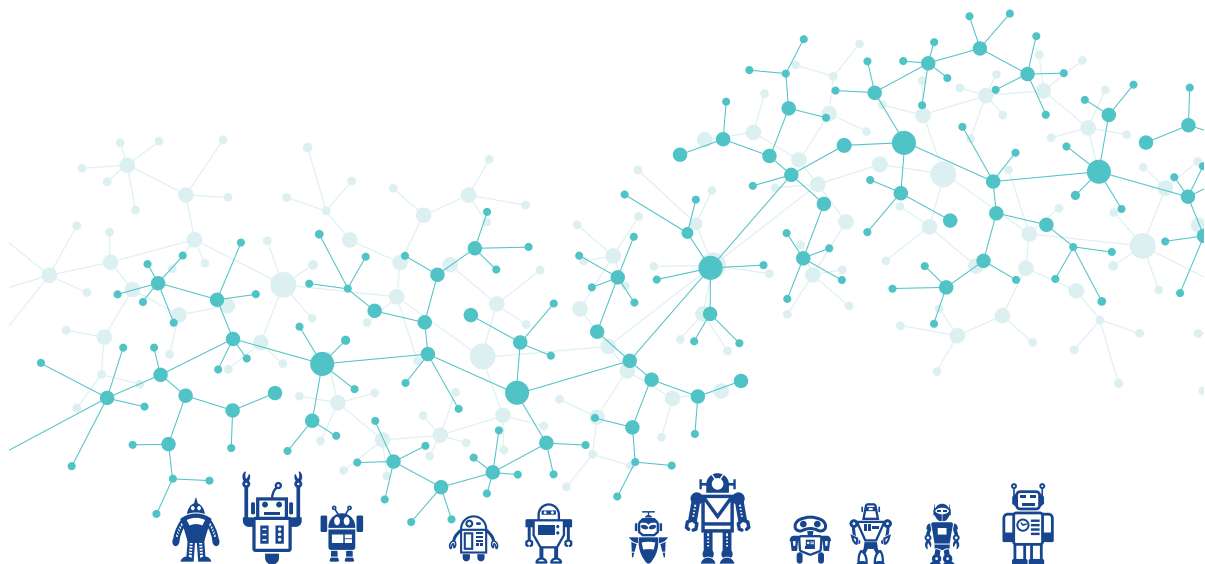
НАНО

КВАНТУМ

ТУЛКИТ



КВАНТОРИУМ





НАНО

КВАНТУМ

ТУНКИТ

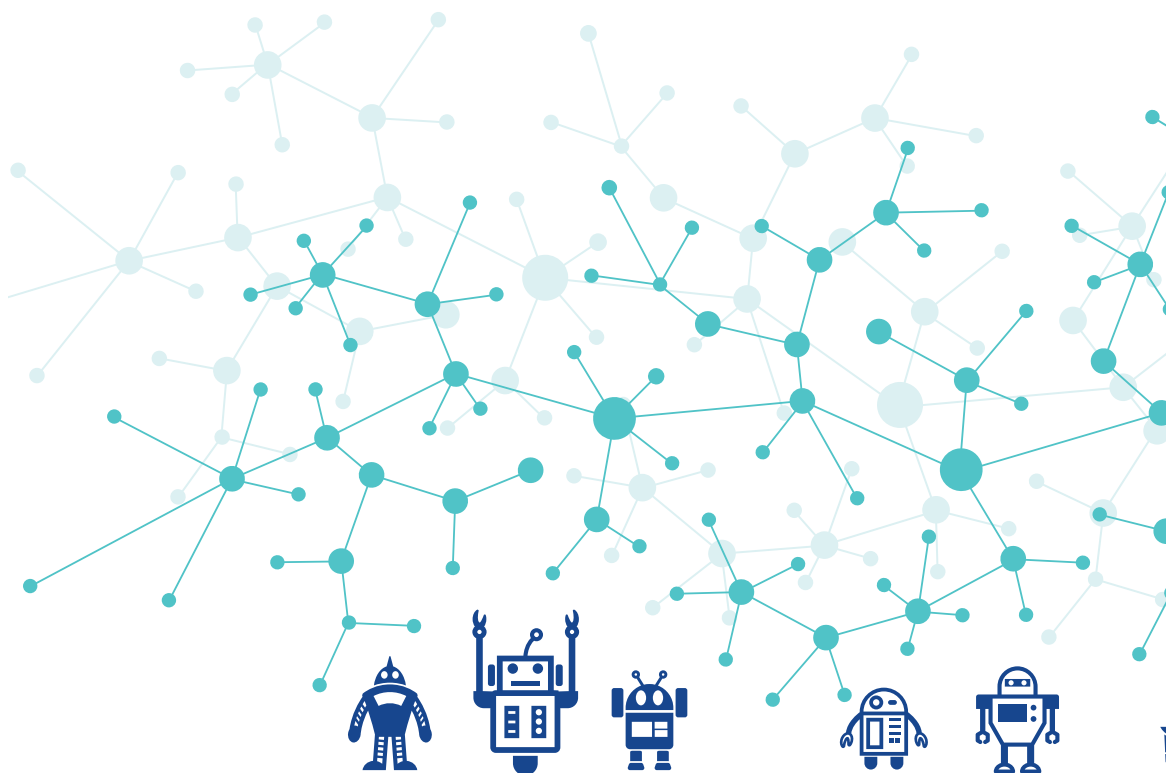


**Фонд новых форм
развития образования**
PLUS ULTRA | ДАЛЬШЕ ПРЕДЕЛА



КВАНТОРИУМ

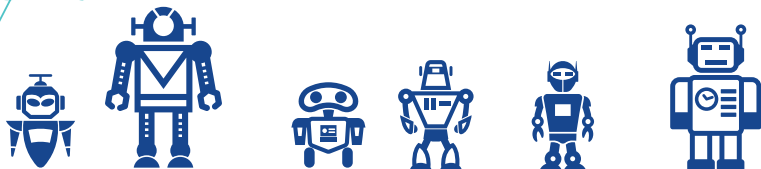
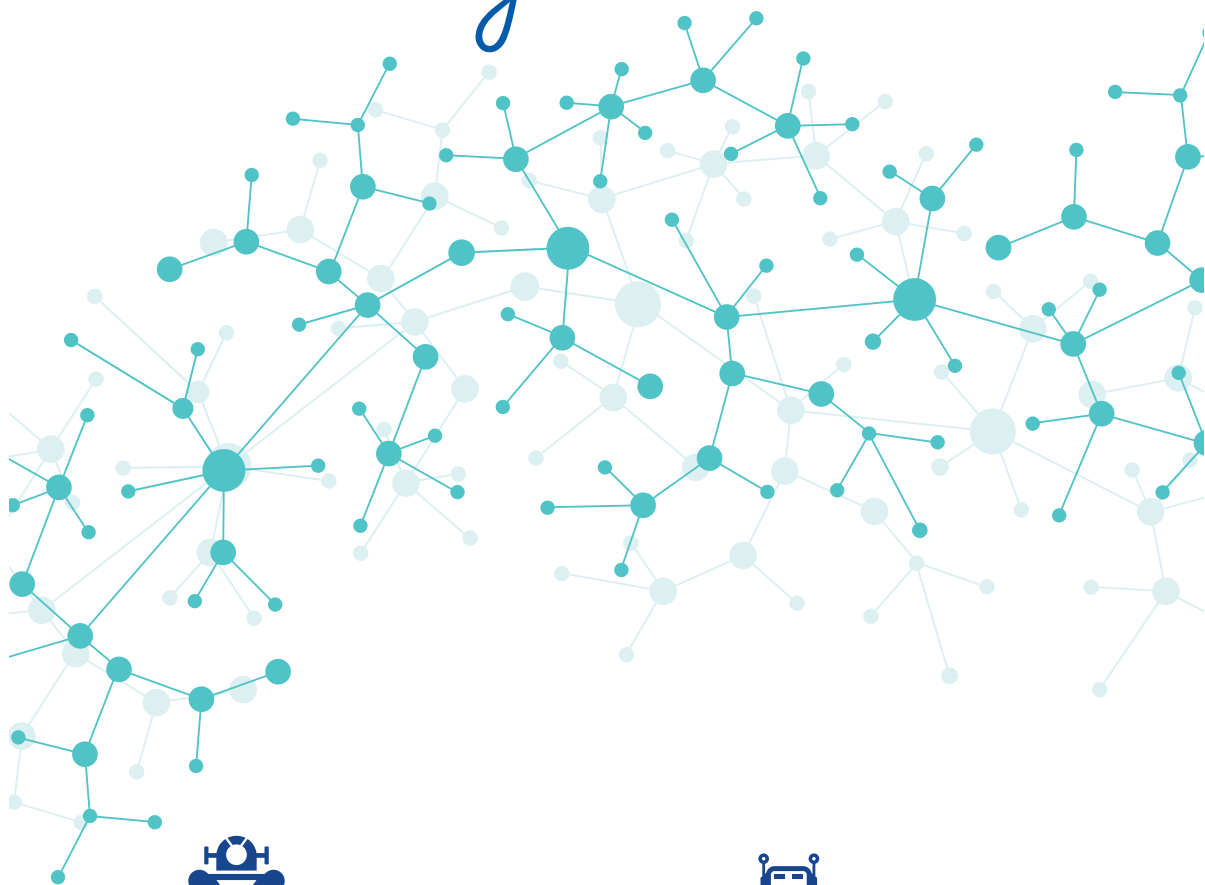
Методический инструментарий наставника



НАНО

КВАНТУМ

ТУЛКУТ



2019

УДК 53.043
ББК 22.3с

Наноквантум тулжит. Михаил Мухин, Иван Мухин, Александр Голубок. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Фонд новых форм развития образования, 2019 – 116 с.

Базовая серия «Методический инструментарий наставника»

В пособие базовой серии вошли методические материалы направления «Наноквантум» для использования наставниками сети детских технопарков «Кванториум» в ходе первого года обучения детей по этому направлению. Серия также содержит пособия по другим направлениям: аэро-, био-, энергии-, авто-, космо- и другим.

Подробнее о сети детских технопарков «Кванториум» можно узнать на сайте roskvantorium.ru

ISBN
978-5-6042730-7-4

(с) ФНФРО 2019

В сборнике использованы в том числе материалы из открытых источников сети Интернет. Поскольку источники, размещающие у себя информацию, далеко не всегда являются обладателями авторских прав, просим авторов использованных нами материалов откликнуться, и мы разместим указание на их авторство.

Сборник предназначен исключительно для некоммерческого использования.



Оглавление

Рецензия на тулkit «Наноквантум»	6
О наноквантуме	9
Что из себя представляет наноквантум?	10
Ограничения	17
Базовый модуль	25
Пояснительная записка	26
УТП	32
Карта образовательного модуля	33
Перечень рекомендуемых источников	66
Описание практических работ к базовому вводному модулю	68
Возможные мастер-классы	106
Источники информации	114

Рецензия на toolkit «Наноквантум»

Представленный учебно-методический комплекс является продуманной и сбалансированной образовательной программой для дополнительного обучения школьников в области нанотехнологий. Разработанная программа направлена на популяризацию основ нанотехнологий среди детей, вовлечение школьников в исследовательский процесс путем выполнения проектных работ и междисциплинарных исследовательских проектов в области нанотехнологий, а также на формирование представлений о современных методах проведения исследований и помощь в осознанном выборе будущей профессии.

Разработанная образовательная программа дополнительного образования школьников в области нанотехнологий содержит в себе три модуля:

- вводный модуль, посвященный введению в область знаний материаловедения и нанотехнологий, для обучающихся 7-8 классов;
- базовый модуль, посвященный формированию базовых знаний в области нанотехнологий, необходимых для эффективного освоения углубленного модуля и реализации проектов 3-го и 4-го уровней ограничений, а также направленный на вовлечение школьников 9-11 классов в исследовательскую, изобретательскую, научную и инженерную деятельность;
- углубленный модуль, направленный на формирование у школьников 9-11 классов научного мировоззрения, пробуждение интереса к инновационной, аналитической, творческой и интеллектуальной деятельности, закрепление теоретических знаний (полученных при изучении базовых модулей), формирование конкретных прикладных навыков и умений, а также обучение навыкам работы в команде.

Для наиболее эффективного освоения образовательной программы предполагается последовательное изучение модулей, при этом последовательность предоставления информации может быть изменена в соответствии с образовательными потребностями наставников. Учебно-тематический план не



является жестко регламентированным, количество часов, выделяемых на каждый кейс или другой вид учебной деятельности, может варьироваться в зависимости от условий и уровня группы. Перечень лекций в курсе и объем часов практических занятий может быть сокращен в соответствии с подготовкой школьников и требованиями, предъявляемыми к результатам освоения программы.

Следует отметить, что вводный и образовательный модули программы сбалансированы и адаптированы для школьного восприятия, в них рассматриваются основные блоки знаний в области нанотехнологий, включая терминологию и основные понятия нанотехнологий, основные отличительные особенности и свойства наноматериалов, методы получения нанобъектов и наноструктурированных материалов, особенности диагностики наноразмерных систем в зависимости от метода и технологии их получения. Лекционные занятия подкрепляются практикумами с методическими рекомендациями для наставников и преподавателей.

Образовательные блоки углубленного модуля осваиваются в форме командного выполнения междисциплинарных исследовательских проектов 3-го и 4-го уровней ограничений, а также в виде проведения индивидуальных углубленных лекционных занятий со школьниками. Выполнение междисциплинарных исследовательских проектов в области нанотехнологий, физики, химии, биологии, информатики формирует у школьников понимание и умение применять на практике алгоритм выполнения исследовательских задач, обеспечивает разностороннее восприятие обучающимися сложных особенностей наномира, формируя целостную картину о современных тенденциях в данной области.

Логика построения образовательной программы в целом построена на подходах проектной деятельности. Выполнение практико-ориентированных инженерных и исследовательских проектов, направленных на решение задач прикладного и фундаментального характера, позволяет целенаправленно развивать творческие способности обучающихся, их самостоятельность, совершенствовать личностные качества.

Доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, проректор по науке Санкт-Петербургского Академического университета РАН **А.Е. Жуков**



О наноквантуме

Что из себя представляет программа
«Наноквантум. ИТМО»?



Как построен образовательный курс?

- вводный модуль;
- базовый модуль;
- углубленный модуль;
- командная работа;
- проектная работа;
- междисциплинарные проекты: физика, химия, биология, IT;
- личные образовательные траектории для исследователей, инженеров и разработчиков;
- есть возможность переходить из проекта в проект, не начиная изучение курса заново;
- есть возможность развивать собственный проект на протяжении нескольких лет обучения;
- возраст: 14–18 лет

Состав проектных групп

Участники проектных групп: обучающиеся общеобразовательных учреждений

Возможность участия в группе обучающихся разных классов: есть

Средний численный состав: 14 человек

Требования к минимальному уровню компетенций: отсутствуют

Образовательный модуль

Типы образовательных модулей: вводный, базовый и углубленный

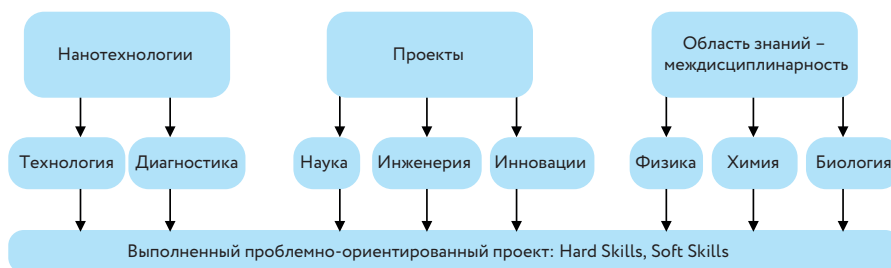
Продолжительность (часов): вводный – 72, базовый – 72, углубленный – 124

Продолжительность занятия (часов): не менее 2

Частота занятий: не реже 2 раз в неделю

Форма итоговой аттестации: публичное выступление с демонстрацией

Образовательная траектория – междисциплинарные проекты



1 год обучения

Линия 0: вводный модуль (6 месяцев)

Ключевые темы:

1. введение в нанотехнологии
2. основные методы и технологии производства наноструктурированных материалов;
3. основы сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии;
4. основные методы нанодиагностики материалов.

Возможные проекты:

1. Химический синтез и анализ водной дисперсии наночастиц золота
2. Нанолитография
3. Создание наноигл и нанозондов

Линия 1: 6 месяцев

Тематический блок – наномедицина и биология

Проект «Добавка к шампуням на основе комплексов наночастиц»

Тематический блок – наномедицина и биология

Проект «Управление приживляемостью титановых имплантов»

Тематический блок – нанолитография

Проект «Защита подлинности документов на наноуровне»

Тематический блок – новые конструкционные материалы

Проект «Защита внутренних поверхностей металлических труб»

Hard Skills: углубленные знания в области физики, химии, биологии

Soft Skills: критическое мышление, навык проектной работы и командной работы

КРІ и достижения по итогам вводного модуля

Количественные:

- Доля успешно закончивших годовое обучение – не менее 80 %
- Успешная защита итоговых проектов – не менее 80 % обучающихся

Качественные:

- Повышение уровня знаний в области нанотехнологий
- Участие обучающихся наноквантума в Международном конкурсе детских инженерных команд «Кванториада» и проектных олимпиадах

КРІ по итогам углубленного модуля

Количественные:

- Реализация 8 кейсов/проектов 3-го и 4-го уровня ограничений
- Создание не менее 3 прототипов инновационных продуктов с применением нанотехнологий

Качественные:

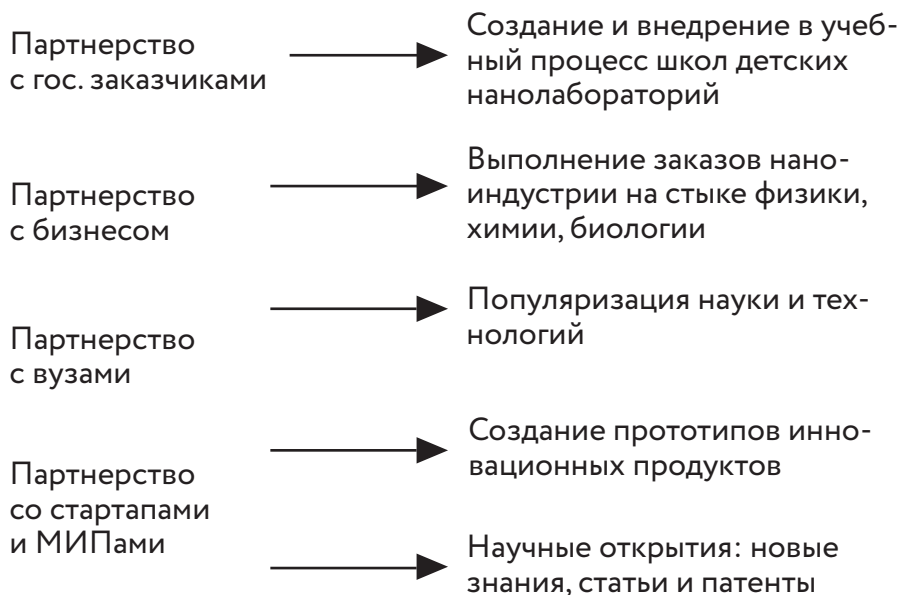
- Повышение заинтересованности детей наукой, технологией и инженерией
- Участие обучающихся наноквантума в Международном конкурсе детских инженерных команд «Кванториада» и проектных олимпиадах



Проектный год

Отрасль	Проект	Стейкхолдеры	Необходимые компетенции
ЖКХ, Здравоохранение	«Изучение микрофлоры воды»	В зависимости от региона	В соответствии с требованиями базового модуля
Биология	«Структурная природа окраски насекомых»	В зависимости от региона	В соответствии с требованиями базового модуля
Здравоохранение	«Управление приживляемостью титановых имплантов»	В зависимости от региона	В соответствии с требованиями углубленного модуля
Здравоохранение, индустрия красоты	«Добавка к шампуням на основе комплексов наночастиц»	В зависимости от региона	В соответствии с требованиями углубленного модуля
Финансы и экономика	«Защита подлинности документов на наноуровне»	В зависимости от региона	В соответствии с требованиями углубленного модуля
ЖКХ, нефтяная отрасль	«Защита внутренних поверхностей металлических труб»	В зависимости от региона	В соответствии с требованиями углубленного модуля

Взаимодействие наноквантума с внешним миром



Ограничения

1 уровень

1. Найдите информацию о дифракционном пределе для пространственного разрешения оптического микроскопа. Найдите информацию о пространственном разрешении электронного микроскопа. Найдите информацию о пространственном разрешении сканирующего зондового микроскопа в туннельном режиме, в силовом режиме и в режиме оптической микроскопии ближнего поля. Составьте таблицу по основным типам микроскопов с указанием основных факторов, определяющих пространственное разрешение. Проведите сравнение функциональных возможностей оптического, сканирующего зондового и сканирующего электронного микроскопов.
2. Явление механического резонанса является ключевым эффектом, используемым в полуконтактном режиме силового микроскопа. Рассчитайте собственные колебательные частоты макро-, микро- и нанобалок. Пьезоэффект используется в пьезосканерах СЗМ, осуществляющих механическое сканирование, а также в пьезокантилеверах, измеряющих локальную силу. Найдите информацию о прямом и обратном пьезоэффектах. Найдите материалы, обладающие пьезоэффектом, оцените величины перемещений, которые можно реализовать с помощью пьезосканера и сил, которые могут быть измерены пьезокантилевером.
3. Найдите информацию о методах создания сверхострых твердых зондов: механическая резка, вытягивание, электрохимическое травление, методы фотолитографии и плазмохимического травления, локальная обработка сфокусированным пучками заряженных частиц высоких энергий. Изучите их основные достоинства и недостатки, сравните функциональные характеристики сверхострых твердых зондов, изготовленных различными способами.
4. Найдите информацию о функциональных нанозондах на основе нанопроводов, нанотрубок, нановискеров, сравните их функциональные характеристики. Изучите методы формирования нанозондов.
5. Пьезоэффект лежит в основе позиционирования зонда или объекта в сканирующем зондовом микроскопе. Найдите



информацию о типах пьезокерамических позиционеров. Оцените влияние термодрейфа на точность позиционирования зонда относительно образца.

6. Явление туннельного эффекта лежит в основе туннельной микроскопии. Найдите выражение для зависимости туннельного тока от расстояния между вершиной зонда и поверхностью образца. Постройте график этой зависимости для разных значений средней работы выхода электрона $\Phi = (\Phi_1 + \Phi_2)/2$ (Φ_1 – работа выхода зонда, Φ_2 – работа выхода образца) Определите, при каком значении работы выхода в туннельном микроскопе можно визуализировать отдельные атомы.
7. Для стабилизации локального взаимодействия между зондом и образцом в СЗМ используется система автоматического регулирования (следающая система) с петлей отрицательной обратной связи. Найдите информацию о принципе работы системы автоматического регулирования и соотношении между точностью слежения и быстродействием следающей системы. Найдите способы поддержания постоянного тока в туннельном зазоре. Опишите алгоритм поддержания постоянного тока между зондом и поверхностью образца с контролем через туннельный ток. Опишите алгоритм поддержания постоянной силы прижима «кантилевер-образец», алгоритм обеспечения постоянной амплитуды колебаний микробалки при частичном контакте «зонд-образец».
8. Найдите информацию о режимах сканирования в СЗМ микроскопе. Опишите физические явления, лежащие в основе сканирующей туннельной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, динамической силовой литографии, локального анодного оксидирования. Опишите алгоритм двухпроходных методик.
9. Найдите информацию о методах манипулирования наночастицами и одиночными атомами с помощью сверхострых твердых зондов. Определите функциональные возможности и ограничения данного метода.
10. Найдите информацию о сверхгидрофобности поверхности и «эффекте Лотоса». Найдите примеры сверхгидрофобности в живой природе. Опишите связь гидрофобности и на-

ноструктурированности поверхности.

11. Найдите информацию о плазмонном эффекте и плазмонных частицах. Найдите способы создания плазмонных наночастиц на поверхности стекол.
12. Найдите информацию о способах визуализации микро- и наноструктур, созданных с помощью электронной, оптической и ионной литографий.

2 уровень

1. Изучите принцип работы СЗМ «NanoTutor». Изучите описание работы на приборе «NanoTutor». Проверьте себя на виртуальном тренажере СЗМ «NanoTutor», проводя визуализацию поверхности CD-диска, лепестка розы, крыла бабочки и др. Проведите обработку полученных изображений (вычитание плоскости, вычитание поверхности второго порядка, устранение ступенек, медианная фильтрация и т.п.), выполните поперечные сечения полученных изображений, постройте гистограмму распределения высот, измерьте характерные размеры нанообъектов.
2. Проведите исследование резонансных характеристик зондового вольфрамового датчика и сканера СЗМ микроскопа «NanoTutor», определите резонансную частоту и добротность. Исследуйте влияние веса образца и зонда на резонансную частоту сканера и зондового датчика.
3. Получите изображение нанообъекта с помощью метода сканирующей силовой микроскопии в полуконтактном режиме СЗМ микроскопа.
4. С помощью СЗМ микроскопа определите параметры тестовой решетки TGZ. Оцените влияние термодрейфа, связанного с колебаниями температуры в лаборатории на СЗМ изображения.
5. Проведите СЗМ сканирование сверхострой иглы, локализованной на поверхности образца и определите по полученному СЗМ наноизображению радиус вершины используемого зонда.
6. Проведите изготовление W-зондов из вольфрамовой проволоки для сканирующего зондового микроскопа, работающего в режиме туннельной микроскопии и полуконтактном



- силовом режиме. Выберите оптимальную форму зондов для каждого из режимов.
7. Проведите исследование поверхности твердых тел, например, кремниевой подложки, методом сканирующей туннельной микроскопии, определите характерные размеры топологических объектов.
 8. В графическом редакторе разработайте шаблоны топологической структуры в нанометровом масштабе и создайте микро- и наноструктуры методом силовой СЗМ литографии.
 9. Проведите исследование артефактов в сканирующей зондовой микроскопии. Разработайте тестовые объекты и условия проведения измерения, обеспечивающие объективное выделение и визуализацию каждого артефакта.
 10. С помощью пакета графической обработки и количественного анализа СЗМ изображения определите характерные размеры топологических объектов. Разработайте программное приложение, позволяющее в автоматическом режиме определять топологические параметры микрокольцевого фильтра, работающего по принципу «мод шепчущей галереи»
 11. В графическом редакторе разработайте изображение топологической структуры в нанометровом масштабе и создайте микро- и наноструктуры методом электронной литографии.
 12. Рассчитайте топологические параметры плазмонной наночастицы с заданными свойствами. С помощью электронной литографии или метода электрорастворения создайте такие плазмонные наночастицы на поверхности стекол. Исследуйте их свойства с помощью сканирующей электронной и сканирующей зондовой микроскопии.
 13. Проведите исследование морфологии гетероструктур с фазовым распадом (InGaN), определите характерные размеры зон фазового распада. Исследуйте зависимость размера фазовых зерен от внешних параметров, влияющих на их формирование.
 14. Найдите материал и метод создания магнитного зонда. С помощью разработанного зонда проведите МСМ исследование магнитной записывающей головки персонального компьютера.
 15. В графическом редакторе разработайте дизайн микро- или

наноструктуры с заданными свойствами. Создайте такую структуру методом жидкостного травления по маске. Проведите топологические исследования такой структуры, определите шероховатость.

16. Разработайте методологию проведения измерения топологии поверхности пористых просветляющих покрытий.
17. Проведите исследование распределения по размерам квантовых точек на поверхности структур или высаженных коллоидных квантовых точек в зависимости от технологических параметров их получения
18. Бумага – это элемент материальной культуры. Проведите исследование различных сортов бумаги в микро- и наномасштабах.
19. Отполируйте поверхность стальных образцов различного состава, пользуясь тонкой полировочной пастой и методом химической полировки. Найдите в интернете состав травителя для выделения границ зерен в поликристаллических образцах. Проведите исследование зерен и фазовых выделений в образцах стали различного состава на наноуровне.

3 уровень

1. Предложите методологию и проведите исследование природы окраски насекомых. Проведите исследование фотонных структур на крыле бабочки.
 - Смарт-компонента 1: на поверхности металла создайте наноструктуру, имитирующую окрас крыла бабочки.
 - Смарт-компонента 2: создайте наноструктуры, обладающие различной цветностью: красный, зеленый, синий.
2. Проведите исследование явления сверхгидрофобности и самоочистки поверхности в природе на примере листка лотоса или розы.
 - Смарт-компонента 1: соберите оптическую установку на основе USB-камеры для экспресс-диагностики гидрофобности поверхности.
 - Смарт-компонента 2: предложите методы модификации поверхности, приводящие к изменению свойств гидрофобности.
 - Смарт-компонента 3: с помощью УФ-лампы модифици-



- руйте гидрофобность стекла.
3. Разработайте и реализуйте метод «оптической» записи и хранения информации на наноуровне с помощью силовой СЗМ литографии.
 - Смарт-компонента 1: создайте шаблон нано QR-кода.
 - Смарт-компонента 2: с помощью метода динамической силовой литографии нанесите на поверхность CD-диска нано QR-код.
 - Смарт-компонента 3: считайте зашифрованную информацию в нано QR-коде, созданном другим обучающимся.
 - Смарт-компонента 4: предложите и реализуйте способ модификации поверхности CD-диска с помощью силовой литографии, который позволяет однозначным образом идентифицировать конкретный диск под освещением лампы широкого спектра излучения.
 4. Разработайте воспроизводимую и контролируемую технологию создания микро- или наноструктуры методом жидкостного травления: определите зависимость скорости травления, отклонение размеров итоговых структур от заданного шаблона в зависимости от технологических параметров травления.
 - Смарт-компонента 1: разработайте дизайн микрофлюидного чипа для формирования микрокапель.
 - Смарт-компонента 2: методом травления и фотолитографии создайте прототип микрофлюидного чипа, в котором ток жидкости в каналах обеспечивается капиллярными силами.
 5. Nanoart. Отберите объекты флоры, фауны и неживой природы, содержащие, по вашему мнению, интересные микро- и наноструктуры на поверхности. Проведите визуализацию микро- и наноструктур на поверхности отобранных образцов. Объясните функциональность обнаруженных микро- и наноструктур. Найдите изображения-аналоги в окружающем вас макромире, схожие внешне с полученными нанокартинками. На основе сопоставления макро- и наноизображений создайте арт галерею, заставляющую зрителя задуматься о взаимосвязях и единстве природных явлений. Создайте привлекающий внимание настенный календарь Nanoart.

6. Разработайте рецептуру средства для ухода за волосами с добавкой нанокomпонент.
 - Смарт-компонента 1: разработайте метод диагностики состояния окрашенных волос на микроуровне.
 - Смарт-компонента 2: создайте наношампунь с частицами серебра. Выявите влияние наночастиц серебра на состояние окрашенных волос.
7. Разработайте электрохимический наносенсор на основе слоев графена.
 - Смарт-компонента 1: создайте сенсор на основе слоев графена для диагностики присутствия в атмосфере паров изопропилового спирта.
 - Смарт-компонента 2: создайте сенсор на основе слоев графена, селективно определяющий присутствие в атмосфере паров изопропилового и этилового спиртов.
8. Предложите метод защита подлинности документов на наноуровне
 - Смарт-компонента 1: Разработайте дизайн защитной метки, размер которой меньше 1 мкм.
 - Смарт-компонента 2: Предложите способы нанесения защитных нанометок на различные сорта бумаги: матовая, глянцевая и др.
 - Смарт-компонента 3: На бумагу различного сорта нанесите нанометки, которые можно учитывать с помощью оптического микроскопа.



Базовый модуль

Рабочая программа «Наноквантум. ИТМО»
72 часа

Пояснительная записка

Интерес к наноразмерным системам, то есть системам, один из компонентов которых имеет размер, лежащий в диапазоне (1–100) нм хотя бы по одному из измерений, обусловлен появлением новых качеств, которые не удастся реализовать ни на атомно-молекулярном уровне, ни на макроскопическом объемном уровне вещества. Вопросы создания и применения наноразмерных материалов становятся все более актуальными по мере развития тенденции минимизации технических и информационно-технических систем и обретения ими принципиально новых функциональных характеристик. На данном этапе технического развития чрезвычайно важными и перспективными являются технологии синтеза и производства наноматериалов. Накопившийся опыт по синтезу наночастиц и созданию материалов на их основе, а также прогресс методов и инструментов их диагностики позволяет провести обобщение и наметить пути поиска новых решений в этой инновационной области знаний.

Для предсказания, оценивания и управления свойствами конечных произведенных нанотехнологичных продуктов, а также определения области их работы чрезвычайно важно понимать как механизмы, лежащие в основе формирования наноматериалов и наноразмерных систем, так и протекающие в них процессы, обуславливающие особенности работы наносистем. В рамках изучения данного модуля у обучающихся формируются знания о методах и технологиях получения нанопорошков, нанослоев, наногетероструктур и наноструктурированных материалов, в основе которых лежат различные физические и физико-химические процессы.

Проектная деятельность обучающихся является очень важным и эффективным механизмом формирования у обучающихся способности самостоятельно мыслить, добывать и применять знания, тщательно обдумывать принимаемые решения, четко планировать действия, эффективно сотрудничать в разнообразных группах. Современные наставнические исследования



показывают, что проектная деятельность развивает исследовательские и творческие способности обучающихся, повышает их мотивацию к получению дополнительных знаний и развивает их самостоятельную активность, активизирует процесс включения обучающихся в познавательную деятельность.

Цель модуля

Цель образовательного модуля – привлечь обучающихся к исследовательской, изобретательской, научной и инженерной деятельности. Задача наставника – через вводный модуль развить у обучающихся навыки, которые им потребуются в проектной работе и в дальнейшем освоении программы наноквантума.

Изучение модуля, построенного на практико-ориентированных инженерных и исследовательских проектах (индивидуальных или групповых), направленных на решение задач прикладного и фундаментального характера, позволяет целенаправленно развивать творческие способности обучающихся, их самостоятельность, совершенствовать личностные качества.

Целью является овладение обучающимися современными представлениями о наноматериалах и наносистемах, а также возможностями их использования при создании наукоемкой продукции.

Обоснованность в изучении данного курса вызвана следующими причинами:

- значительной наукоемкостью процессов разработки и изготовления продукции из наноструктурированных материалов;
- новизной научных разработок и большими рисками при оценке эффективности их использования для создания конкурентоспособной нанопродукции;
- необходимостью отслеживать постоянно изменяющуюся конъюнктуру на рынке нанопродукции и нанотехнологий.

Задачи модуля

- освоение обучающимися терминологии и основных понятий, связанных с наноматериалами и нанотехнологиями;
- осмысление обучающимися основных отличительных особенностей материалов, находящихся в наносостоянии;
- освоение основных методов получения наноматериалов и наноструктур;
- формирование представлений о перспективах развития методов получения наноматериалов и наноструктур;
- формирование у обучающихся системных знаний о методах и технологиях получения наноразмерных систем и их практической реализации на предприятиях для повышения устойчивости и конкурентоспособности инновационного бизнеса
- формирование у обучающихся системных знаний о физических основах, инструментальных принципах и диагностических возможностях методов сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ СЛ), являющихся одними из базовых методов современной нанодиагностики;
- овладение обучающимися современными представлениями об основных приборах и методах нанодиагностики и их аналитических возможностях;
- овладение обучающимися навыками проектной деятельности, их подготовка в области проектной деятельности на современном уровне;
- вовлечение обучающихся в научно-техническое творчество;
- выявление и поддержка обучающихся, участвующих в проектной деятельности по нанотехнологиям;
- развитие методических материалов для школьных наставников и всех лиц, заинтересованных в реализации проектной деятельности обучающихся;
- популяризация научно-технических знаний;
- выработка у обучающихся навыков командной работы и публичных выступлений, докладов.



Место модуля в образовательной программе

Данный модуль является базовым. Рекомендуется изучение данного модуля после эффективного освоения обучающимися вводного модуля «Введение в материаловедение и нанотехнологии».

Освоение данных модулей формирует платформу для изучения углубленного модуля, включающего проектные работы 3-го и 4-го уровней ограничений.

Методы

- методика проблемного обучения;
- методика проектной деятельности.

Формы работы

Обучение проводится в формате лекций, объяснений и демонстраций для усвоения теоретического материала. После основного лекционного материала проводятся практические занятия для эффективного закрепления полученных теоретических знаний, а также для формирования базовых навыков.

Для проверки полученных знаний целесообразно проводить публичные защиты результатов, полученных на практике, а также выступления перед группой обучающихся на заранее подготовленные темы.

Рекомендуемые формы занятий базового образовательного модуля

- на этапе изучения нового материала – лекция, объяснение, рассказ, демонстрация;
- на этапе закрепления изученного материала – беседа, дискуссия, практическая работа, дидактическая или наставническая игра;
- на этапе повторения изученного материала – наблюдение, устный контроль (опрос, игра), творческое задание;
- на этапе проверки полученных знаний – выполнение допол-

нительных заданий, публичное выступление с демонстрацией результатов работы над вводным образовательным модулем.

Требования к результатам освоения программы модуля

Прохождение данного образовательного модуля должно сформировать у обучающихся компетенции, которые могут быть применены в ходе реализации последующих образовательных модулей.

По окончании изучения базового модуля обучающиеся должны знать и уметь:

Универсальные компетенции

- умение генерировать идеи указанными методами;
- умение слушать и слышать собеседника;
- умение аргументированно отстаивать свою точку зрения;
- умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее;
- умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи;
- навыки командной работы;
- умение грамотно письменно формулировать свои мысли;
- критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы;
- основы ораторского мастерства.

Знаниевые и профессиональные компетенции

- отличительные особенности наносостояния материалов;
- основные параметры, определяющие свойства нанообъектов, методы и приборы их характеристики;
- классификацию, возможности и назначение основных методов получения наноматериалов;
- технологическое оборудование и основные методы получения нанопорошков, нанослоев и компактных наноматериалов;
- основы обработки наноструктурированных материалов; методов и технологии получения нанокомпозитов;
- умение анализировать и предсказывать тенденции развития



- сегмента рынка продукции на основе наноразмерных систем;
- знание основных параметров, определяющих свойства нанообъектов, методов и приборов их характеристики;
 - понимание принципов, заложенных в конструкции и программное обеспечение СЗМ;
 - навыки работы на СЗМ различных типов;
 - умение выбирать оптимальные расходные материалы;
 - навыки анализа данных, полученных с помощью СЗМ.

Рекомендации наставникам по использованию программы модуля

Для наиболее эффективного освоения обучающимися изучаемого материала основные лекции курса сопровождаются практическими занятиями (практикумами), в том числе с использованием технологического и аналитического оборудования.

Учебно-тематический план не является жестко регламентированным: количество часов, выделяемое на каждый раздел или другой вид учебной деятельности, может варьироваться в зависимости от условий и уровня группы. Перечень лекций в курсе и объем часов может быть сокращен в соответствии с подготовкой обучающихся и требованиями, предъявляемыми к результатам освоения модуля.

Базовый образовательный модуль является типовым, однако наставнику настоятельно рекомендуется подробно ознакомиться со всеми дидактическими материалами перед проведением занятий.

Учебно-тематический план

Учебно-тематический план представлен в виде карты образовательного модуля (см. далее) с указанием вида учебной деятельности для каждой активности, количества учебных часов, компетенций (Hard Skills, Soft Skills) и места проведения активности:

- продолжительность модуля – 72 астрономических часа;
- продолжительность одного занятия от 1-го до 2-х астрономических часов;
- частота занятий – 2 занятия в неделю;
- количество преподавателей – 2;
- количество обучающихся в группе – 14;
- распределение комплектов оборудования и материалов – 1 комплект на 2-3 обучающихся.

Базовый модуль преследует цель формирования базовых знаний в области нанотехнологий, необходимых для эффективного освоения углубленного модуля и реализации проектов 3-го и 4-го уровней ограничения.

Базовый модуль состоит из 4-х разделов (обобщенных блоков):

1. Введение в терминологию нанотехнологий;
2. Основные методы и технологии производства наноструктурированных материалов;
3. Основы сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии;
4. Основные методы нанодиагностики материалов.

Разделы базового модуля являются логическим продолжением друг друга.



Карта образовательного модуля

Раздел 1. Введение в терминологию нанотехнологий

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Терминология и основные понятия, связанные с нанотехнологиями

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Понятие стандарта и целей стандартизации. Принятые и планируемые к принятию стандарты в нанотехнологиях

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Терминология и основные понятия, связанные с нанотехнологиями

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Терминология и основные определения в области нанотехнологий

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Основные отличительные особенности материалов, находящихся в наносостоянии

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Наносостояние. Причины возникновения. Роль поверхности, размеров и количества атомов в формировании наносостояния. Основные эффекты, проявляющиеся при переходе материалов в наносостояние (изменение параметров внутренней структуры, тепловых, электрических, магнитных, оптических, химических свойств). Классификация наноматериалов. Структура и свойства компактированных наноматериалов. Примеры наноматериалов и их применения. Структура и свойства наносистем. Примеры наносистем и их применения.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Свойства наноматериалов

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Наносостояние. Причины возникновения. Роль поверхности, размеров и количества атомов в формировании наносостояния. Основные эффекты, проявляющиеся при переходе материалов в наносостояние (изменение параметров внутренней структуры, тепловых, электрических, магнитных, оптических, химических свойств). Классификация наноматериалов. Структура и свойства компактированных наноматериалов. Примеры наноматериалов и их применения. Структура и свойства наносистем. Примеры наносистем и их применения.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение



комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Классификация наноразмерных объектов и систем на их основе. Физикохимия наноразмерных систем. Классификация методов получения

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Понятие наноразмерного объекта как промежуточного звена между отдельным атомом или молекулой и объемным материалом. Строение наноразмерного объекта и размерные эффекты. 0D, 1D и 2D наноразмерные объекты. Понятие и типы наноразмерных систем. 1D, 2D и 3D наноразмерные системы. Фрактальность наноразмерных систем. Природные наноразмерные объекты и системы. Искусственные наноразмерные объекты и системы. Классификация наноматериалов. Перспективные направления развития нанотехнологий. Введение в нанохимию. Нанореакторы как инструмент синтеза и исследования химических свойств наноразмерных объектов. Химическая связь и квантовые размерные эффекты. Зависимость физико-химических свойств от размера. Металлические и неметаллические наночастицы. Агломерация и «магические» наночастицы. Наноккомпозиты. Эвтектики. Структуры распада. Энергетическое состояние поверхности и межфазных границ. Зародышеобразование и формирование наноструктур. Диспергационные и конденсационные методы получения наноразмерных систем. Химический и физический подход к синтезу. Методы синтеза нанопорошков и наночастиц со сложной неоднородной структурой (типа «ядро-оболочка», «сэндвич» и т.д.). Технологии получения наноматериалов. Темплатный синтез. Самосборка.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение

комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Термодинамика монослойной пленки

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Понятие наноразмерного объекта как промежуточного звена между отдельным атомом или молекулой и объемным материалом. Строение наноразмерного объекта и размерные эффекты. 0D, 1D и 2D наноразмерные объекты. Понятие и типы наноразмерных систем. 1D, 2D и 3D наноразмерные системы. Фрактальность наноразмерных систем. Природные наноразмерные объекты и системы. Искусственные наноразмерные объекты и системы. Классификация наноматериалов. Перспективные направления развития нанотехнологий. Введение в нанохимию. Нанореакторы как инструмент синтеза и исследования химических свойств наноразмерных объектов. Химическая связь и квантовые размерные эффекты. Зависимость физико-химических свойств от размера. Металлические и неметаллические наночастицы. Агломерация и «магические» наночастицы. Нанокompозиты. Эвтектики. Структуры распада. Энергетическое состояние поверхности и межфазных границ. Зародышеобразование и формирование наноструктур. Диспергационные и конденсационные методы получения наноразмерных систем. Химический и физический подход к синтезу. Методы синтеза нанопорошков и наночастиц со сложной неоднородной структурой (типа «ядро-оболочка», «сэндвич» и т.д.). Технологии получения наноматериалов. Темплатный синтез. Самосборка.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно



формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Раздел 2. Основные методы и технологии производства наноструктурированных материалов

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Методы и оборудование получения нанобъектов испарением-конденсацией, в процессе газофазных реакций и кристаллизации из расплава

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения нанопорошков испарением-конденсацией, в процессе газофазных реакций, а также кристаллизации из расплава. Применение и выбор процессов испарения-конденсации, процесса газофазных реакций, а также кристаллизации из расплава для синтеза нанопорошков различной химической природы и физической структуры. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Методы и оборудование получения нанобъектов механическим диспергированием, механосинтезом, детонационным синтезом, электровзрывом и методом твердофазного разложения

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения компак-

тированных наноматериалов. Применение процессов компактированных наноматериалов для получения изделий из нанопорошков методом спекания. Разновидности методик и оборудования

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Расчет энергии, затрачиваемой при диспергировании материалов до заданного размера частиц

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения компактированных наноматериалов. Применение процессов компактированных наноматериалов для получения изделий из нанопорошков методом спекания. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Методы и оборудование получения компактированных наноматериалов

Кол-во часов: 1 ч.



Hard Skills: Физико-химические основы получения нанопорошков твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий. Применение процессов нанесения твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий для создания модифицированных поверхностных слоев. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Оценка параметров структуры компактированных наноматериалов в зависимости от внешних технологических факторов

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения компактированных наноматериалов. Применение процессов компактированных наноматериалов для получения изделий из нанопорошков методом спекания. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Методы и технологии получения твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения нанопорошков твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий. Применение процессов нанесения твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий для создания модифицированных поверхностных слоев. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Основные методы контроля гранулометрического состава нанообъектов и их морфологических особенностей. Разновидности методик и оборудования. Принципы выбора методов контроля применительно к различным нанообъектам.

Кол-во часов: 1 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения нанопорошков твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий. Применение процессов нанесения твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровтий для создания модифицированных поверхностных слоев. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства.



торского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Определение распределения наночастиц по размерам

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы получения нанопорошков твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровов. Применение процессов нанесения твердых, сверхтвердых и ультратвердых нанопокровов для создания модифицированных поверхностных слоев. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Методы газовой и молекулярно-лучевой эпитаксии

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Применение процессов газовой (ГФЭ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МПЭ) для формирования наногетероструктур; планарные технологии. физические закономерности, определяющие свойства многокомпонентных полупроводниковых соединений A₃B₅ и A₂B₆ и гетероструктур на их основе при МПЭ; технологические методы и условия получения гетероструктур методами МПЭ; представление о различных методах ГФЭ; основные процессы, протекающие при ГФЭ. Аппаратное оформление технологии ГФЭ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источ-

никах и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Методы очистки наноматериалов и получения высокочистых веществ

Кол-во часов: 1 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы очистки материалов и получения высокочистых веществ. Применение процессов очистки материалов для различных веществ в различных агрегатных состояниях. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Методы зонной очистки

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Физико-химические основы очистки материалов и получения высокочистых веществ. Применение процессов очистки материалов для различных веществ в различных агрегатных состояниях. Разновидности методик и оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение



комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Гидротермальный синтез. Осаждение из растворов. Золь-гель технология. Синтез в микрогетерогенных системах. Электрохимический синтез. Криохимическая технология. Метод испарения и конденсации. Плазмохимический синтез. Электроэрозия. Детонационный синтез. Атомно-молекулярное наслаивание

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Сверхкритическое состояние. Физико-химические особенности зародышеобразования и роста кристаллов в гидротермальных условиях. Основы гидротермальной технологии синтеза наночастиц. Совмещение гидротермального метода с акустическими и микроволновыми технологиями. Коллоидное состояние и дисперсные системы. Наножидкости. Метод осаждения и соосаждения из растворов. Седиментация как метод повышения выхода наночастиц. Золь-гель технология. Методы получения золей. Физический и химический гель. Золь-гель процесс. Синтез наночастиц в микрогетерогенных системах и их физико-химические свойства. Использование электрохимических процессов для получения наночастиц и нанопокровов. Быстрое охлаждение системы как способ синтеза наночастиц. Основы, возможности и ограничения газофазного синтеза наночастиц. Плазмохимический синтез и его разновидности. Микродуговой способ синтеза. Взрыв как способ синтеза наночастиц. Основная гипотеза и методы химической сборки. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно

формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Химический синтез и физико-химический анализ водной дисперсии наночастиц золота

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Сверхкритическое состояние. Физико-химические особенности зародышеобразования и роста кристаллов в гидротермальных условиях. Основы гидротермальной технологии синтеза наночастиц. Совмещение гидротермального метода с акустическими и микроволновыми технологиями. Коллоидное состояние и дисперсные системы. Наножидкости. Метод осаждения и соосаждения из растворов. Седиментация как метод повышения выхода наночастиц. Золь-гель технология. Методы получения золей. Физический и химический гель. Золь-гель процесс. Синтез наночастиц в микрогетерогенных системах и их физико-химические свойства. Использование электрохимических процессов для получения наночастиц и нанопокровов. Быстрое охлаждение системы как способ синтеза наночастиц. Основы, возможности и ограничения газофазного синтеза наночастиц. Плазмохимический синтез и его разновидности. Микродуговой способ синтеза. Взрыв как способ синтеза наночастиц. Основная гипотеза и методы химической сборки. Молекулярно-лучевая эпитаксия

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.



Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Лазерная обработка. Термическое разложение. Твердофазный синтез. Электровзрыв проводников. Механическое и ультразвуковое диспергирование. Пластическая деформация. Литография.

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов. Лазерная абляция материалов. Метод термического разложения в применении к получению наноматериалов. Твердофазный синтез нанокристаллов в стеклянной матрице. Пористые стекла. Электровзрыв проводников как способ получения наночастиц металлов и оксидов металлов. Механохимическая активация. Сонохимические технологии. Методы пластической деформации. Нанолитография.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Раздел 3. Основы сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Особенности диагностики наноразмерных систем в зависимости от метода и технологии получения

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Рекомендации по выбору методов и инструментов диагностики наноразмерных систем в зависимости от способа и технологии их получения. Анализ тенденций развития методов и технологий получения наноразмерных систем и инструментальных методов их исследования

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источ-

никах и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Физические основы, инструментальные принципы, аппаратно-программное обеспечение СЗМ

Кол-во часов: 1 ч.

Hard Skills: Основная идея СЗМ. Пространственное разрешение СЗМ. Пьезосканер. Стабилизация наноконтакта зонда с образцом с помощью следящей системы (СС). Аналоговая и цифровая СС. Режим постоянного взаимодействия и постоянной высоты. Компромисс между точностью и устойчивостью слежения. Принцип защиты наноконтакта от вибраций, акустических шумов и тепловых дрейфов. Основные типы СЗМ, основные измерительные моды. Аппаратно-программные средства управления, сбора и обработки СЗМ данных. Опыт внедрения инноваций в ЕС. Основные фирмы-производители СЗМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Сканирующая туннельная микроскопия, упругая и неупругая локальная туннельная спектроскопия



Кол-во часов: 1 ч.

Hard Skills: Туннельный эффект. Энергетическая диаграмма контакта металл – диэлектрик – металл. Туннельный ток в случае потенциального барьера прямоугольной и треугольной формы. Режим постоянного туннельного тока и постоянной высоты. Пространственное разрешение СТМ. Упругая и неупругая туннельная спектроскопия. Локальная туннельная спектроскопия металлов, полупроводников, сверхпроводников, органических молекул. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия атомного разрешения. Эффекты одноэлектронного туннелирования. Применение СТМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Визуализация методом СТМ микро-и наноструктуры поверхности образца мастер-диска, используемого при изготовлении DVD-дисков.

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Туннельный эффект. Энергетическая диаграмма контакта металл – диэлектрик – металл. Туннельный ток в случае потенциального барьера прямоугольной и треугольной формы. Режим постоянного туннельного тока и постоянной высоты. Пространственное разрешение СТМ. Упругая и неупругая туннельная спектроскопия. Локальная туннельная спектроскопия металлов, полупроводников, сверхпроводников, органических молекул. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия атомного разрешения. Эффекты одноэлектронного туннелирования. Применение СТМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

занными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Сканирующая силовая микроскопия. Контактный, бесконтактный и полуконтактный режимы работы

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Энергия межатомного взаимодействия. Ветви отталкивания и притяжения. Потенциал Леннарда-Джонса. Модель Герца для упругого контакта двух сфер. Упругий контакт плоскости и сферы. Способ измерения локального силового взаимодействия. Кантилеверы и их параметры. Пьезорезонансные датчики силового взаимодействия. Контактная, бесконтактная и полуконтактная измерительные моды. Режим постоянной силы и постоянной высоты. Амплитуда, частота и фаза колебаний в полуконтактном режиме. Получение кривых подвода в различных режимах, измерение средней силы взаимодействия. Выбор кантилеверов для исследования объектов различной природы. Особенности силовой микроскопии биологических объектов. Примеры применения сканирующей силовой микроскопии для диагностики наномеханических свойств полимерных материалов.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.



Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Визуализация и измерение геометрических параметров питов на поверхности CD-диска из поликарбоната

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Энергия межатомного взаимодействия. Ветви отталкивания и притяжения. Потенциал Леннарда-Джонса. Модель Герца для упругого контакта двух сфер. Упругий контакт плоскости и сферы. Способ измерения локального силового взаимодействия. Кантилеверы и их параметры. Пьезорезонансные датчики силового взаимодействия. Контактная, бесконтактная и полуконтактная измерительные моды. Режим постоянной силы и постоянной высоты. Амплитуда, частота и фаза колебаний в полуконтактном режиме. Получение кривых подвода в различных режимах, измерение средней силы взаимодействия. Выбор кантилеверов для исследования объектов различной природы. Особенности силовой микроскопии биологических объектов. Примеры применения сканирующей силовой микроскопии для диагностики наномеханических свойств полимерных материалов.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Измерение локальных механических, электрических, магнитных характеристик объектов различной природы. Двухпроходные СЗМ методики

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Измерение локальной силы трения. Измерение локальной твердости в сканирующем силовом микроскопе. Фазовый контраст. Построение карты распределения модуля Юнга. Сканирующая емкостная микроскопия полупроводни-

ковых наногетероструктур. Измерение локального потенциала (Кельвин мода). Измерение сопротивления растекания. Микроскоп магнитных сил. Двухпроходные СЗМ методики. Кантилеверы для магнитных и электростатических измерений. Сверхвысоковакуумная зондовая микроскопия и спектроскопия атомного разрешения

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Сканирующая зондовая литография. Примеры применения СЗМ методов.

Кол-во часов: 1 ч.

Hard Skills: Локальное механическое давление, напряженность электрического поля и плотность тока в области контакта. Физические явления, приводящие к модификации поверхности в области наноконтакта. Токовая литография. Контактная силовая литография. Динамическая силовая литография. Литография методом локального анодного оксидирования. Локальные электрохимические реакции. Характерные примеры, демонстрирующие возможности СЗМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.



Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Создание наноструктуры по цифровому шаблону на поверхности поликарбоната методом динамической силовой литографии

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Локальное механическое давление, напряженность электрического поля и плотность тока в области контакта. Физические явления, приводящие к модификации поверхности в области наноконтакта. Токовая литография. Контактная силовая литография. Динамическая силовая литография. Литография методом локального анодного оксидирования. Локальные электрохимические реакции. Характерные примеры, демонстрирующие возможности СЗМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Изготовление и диагностика СЗМ зондов. Простейшие основы теории построения СЗМ изображений. Метрология в СЗМ.

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Технология изготовления кремниевых кантилеверов для силовой микроскопии, металлических игл для туннельной микроскопии, заостренного оптоволокну для оптической микроскопии ближнего поля, зонды для электрохимической микроскопии, зонды для термо микроскопии, пьезорезонансные зонды на основе кварцевых и пьезокерамических резонаторов. Основы теории построения СЗМ изображения: учет инструментального вклада формы зонда в измеряемом профиле рельефа, деконволюция. Тестовые образцы для калибровки СЗМ. Фирмы-производители СЗМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Изготовление вольфрамовых зондов методом электрохимического травления. Определение параметров зондов с помощью сканирующего электронного микроскопа и с помощью тестовой TGT решетки в сканирующем силовом микроскопе. Обработка и анализ СЗМ данных, полученных при визуализации объектов различной природы.

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Технология изготовления кремниевых кантилевиров для силовой микроскопии, металлических игл для туннельной микроскопии, заостренного оптоволокну для оптической микроскопии ближнего поля, зонды для электрохимической микроскопии, зонды для термо-микроскопии, пьезорезонансные зонды на основе кварцевых и пьезокерамических резонаторов. Основы теории построения СЗМ изображения: учет инструментального вклада формы зонда в измеряемом профиле рельефа, деконволюция. Тестовые образцы для калибровки СЗМ. Фирмы-производители СЗМ.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.



Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Оптические методы исследования и манипуляции нанообъектами

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Состояние дел в современной оптической микроскопии. Базовые принципы конфокальной и ближнеполевой оптической микроскопии. Интенсивность электромагнитного излучения в эванесцентной зоне (ближнее поле) и в зоне дальнего поля. Зонд для ОМБП. Конструкция оптического микроскопа ближнего поля (ОМБП) и конфокального оптического микроскопа. Устройство и работа лазерного пинцета.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Обработка и анализ СЗМ данных

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Удаление наклона плоскости, удаление поверхности 2-го порядка, сглаживание методом скользящего окна, медианная фильтрация, Фурье-фильтрация, поперечное сечение СЗМ изображений, гистограммы распределения по размерам, способы представления 3D-изображений

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания пре-

зентаций.

Вид учебной деятельности: Практикум

Название: Обработка и представление СЗМ данных, измерение геометрических характеристик на СЗМ изображениях

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Удаление наклона плоскости, удаление поверхности 2-го порядка, сглаживание методом скользящего окна, медианная фильтрация, Фурье-фильтрация, поперечное сечение СЗМ изображений, гистограммы распределения по размерам, способы представления 3D-изображений.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Раздел 4. Основные методы нанодиагностики материалов

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Взаимодействие пучков заряженных частиц с веществом. Возможности использования пучков заряженных частиц для исследования и модификации нанообъектов

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Характеристики электронного пучка. Источники электронов и ионов. Электронная оптика. Общие схемы электронных микроскопов. Рассеяние электронов и ионов в веществе. Продукты взаимодействия электронов/ионов с веществом. Возможности использования эффектов взаимодействия заряженных частиц с веществом для исследования, контроля и модификации нанообъектов.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение



комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ в исследовании, диагностике и контроле параметров наноструктурированных материалов.

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Формирование изображения в растровом электронном микроскопе. Детекторы в растровой электронной микроскопии. Возможности и ограничения в наблюдении и анализе поверхности, морфологических и геометрических параметров объектов исследования. Аналитические возможности растрового электронного микроскопа. Рентгеновский микроанализ элементного состава микро-и нанообъектов. Электроннолучевая литография на резисте и другие методы создания наноструктур с помощью электронного пучка. Основные фирмы – производители оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Использование сфокусированных ионных пучков для обработки и визуализации нанообъектов

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Системы со сфокусированным ионным пучком. Де-

текторы ионов. Применение ионных пучков для создания наноструктур: ионнолучевая фрезеровка, локальное осаждение и травление материала с помощью газов. Применение пучков легких ионов для исследования и модификации наноструктур. Основные фирмы – производители оборудования.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Физические основы, инструментальные принципы методов рентгенофотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Неупругие процессы при взаимодействии рентгеновского излучения и электронов с веществом. Эмиссия фотоэлектронов и оже-электронов. Пространственное разрешение. Инструментальная реализация методов рентгенофотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии. Основные типы электронных спектрометров, основные измерительные моды. Рентгеноэлектронные и оже-электронные спектры, качественный и количественный анализ элементного и химического состава. Аппаратно-программные средства управления, сбора и обработки спектральной информации.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы



работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

Вид учебной деятельности: Лекция

Название: Физические основы и инструментальные принципы дифракции медленных и быстрых электронов. Рентгеновские методы определения кристаллической структуры, элементного и фазового состава наноматериалов.

Кол-во часов: 2 ч.

Hard Skills: Условия возникновения дифракции электронов на кристаллических структурах твердотельных материалов. Приборная реализация метода для анализа наноструктур на поверхности кристаллов. Диагностика роста нанослойных структур, выращиваемых методами молекулярно-лучевой эпитаксии. Физические принципы рентгеновской дифрактометрии и рентгенофлуоресцентной спектromетрии для определения кристаллической структуры, элементного и фазового состава наноматериалов. Разновидности и особенности рентгеноспектральных методов. Примеры приборной реализации, основные производители рентгеноспектральной аппаратуры в России и в мире. Практические приемы рентгеноспектрального и рентгенодифракционного анализа.

Soft Skills: Умение искать информацию в свободных источниках и структурировать ее. Умение генерировать идеи указанными методами, слушать и слышать собеседника. Умение комбинировать, видоизменять и улучшать идеи. Командная работа. Организаторские качества. Умение грамотно письменно формулировать свои мысли. Критическое мышление и умение объективно оценивать результаты своей работы. Основы ораторского искусства. Опыт публичных выступлений. Основы работы в текстовом редакторе и программе для создания презентаций.

В рамках каждого раздела для получения обучающимися заявленных компетенций предусмотрена реализация теоретической и практической части. Теоретическая часть каждого раздела представлена тематическими лекциями. Практическая часть каждого раздела разделена на групповую работу под непосредственным руководством наставника и самостоятельную

работу обучающихся.

В карте образовательного модуля представлено содержание лекционной составляющей разделов. Ниже приведена детализация практической части каждого раздела.

Практикумы, входящие в программу модуля

Раздел 1

Для предсказания, оценивания и управления свойствами конечных произведенных нанотехнологичных продуктов, а также определения области их работы чрезвычайно важно понимать как механизмы, лежащие в основе формирования наноматериалов и наноразмерных систем, так и протекающие в них процессы, обуславливающие особенности работы наносистем.

Для повышения эффективности управления производственными процессами и повышения устойчивости и конкурентоспособности инновационного производственного бизнеса необходимы знания нормативных документов по стандартизации, сертификации и метрологии в наноиндустрии, нормативных документов по составлению технических заданий и технических требований на нанопroduкцию.

В рамках данного раздела рассматриваются терминология и основные понятия, связанные с наноматериалами и нанотехнологиями, основные отличительные особенности материалов, находящихся в наносостоянии.

Практикум 1.1 «Терминология и основные определения в области нанотехнологий»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: показать слушателям необходимость создания системы терминов и определений в области наноиндустрии для унификации терминологии, используемой для наноразмерных объектов и явлений в различных областях науки и техники. Предложить слушателям составить набор терминов и определений



Практикум 1.2 «Свойства наноматериалов»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: ориентировать слушателей на восприятие и понимание основных причин, обуславливающих появление в веществе наносостояния, таких как малые размеры нанообъектов, определяющие большую долю поверхности по отношению к объему частицы и действие поверхностных сил, а также близость размеров частиц к характерным расстояниям: длина пробега электрона, длина экранировки и др. Обратить внимание слушателей на отличие свойств и структуры отдельных нанообъектов от компактированных наноматериалов и наносистем. Познакомить с отличительными особенностями наносостояний материалов и основными параметрами, определяющими свойства нанообъектов. Познакомить с особенностями структуры и свойствами β -BN в наносостоянии (нанотрубки, нанокapsулы, нанокластеры, наночастицы); основными свойствами диэлектрических и проводящих материалов в микро-и нанослоях и факторами, влияющими на эти свойства.

Практикум 1.3 «Термодинамика монослойной пленки»

2 часа аудиторных занятий

Задача: показать слушателям возможность теоретического определения параметров устойчивости наносистем методами термодинамического описания. Выявить зависимость стабильного поведения и функционирования наносистемы от внешних факторов.

Раздел 2

Для повышения эффективности управления производственными процессами, повышения качества производимой продукции из наноструктурированных материалов и повышения устойчивости и конкурентоспособности инновационного производственного бизнеса необходимы знания о методах и технологиях получения нанопорошков, нанослоев, наногетероструктур и компактных наноматериалов, в основе которых лежат различные физические и физико-химические процессы. Интерес к наноразмерным системам обусловлен появлением

новых качеств, которые не удастся реализовать на макроскопическом объемном уровне вещества. Накопившийся опыт по синтезу наночастиц и созданию материалов на их основе, а также прогресс методов и инструментов их диагностики позволяет провести обобщение и наметить пути поиска новых решений в этой инновационной области знаний. В данном разделе основной акцент делается на технологиях получения полупроводниковых наногетероструктур, систем с пониженной размерностью (0D, 1D и 2D), полупроводниковых кластеров и квантовых точек, углеродных наноструктур, а также на технологиях получения оксидных неорганических наноматериалов, нанопорошков и слоистых соединений, покрытий с особыми физико-химическими и механическими свойствами.

Особенность раздела заключается в формировании у обучающихся умений и навыков выбора стратегии разработки продукции на основе наноразмерных систем в условиях дефицита и неопределенности знаний в предметной области.

Практикум 2.1 «Расчет энергии, затрачиваемой при диспергировании материалов до заданного размера частиц»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: ориентировать слушателей при изучении учебного материала на следующие основные положения:

1. Освоение физико-химических представлений получения нанопорошков механическим диспергированием, механо-синтезом, детонационным синтезом, электровзрывом и методом твердофазного разложения.
2. Выявление основных факторов, влияющих на конечные параметры частиц, таких как:
 - термодинамические параметры исходных веществ,
 - механические свойства диспергируемых веществ,
 - технологические параметры (температура, давление, концентрация компонентов, скорость изменения температуры и давления),
 - взаимодействие с компонентами технологических сред (реагентами, инертными газами, легирующими элементами, антиагломерантами и т. п.).



Практикум 2.2 «Оценка параметров структуры компактированных наноматериалов в зависимости от внешних технологических факторов»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: ознакомление с основами обработки наноструктурированных материалов. Изучение технологического оборудования и основных методов получения нанопорошков, нанослоев и компактных наноматериалов.

При чтении учебного материала следует ориентировать слушателей на следующие основные положения:

1. Освоение физико-химических закономерностей, описывающих методы получения компактированных наноматериалов.
2. Выявление основных факторов, влияющих на конечные параметры наноструктурных элементов в компактированных наноматериалах, таких как:
 - термодинамические и механические свойства компактируемых веществ,
 - технологические параметры (температура, давление, концентрация компонентов и др.).

Практикум 2.3 «Определение распределения наночастиц по размерам»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: ознакомление с основами обработки наноструктурированных материалов. Комплектация состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения проекта.

Ориентировать слушателей при изучении учебного материала на следующие основные положения:

1. Усвоение слушателями важности оценки гранулометрического состава нанопорошков и наноструктурированных материалов.
2. Выявление основных факторов, влияющих на гранулометрический состав нанопорошков и наноструктурированных материалов.
3. Ознакомление с основными методами построения распре-

деления частиц по размерам, выявления формы и ориентации структурных компонентов наноматериалов.

Практикум 2.4 «Метод зонной очистки»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: познакомить слушателей с методами очистки наноматериалов на всех этапах получения и возможностях их рационального применения. Комплектация состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения поставленной задачи.

Ориентировать слушателей при изучении учебного материала на следующие основные положения:

1. Усвоение слушателями важности очистки материалов, находящихся в наноструктурированном состоянии в связи со значительной долей поверхности нанообъектов.
2. Выявление основных факторов, влияющих на степень очистки материалов и освоение основных понятий и характеристик, связанных с химической и изотопической чистотой.
3. Ознакомление с основными методами очистки веществ и в частности наноматериалов.

Практикум 2.5 «Химический синтез и физико-химический анализ водной дисперсии наночастиц золота»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: получение опыта синтеза и исследования характеристик наночастиц на классическом примере синтеза коллоидного раствора золота. Ознакомление с основами обработки наноструктурированных материалов. Изучение технологического оборудования и основных методов получения нанопорошков, нанослоев и компактных наноматериалов.

Раздел 3.

Данный раздел посвящен изучению методов и приборов характеристики и диагностики наноматериалов и наносистем в виде нанопорошков, нанослоев, компактных материалов и наногетероструктур с целью повышения эффективности и



качества диагностики исходных и создаваемых проектными компаниями продуктов из наноструктурированных материалов. Производство нанотехнологического продукта не может иметь какого-либо значимого практического применения без привлечения адекватных методов диагностики.

Сердцем раздела является сканирующая зондовая микроскопия, спектроскопия и литография. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) включает в себя различные типы СЗМ, основными из которых являются сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), сканирующая силовая микроскопия (ССМ) и оптическая микроскопия ближнего поля (ОМБП). Открытие СТМ учеными фирмы IBM Г. Бинингом и Г. Рорером было удостоено Нобелевской премией по физике в 1986 г. По мнению многих экспертов, именно появление СТМ перевело нанотехнологические идеи в реальную плоскость.

Практикум 3.1 «Визуализация методом СТМ микро- и наноструктуры поверхности образца мастер-диска, используемого при изготовлении DVD-дисков»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: Сканирующий зондовый микроскоп по праву является базовым инструментом нанотехнологий. Именно поэтому, в первой практической лабораторной работе слушатель знакомится с устройством и работой сканирующего зондового микроскопа «NanoTutor» в режиме СТМ и знакомится с основными параметрами, определяющими свойства нанобъектов, методами и приборами их характеристики. Слушатель приобретает навыки комплектации состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения проекта, знакомится с требованиями к компетенциям технического персонала и требованиями обеспечения безопасности жизнедеятельности персонала, занятого на производстве наноструктурированных изделий. С помощью преподавателя слушатель выполняет визуализацию пик на поверхности DVD-диска. Получение топографии поверхности исследуемого образца проводится в режиме постоянного туннельного тока.

Практикум 3.2 «Визуализация и измерение геометрических параметров питов на поверхности CD-диска из поликарбоната»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: Изучить на практике основы атомно-силовой микроскопии. Изучение конструкции и принципов работы прибора NanoTutor в режиме АСМ. Получить СЗМ изображения образца с помощью преподавателя. Получить самостоятельно практический навык измерений, обработки и представления экспериментальных результатов.

Практикум 3.3 «Создание наноструктуры по цифровому шаблону на поверхности поликарбоната методом динамической силовой литографии»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: Познакомиться с основами обработки наноструктурированных материалов с помощью зондовых технологий. Изучить различные виды литографии, реализуемые с помощью сканирующего зондового микроскопа. Получить практический навык выполнения динамической силовой литографии.

Практикум 3.4 «Изготовление вольфрамовых зондов методом электрохимического травления»

Определение параметров зондов с помощью сканирующего электронного микроскопа и с помощью тестовой TGT решетки в сканирующем силовом микроскопе. Обработка и анализ СЗМ данных, полученных при визуализации объектов различной природы».

2 часа аудиторных занятий.

Задача: Получить практический навык приготовления зонда для СТМ. Изучить источники артефактов в сканирующей зондовой микроскопии. Исследовать основные характеристики пьезоэлектрической керамики СЗМ сканера. Познакомиться с требованиями по стандартизации, сертификации, метрологии в наноиндустрии применительно к СЗМ. Ознакомиться с комплектацией состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения проекта.



Практикум 3.5 «Обработка и представление СЗМ данных, измерение геометрических характеристик на СЗМ изображениях»

2 часа аудиторных занятий.

Задача: Получить практические навыки по обработке и количественному анализу СЗМ изображений. Применить современные программные комплексы для обработки данных, полученных на диагностическом оборудовании.

Раздел 4.

Применение электронных и ионных фокусированных пучков особенно актуально при высокоразрешающих методах нанодиагностики. Применение данных методов диагностики при производстве наноструктурированных материалов позволяет оперативно принимать производственные решения и существенно повысить качество производимой продукции.

Раздел состоит из подразделов, посвященных физическим основам растровой и просвечивающей электронной микроскопии, природе контраста в электронной и ионной микроскопии, методам пробоподготовки. В отдельных темах раздела рассматриваются режимы электронной микроскопии, совмещенные с методами рентгеновского микроанализа, электронной дифрактометрии и спектроскопии. Отдельное внимание уделено современным методам диагностики, основанным на совмещении фокусированных электронных и ионных пучков.

Отдельные темы посвящены изучению современных инструментальных методов рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа, вариантов качественного и количественного анализа элементного и фазового состава вещества, необходимых для проведения аналитических исследований качества создаваемых материалов при производстве продукции из наноструктурированных материалов.

Перечень рекомендуемых источников

Основная литература

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007, – 416 с.
2. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов М.: КомКнига, 2006, – 592 с.
3. Дубровский В.Г. Теоретические особенности технологии полупроводниковых наноструктур, Санкт-Петербург 2006, – 347 с.
4. Новые материалы. Колл. авторов под редакцией Ю.С. Карabasова. – МИСИС. – 2002 – 736 с.

Дополнительная литература

1. Ч. Пул, Ф. Оуэнс Нанотехнологии М.: Техносфера, 2006, – 336 с.



Интернет-источники

1. Поисковая система научно-технической информации ISI Web of knowledge www.isiknowledge.com/
2. База данных РОСПАТЕНТ <http://www.fips.ru/cdf/fips.dll>;
3. База данных US Patent and Trademark office <http://www.uspto.gov/patft/index.html>;
4. Scirus (универсальная поисковая система тех. инф.) www.scirus.com/srsapp/
5. Федеральный Интернет – портал www.portalnano.ru
6. Единый федеральный Интернет-ресурс nano-info.ru/post/853
7. Федеральный отраслевой Интернет-портал www.NanoNewsNet.ru/blog/nikst...nanotekhnologii...
8. Нанотехнологическое общество <http://www.ntsр.info/internet/>
9. РосНаноНет www.RusNanoNet.ru/news/15023/
10. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии www.gost.ru
11. Техническая литература <http://www.tehlit.ru/>

Описание практических работ к базовому вводному модулю



Раздел 1. Введение в терминологию нанотехнологий

Практикум 1.1 «Терминология и основные определения в области нанотехнологий»

Время выполнения практикума: 2 ч. ауд. занятий, 2 ч. самостоятельная работа.

Задача. Показать слушателям необходимость создания системы терминов и определений в области наноиндустрии для унификации терминологии, используемой для наноразмерных объектов и явлений в различных областях науки и техники. Предложить слушателям составить набор терминов и определений, касающихся нанотехнологий и находящихся в обороте их организаций.

Методические рекомендации по выполнению практикума

С методической точки зрения целесообразно ориентировать слушателей на выполнение данного практикума следующим образом:

- Выявить стандарты и другие источники, где приводятся терминология и определения, связанные с тематикой наноразмерных объектов и технологий.
- Предложить проследить хронологию возникновения в научном обороте терминов, относящихся к дисциплинам, в которых рассматриваются частицы малых размеров (коллоидная химия, коллоидные частицы, гели, атомная физика, микрочастицы, химия полимеров, макромолекулы, олигомеры, нанотехнологии, наночастицы, нанокластеры, мезочастицы).

При выполнении практической работы у слушателей должно сформироваться понимание насущной необходимости стандартизации в наноиндустрии.

Практикум 1.2 «Свойства наноматериалов».

Время выполнения практикума: 4 часа аудиторные занятия, 4 часа – самостоятельная внеаудиторная работа.

Задача. Ориентировать слушателей на восприятие и понимание основных причин, обуславливающих появление в веществе наносостояния, таких как малые размеры нанобъектов, определяющие большую долю поверхности по отношению к объему частицы и действие поверхностных сил, а также близость размеров частиц к характерным расстояниям – длина пробега электрона, длина экранировки и др. Обратить внимание слушателей на отличие свойств и структуры отдельных нанобъектов от компактированных наноматериалов и наносистем. Познакомить с отличительными особенностями наносостояний материалов и основными параметрами, определяющими свойства нанобъектов. Познакомить с особенностями структуры и свойствами β -BN в наносостоянии (нанотрубки, нанокапсулы, нанокластеры, наночастицы); основными свойствами диэлектрических и проводящих материалов в микро-и нанослоях и факторами, влияющими на эти свойства.

Методические рекомендации по выполнению практикума

При выдаче задания на практикум «Свойства наноматериалов» рекомендуем:

1. Дать слушателям возможность при проведении практикума самостоятельно определить движущие силы процессов, приводящих материалы в наносостояние. Важно, чтобы слушатели самостоятельно выявили энергетическую предпосылку процессов, происходящих при изменении внутренней структуры нанобъектов вследствие уменьшения размеров.
2. Привести слушателей к пониманию природы критического размера нанобъекта, при котором, в частности, происходит:
 - потеря нанобъектом кристаллической структуры,
 - кристаллизация из жидкой и газовой фазы,
 - переход ферромагнетиков в суперпарамагнитное состояние.



3. При рассмотрении влияния наносостояния на теплоемкость, температуру плавления, магнитные и оптические свойства важно разделить роли размерных и поверхностных факторов.

Рекомендуемый для использования пример лабораторного практикума.

Формирование наночастиц твердой фазы при охлаждении из жидкого состояния.

Цель работы: Оценить критический размер зародыша кристаллов в зависимости от изменения параметров процесса кристаллизации.

Содержание работы

Как известно, равновесие данного фазового состояния (газообразного, жидкого, твердого) системы частиц, например, атомов, оценивается исходя из стремления к минимизации свободной энергии, в частности, свободной энергии Гельмгольца F

$$F = U - TS,$$

где U – внутренняя энергия системы, $S = k \ln W$ – энтропия, k – постоянная Больцмана, W – термодинамическая вероятность существования системы в данном состоянии, T – температура. При увеличении температуры происходит рост внутренней энергии U , но свободная энергия F уменьшается за счет более активного роста энтропии S , причем темп роста S замедляется при переходе от газообразного к твердому состоянию (рис. 1).

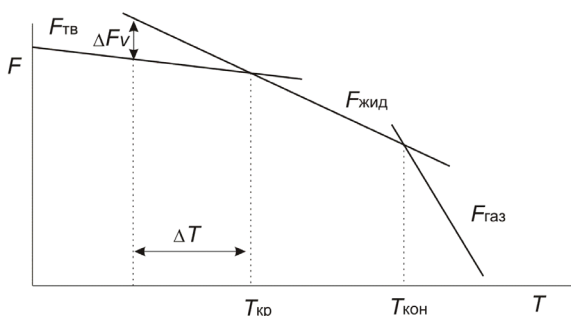


Рис. 1.
Зависимость
свободной энергии F
от температуры.

Точки пересечения кривых изменения F для разного состояния соответствуют T кристаллизации (плавления) и T конденсации (испарения). В точке $T_{кр}$ свободные энергии $F_{ж}$ и $F_{тв}$ равны.

Отсюда

$$U_{ж} - T_{кр} S_{ж} = U_{т} - S_{т} T_{кр}$$

$$U_{ж} - U_{т} = T_{кр} (S_{ж} - S_{т})$$

Разность $U_{ж} - U_{т}$ составляет скрытую теплоту кристаллизации $Q_{кр}$, которая выделяется в процессе кристаллизации.

$$Q_{кр} = T_{кр} (S_{ж} - S_{т})$$

Кристаллизация, как известно, реализуется при некотором переохлаждении ΔT (рис. 1). При этом выигрыш в свободной энергии, возникающий вследствие появления единичного объема, занятого зародышем кристаллической твердой фазы равен

$$\Delta F_v = Q_{кр} \cdot \Delta T / T,$$

где $\Delta T / T_{кр}$ – степень переохлаждения.

В случае образования зародыша кубической формы с ребром R выигрыш в энергии равен $-\Delta F_v \cdot R^3$. С появлением поверхности раздела между зародышем твердой фазы и жидкостью возникает проигрыш энергии $+\gamma_s \cdot 6R^2$, где γ_s – удельная поверхностная энергия на границе твердой фазы.

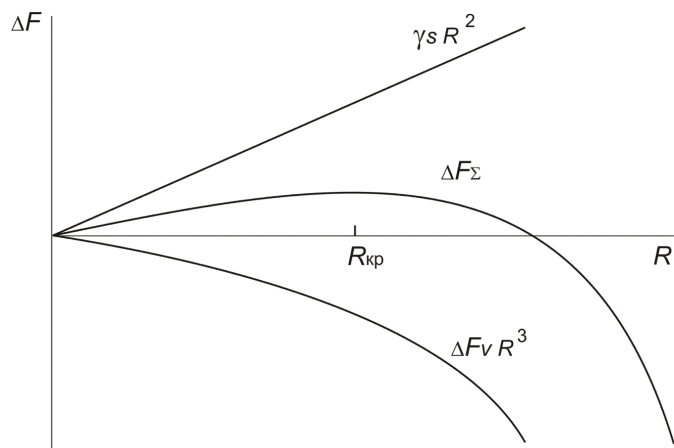
Суммарное изменение свободной энергии при появлении зародыша твердой фазы

$$\Delta F_{\Sigma} = -\Delta F_v \cdot R^3 + \gamma_s \cdot 6R^2$$

Кривая изменения ΔF_{Σ} при изменении размера R является результатом сложения двух кривых, отражающих выигрыш и проигрыш свободной энергии при росте R (рис. 2).



Рис. 2. Условия формирования зародыша твердой фазы критических размеров.



Кривая ΔF_Σ имеет максимум, соответствующий определенному критическому размеру.

$$R_{кр} = 4\gamma_s / \Delta F_v = 4\gamma_s / Q_{кр} \cdot \Delta T / T_{кр}$$

Из анализа соотношения для $R_{кр}$ вытекает, что для уменьшения $R_{кр}$ следует увеличивать степень переохлаждения и уменьшать поверхностную энергию частиц.

Описанная кристаллизация называется самопроизвольной, так как развивается только за счет образования центров кристаллизации. В случае несамопроизвольной кристаллизации зародыши твердой фазы формируются вокруг присутствующих в жидкой фазе постоянных центров кристаллизации (тугоплавкие частицы, стенки сосуда, области сжатия при ультразвуковой обработке).

Данная работа состоит из нескольких этапов, при прохождении которых необходимо:

1. Выбрать материал исследования, форму зародыша твердой фазы, значение скрытой теплоты кристаллизации, значение удельной поверхностной энергии, степень переохлаждения.

2. Составить соотношения, связывающие изменение свободной энергии системы с изменением размера зародыша твердой фазы при самопроизвольной кристаллизации.
3. Составить соотношения формулу для определения критического размера зародыша.
4. Получить графическую зависимость изменения свободной энергии системы от размера зародыша твердой фазы.
5. Получить графическую зависимость изменения критического размера зародыша твердой фазы от степени переохлаждения.
6. Провести краткий анализ полученных результатов, объясняющий результаты на основе представленной теории.
7. Сделать выводы о конкретных параметрах процесса кристаллизации для образования наноразмерных частиц.

В результате работы слушатели должны построить кривую зависимости $R_{кр}$ от степени переохлаждения. Слушатели должны самостоятельно провести краткий анализ результатов. При этом необходимо обратить внимание на следующие вопросы:

- В чем причина формирования зародыша твердой фазы критического размера?
- Как и почему изменяется $R_{кр}$ при изменении параметров процесса кристаллизации ($Q_{кр}$, формы зародыша, $\Delta T / T$, γ_s)?

При написании выводов слушатели должны обратить внимание на следующие вопросы:

- Каковы условия образования наноразмерных частиц при самопроизвольной кристаллизации?
- Какие существуют способы уменьшения зародышей твердой фазы (несамопроизвольная кристаллизация (наночетры кристаллизации, ультразвук, ПАВ)?

Содержание отчета

Отчет предоставляется в электронном виде в виде файла в формате А4. В отчет входит:

- Цель исследования
- Объект исследования
- (Схема установки, при необходимости)
- (Таблица с начальными данными и результатами)



- Полученные формулы и уравнения.
- Графики зависимости.
- Краткий анализ полученных результатов
- Выводы
- Таблица параметров макроматериалов

Практикум 1.3 «Термодинамика монослойной пленки»

Время выполнения практикума: 2 часа аудиторные занятия, 4 часа – самостоятельная внеаудиторная работа.

Задача. Показать слушателям возможность теоретического определения параметров устойчивости наносистем методами термодинамического описания. Выявить зависимость стабильного поведения и функционирования наносистемы от внешних факторов.

Методические рекомендации по выполнению практикума

Следует упростить данный материал в соответствии с уровнем восприятия обучающимися. Показать качественные оценки, сделать основные выводы. Рассмотрим формирования новой фазы на поверхности твердого тела с точки зрения термодинамических свойств монослойной пленки, представляющей собой систему взаимодействующих адсорбированных атомов (адатомов). Будем считать, что адатомы находятся в идентичных узлах двумерной периодической решетки идеальной поверхности. Влияние ступеней, примесей, неоднородностей, шероховатостей, микротрещин не учитывается. В случае сильно локализованной адсорбции свойства монослойной пленки естественно рассматривать в рамках модели двумерного решеточного газа. В этой модели каждому узлу двумерной периодической решетки i сопоставляется число заполнения α_i , которое может принимать два значения: $\alpha_i=0$ или 1 в зависимости от того, есть ли в данном узле адатом. Потенциал парного взаимодействия между адатомами V_{ij} зависит от радиус-вектора R_{ij} . В модели решеточного газа V_{ij} есть потенциал притяжения, а отталкивание учитывается запретом на нахождение двух и более частиц в одном узле.

Термодинамические свойства двумерного решеточного газа с заданными значениями температуры T , числа узлов N_0 и химического потенциала μ (большой канонический ансамбль) полностью определяются конфигурационной частью статистической суммы где k_B – постоянная Больцмана. В случае монослойной пленки T есть температура поверхности, $S=N_0\sigma$ – площадь поверхности, σ – площадь, занимаемая одним адатомом на поверхности.

Введем величину $\theta=\langle\alpha\rangle=N/N_0$ – среднее заполнение поверхности адатомами, N – полное число адатомов на поверхности. Поверхностная плотность адатомов n связана с заполнением как $n=\theta/\sigma$. Заполнение θ определяется из статистической суммы (1.1) по известной формуле, где производная берется при постоянной температуре.

$$\Xi = \sum_{\alpha_i=0,1} \exp\left(\frac{\mu}{k_B T} \sum_{i=1}^{N_0} \alpha_i - \frac{1}{k_B T} \sum_{(i,j)} V_{ij} \alpha_i \alpha_j\right) \quad (1.1)$$

Простейшим способом приближенного расчета статистической суммы, позволяющим получить содержательную информацию о фазовом переходе, является приближение среднего поля. В приближении среднего поля энергия межчастичного взаимодействия в (1.1) заменяется самосогласованным выражением.

$$\theta = \frac{k_B T}{N_0} \left(\frac{\partial \ln \Xi}{\partial \mu} \right)_T \quad (1.2)$$

Величина называется константой взаимодействия. При подстановке (1.3) в (1.1) статистическая сумма факторизуется, как и в отсутствии взаимодействия, однако содержит зависимость от θ :

Используя (1.5) в (1.2), получаем самосогласованное выражение для химического потенциала монослойной пленки. Из (1.6) видно, что $\mu(\theta)$ монотонно возрастает с ростом θ при $\phi < 4$, имеет перегиб в точке $\theta=1/2$ при $\phi=4$ и петлю Ван-дер-Ваальса при $\phi > 4$ с локальным максимумом и минимумом в точках.



$$-\frac{1}{k_B T} \sum_{(i,j)} V_{ij} \alpha_i \alpha_j \equiv \varphi \theta \sum_{i=1}^{N_0} \alpha_i \quad (1.3)$$

$$\varphi \equiv \frac{V_0}{k_B T}; \quad V_0 \equiv -\sum_i V_{0i} \quad (1.4)$$

$$\Xi = \left[1 + \exp\left(\frac{\mu}{k_B T} + \varphi \theta\right) \right]^{N_0} \quad (1.5)$$

Таким образом, значение $\phi=4$ соответствует критической температуре T_c , ниже которой возможно сосуществование двух фаз пленки с различной поверхностной плотностью. Для значений температуры, плотности и химического потенциала в критической точке из (1.6) получаем хорошо известные результаты.

$$\frac{\mu}{k_B T} = -\varphi \theta + \ln\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) \quad (1.6)$$

В равновесной термодинамике волнообразный участок зависимости $\mu(\theta)$ при $T < T_c$ заменяется горизонтальным отрезком, соответствующей скачку плотности адатомов при фазовом переходе. Положение этого отрезка определяется правилом

$$\theta_{1c} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4}{\varphi}} \right); \quad \theta_{2c} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{\varphi}} \right) \quad (1.7)$$

площадей Максвелла, согласно которому площади петель $\mu(\theta)$ над и под равновесным значением химического потенциала μ_e должны быть равны. В случае двумерной пленки правило Максвелла означает, что в равновесии должны быть равны не только химические потенциалы, но и поверхностные энергии обеих фаз [13,14]. Рассматривая химический потенциал как

$$T_c = \frac{V_0}{4k_B}; \quad \theta_c = 1/2; \quad \mu_c = -\frac{V_0}{2} \quad (1.8)$$

функцию отклонения заполнения от его критического значения $\Delta\theta = \theta - 1/2$, с учетом последней формулы (1.8) из (1.6) следует Зависящая от $\Delta\theta$ функция в правой части этого уравнения – нечетная функция $\Delta\theta$, интеграл от которой по симметричному промежутку $(1/2 - \Delta\theta; 1/2 + \Delta\theta)$ равен нулю. Поэтому правило Максвелла автоматически выполняется, когда равновесное значения химических потенциалов разреженной и плотной фазы адатомов равны химическому потенциалу в критической точке:

$$\frac{\mu}{k_B T} = \frac{\mu_c}{k_B T} - \varphi \Delta\theta + \ln \left(\frac{1/2 + \Delta\theta}{1/2 - \Delta\theta} \right) \quad (1.9)$$

Равновесные значения плотности разреженной и плотной фаз определяются из условия $\mu(\theta) = \mu_c$. В соответствии с (1.9), равновесные заполнения определяются выражениями где $\Delta\theta_e$ является решением уравнения.

$$\mu_e = \mu_c \quad (1.10)$$

Графики отклонения химического потенциала монослойной пленки от его равновесного значения в зависимости от заполнения θ при $T = T_c$ и $T < T_c$ приведены на Рис.1. Согласно (1.7), (1.11), равновесные заполнения θ_{1e} , θ_{2e} и экстремумы химического потенциала θ_{1s} , θ_{2s} расположены симметрично относительно точки $1/2$.

Как уже отмечалось, в равновесии петля Ван-дер-Ваальса на Рис.1 не имеет физического смысла и должна быть заменена горизонтальным отрезком. Однако, при исследовании возможных неравновесных состояний пленки и сценариев кинетики фазового перехода вид кривой на Рис.1 играет важную роль.

$$\theta_{1e} = 1/2 - \Delta\theta_e; \quad \theta_{2e} = 1/2 + \Delta\theta_e \quad (1.11)$$

$$\frac{1}{\Delta\theta_e} \ln \left(\frac{1/2 + \Delta\theta_e}{1/2 - \Delta\theta_e} \right) = \varphi \quad (1.12)$$

В этом случае области $\theta_{1e} < \theta < \theta_{1s}$ и $\theta_{2s} < \theta < \theta_{2e}$ соответствуют метастабильным состояниям пленки. В области $\theta_{1e} < \theta < \theta_{1s}$



формирование пленки идет через образование зародышей – островков плотной фазы. Область $\theta_{1s} < \theta < \theta_{2s}$, называемая спинодальной областью (или просто спинодалью), отвечает абсолютно неустойчивым состояниям пленки. Исходное пространственно – однородное состояние, попавшее внутрь спинодали, распадается на фазы с заполнением θ_{1e} и θ_{2e} .

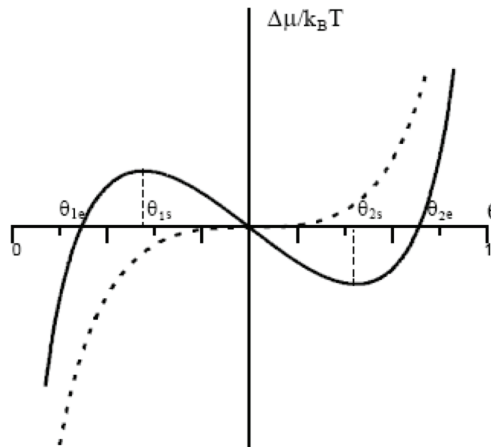


Рис.1. График зависимости химического потенциала от θ при $\varphi = 4$ (пунктирная линия) и $\varphi = 5$ (сплошная линия)

В области $\theta_{1e} < \theta < \theta_{1s}$ мерой метастабильности системы адатомов является пересыщение где n – текущая и $n_{eq} \equiv \theta_{1e}/\sigma$ – равновесная концентрация адатомов. Очевидно, величина есть максимально возможное пересыщение адатомов, по достижении которого система переходит в область спинодали.

При достаточно низких температурах поверхности ($T < 0.5T_c$) из (1.11), (1.12) следуют простые выражения для заполнения разреженной и плотной фазы. При этом заполнение разреженной фазы меньше 0.02, а плотной фазы – больше 0.98. Разреженная фаза представляет собой идеальный двумерный «газ» адатомов, а плотная фаза – островки двумерного кристалла. Такая ситуация характерна для эпитаксиального роста пленок.

$$\zeta = n/n_e - 1 \quad (1.13)$$

$$\zeta_{\max} = \theta_{1s} / \theta_{1e} - 1$$

Сравнивая (1.14) с экспериментальными данными по равновесной плотности адатомов, можно оценить значение критической температуры. Обычно критическая температура адсорбционных слоев превосходит 2000 К. При температурах, характерных, например, для выращивания пленок GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии ($T < 600-6500^\circ\text{C}$), соотношения (1.14) всегда выполнены.

$$\theta_{1e} = \exp\left(-\frac{2T_c}{T}\right); \quad \theta_{2e} = 1 - \exp\left(-\frac{2T_c}{T}\right) \quad (1.14)$$

Для достижения плотности адатомов, находящейся вблизи или внутри спинодали, можно произвести низкотемпературное осаждение (например, 0.5 монослоев материала – количества, всегда попадающего внутрь спинодали). При этом диффузия будет «заморожена» и материал будет распределен по поверхности примерно равномерно. После разогрева поверхности до температуры T нанесенное количество материала будет расслаиваться на фазы с заполнениями $\theta_{1e}(T)$ и $\theta_{2e}(T)$ по механизму, заведомо отличному от классического.

При выполнении заданий на практическую и самостоятельную работу у слушателей формируется понимание зависимости стабильности функционирования и существования наносистем в зависимости от внешних факторов.



Раздел 2. Основные методы и технологии производства наноструктурированных материалов

Практикум 2.1 «Расчет энергии, затрачиваемой при диспергировании материалов до заданного размера частиц»

Время выполнения практикума: 2 ч. – аудиторная работа, 2 ч – самостоятельная работа.

Задача. Ориентировать слушателей при изучении учебного материала на следующие основные положения:

1. Освоение физико-химических представлений получения нанопорошков механическим диспергированием, механо-синтезом, детонационным синтезом, электровзрывом и методом твердофазного разложения.
2. Выявление основных факторов, влияющих на конечные параметры частиц, таких как:
 - термодинамические параметры исходных веществ,
 - механические свойства диспергируемых веществ,
 - технологические параметры (температура, давление, концентрация компонентов, скорость изменения температуры и давления),
 - взаимодействие с компонентами технологических сред (реагентами, инертными газами, легирующими элементами, антиагломерантами и т. п.).

Методические рекомендации по выполнению практикума

При выдаче задания на практикум «Расчет энергии, затрачиваемой при диспергировании материалов до заданного размера частиц» рекомендуем:

1. Ориентировать слушателей на оценку энергии, затрачиваемой при механическом диспергировании, выявляя долю энергии затраченной на получение новых поверхностей и энергии пластического деформирования.
2. Привести обучаемых к пониманию причин увеличения

энергии, затрачиваемой на механическое диспергирование, при уменьшении размера частиц.

3. Оценить величину энергии, затрачиваемую на диспергирование материалов с разными характеристиками физико-механических свойств.

«Оценка энергии, затрачиваемой при диспергировании материалов до заданного размера частиц»

Цель: Определить общий уровень удельной энергии, затрачиваемой на диспергирование.

Содержание

При механическом диспергировании твердых тел энергия затрачивается на следующие процессы:

- образование новых поверхностей при раздроблении,
- колебания в твердом теле приводящие к рассеянию энергии (тепло, акустические волны),
- дефекты решетки,
- трение между частицами и окружающей средой (другими частицами, дробящим инструментом, стенками мельницы).

Для расчета затрат энергии (без учета трения) используем закон Кирпичева – Кика

$$\Omega = C \ln(s/s_0),$$

где Ω – удельная энергия (на единицу объема), сообщенная твердому телу на протяжении всего процесса дробления, C – постоянная, s_0 – удельная поверхность (на единицу объема) твердого тела до дробления, s – удельная поверхность (на единицу объема) твердого тела после дробления.

Постоянная C имеет смысл удельной энергии, затрачиваемой на один цикл дробления

$$C = \omega / \ln n,$$

где ω – удельная энергия, сообщаемая твердому телу за один цикл дробления,



$n = N^{1/3}$, где N – число частей, на которые разделяется твердое тело за один цикл.

$$\omega = \sigma_{\text{теор}}^2/E,$$

где $\sigma_{\text{теор}}$ – теоретическая прочность твердого тела, E – модуль Юнга, при этом $\sigma_{\text{теор}} \approx 0,1 E$.

Таким образом

$$\Omega = ((\sigma_{\text{теор}}^2/E)/\ln N^{1/3}) \cdot \ln(s/s_0)$$

Данная работа состоит из нескольких этапов, при прохождении которых необходимо:

1. Выбрать случайным образом $\sigma_{\text{теор}}$, E , N , s_0 , s .
2. Составить соотношение для зависимости Ω с учетом выбранных параметров.
3. Рассчитать и построить зависимости $\Omega = f(E, N, s/s_0)$ для заданных параметров.
4. Рассчитать число циклов дробления до получения s от начального значения s_0 .
5. Провести краткий анализ полученных результатов, объясняющий результаты на основе представленной теории.
6. Сделать выводы о возможности использования метода механического диспергирования твердых тел.

Содержание отчета

- Отчет предоставляется в электронном виде в виде файла в формате rtf. При необходимости выводится на печать. В отчет входит:
 - Цель исследования.
 - Объект исследования.
 - Схема установки (при необходимости).
 - Полученные формулы и уравнения.
 - Таблица с начальными данными и результатами.
 - Графики зависимости.
 - Краткий анализ полученных результатов.
 - Выводы.

Практикум 2.2 «Оценка параметров структуры компактированных наноматериалов в зависимости от внешних технологических факторов»

Время выполнения практикума: 2 ч. ауд. работы, 2 ч. самостоятельной работы.

Задача. Ознакомление с основами обработки наноструктурированных материалов. Изучение технологического оборудования и основных методов получения нанопорошков, нанослоев и компактных наноматериалов.

При чтении учебного материала следует ориентировать слушателей на следующие основные положения:

1. Освоение физико-химических закономерностей, описывающих методы получения компактированных наноматериалов.
2. Выявление основных факторов, влияющих на конечные параметры наноструктурных элементов в компактированных наноматериалах, таких как:
 - термодинамические и механические свойства компактируемых веществ,
 - технологические параметры (температура, давление, концентрация компонентов и др.)

Методические рекомендации по выполнению практикума:
«Изменение размеров зерен компактированных наноматериалов в зависимости от параметров процесса нагрева»

Цель: Определить влияние термодинамических и технологических факторов на структуру поликристалла.

Содержание

Как известно, поликристаллические материалы находятся в метастабильном (относительно стабильном) состоянии. При определенных условиях, связанных, в первую очередь, с повышением температуры, поликристаллы начинают переходить в более стабильное состояние. Это сопровождается снижением концентрации дефектов структуры, в частности, уменьшением



суммарной площади границ зерен и соответствующим увеличением их размеров. При этом зерна, имеющие малые размеры, будут уменьшаться и исчезать, а большие увеличиваться. Особенно важным это становится в случае нанокристаллического состояния, где зеренная структура менее стабильна, чем у обычных поликристаллов.

Сравнительно стабильными являются зерна с числом сторон в сечении зерна равном 6 (рис.1а), так как при этом они имеют прямые границы с углами между ними 120° .

Растущими являются зерна с числом сторон в сечении зерна больше 6 (рис.1б), так как при этом они имеют вогнутые границы, сдвигающиеся в сторону увеличения зерна (границы стремятся выпрямиться, угол между ними приближается к 120°).

Уменьшающимися в размерах будут зерна с числом сторон в сечении зерна меньше 6 (рис.1в), так как при этом они имеют выпуклые границы, сдвигающиеся в сторону уменьшения зерна (граница стремится выпрямиться).

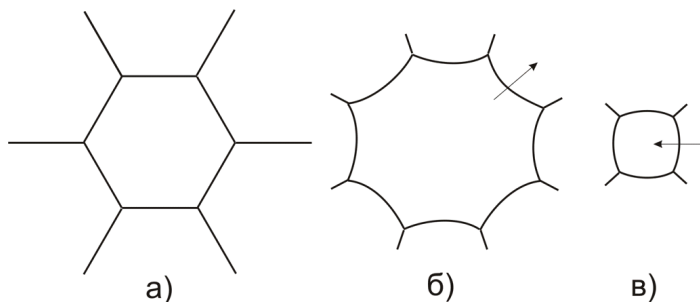


Рис. 1. Границы зерен
а) не перемещаются, б) раздвигаются, в) сдвигаются.

Если принять скорость сдвига границ обратно пропорциональной диаметру зерна и прямо пропорциональной удельной поверхностной энергии границ γ , то

$$dD/dt = K \cdot \gamma / D,$$

где t – время, K – коэффициент, зависящий от температуры T , энергии активации процесса $U_{акт}$

$$K = A \exp (-U_{\text{акт}}/kT)$$

В результате интегрирования получаем

$$D^2 = D_0^2 + K \cdot \gamma \cdot t,$$

где D – размер растущих зерен, D_0 – размер исходных зерен.

Данная работа состоит из нескольких этапов, при прохождении которых необходимо:

1. Выбрать случайным образом D_0 , $U_{\text{акт}}$, A , γ , t .
2. Составить соотношение для зависимости $D = f(E, N, D_0, U_{\text{акт}}, A, \gamma, t)$ с учетом выбранных параметров.
3. Рассчитать и построить зависимости $D = f(E, N, D_0, U_{\text{акт}}, A, \gamma, t)$ для заданных параметров.
4. Определить время отжига t до стабилизации размера зерен при различных параметрах процесса.
5. Провести краткий анализ полученных результатов, объясняющий результаты на основе представленной теории.
6. Сделать выводы о влиянии параметров процесса на рост зерен при нагреве.

Содержание отчета

Отчет предоставляется в электронном виде в виде файла в формате rtf. При необходимости выводится на печать. В отчет входит:

- Цель исследования
- Объект исследования
- Схема установки (при необходимости).
- Полученные формулы и уравнения.
- Таблица с начальными данными и результатами.
- Графики зависимости.
- Краткий анализ полученных результатов
- Выводы



Практикум 2.3 «Определение распределения наночастиц по размерам»

Время выполнения практикума: 2 ч. ауд. работы, 2 ч. самостоятельной работы.

Задача. Ознакомление с основами обработки наноструктурированных материалов. Комплектация состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения проекта.

Ориентировать слушателей при изучении учебного материала на следующие основные положения:

1. Усвоение слушателями важности оценки гранулометрического состава нанопорошков и наноструктурированных материалов.
2. Выявление основных факторов, влияющих на гранулометрический состав нанопорошков и наноструктурированных материалов.
3. Ознакомление с основными методами построения распределения частиц по размерам, выявления формы и ориентации структурных компонентов наноматериалов.

Методические рекомендации по выполнению практикума

При выдаче задания на практикум «Определение распределения наночастиц по размерам» рекомендуем:

1. Ориентировать слушателей на важность выявления гранулометрического состава наноматериалов, так как большой разброс в размерах зерен, частиц или пор наноструктурированного материала, приводит к резкому ухудшению эксплуатационных свойств, в частности, механических.
2. Привести слушателей к пониманию необходимости принятия мер для точной (по возможности) оценки гранулометрического состава материалов.

Рекомендуемый для использования пример практикума:

Седиментационный метод исследования наночастиц.

Цель: Определить параметры наночастиц, используя седиментационный метод.

Содержание

Используя метод осаждения частиц в вязкой среде под действием силы тяжести. Определяют распределение по размерам наночастиц величиной более 50 нм.

Метод основан на измерении времени t осаждения частиц данного размера в жидкости с вязкостью η при их перемещении на высоту H . При этом возникает возможность, постоянно взвешивая осадок, оценить распределение частиц по массе. Возможно также выявление распределения частиц по массе в зависимости от высоты расположения частиц.

Вследствие осаждения частиц возникает градиент концентрации частиц по высоте, что вызывает их диффузионный поток, направленный в сторону устранения градиента. При равенстве встречных потоков седиментации и диффузии устанавливается равновесие, по которому формируется распределение частиц по высоте, сходное с распределением воздуха по высоте в земной атмосфере.

Поток седиментации рассчитывается по формуле

$$I_c = nH/t,$$

где n – концентрация частиц.

При условии малой постоянной скорости осаждения v сила сопротивления движению малой сферической частицы радиусом R обеспечивается силой трения $F_{тр}$, равной силе тяжести F_t с учетом поправки на выталкивающую, архимедову силу

$$\begin{aligned} F_{тр} &= 6\pi\eta R H/t \\ F_t &= g \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho - \rho_{ж}) \\ 6\pi\eta R H/t &= g \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho - \rho_{ж}) \\ R &= (9\eta H / (2gt (\rho - \rho_{ж})))^{0,5} \end{aligned}$$

Скорость осаждения равна

$$H/t = mg (\rho - \rho_{ж}) / (\rho 6\pi R \eta)$$



Уравнение Фика для диффузионного потока

$$I_d = (kT/6\pi R\eta) (dn/dH)$$

Из равенства диффузионного и седиментационного потоков можно получить концентрацию частиц n в зависимости от массы m на разной высоте H , которая подчиняется уравнению Лапласа-Перрена

$$\ln n_0/n = (mgH (\rho - \rho_{ж})/(\rho kT))$$

В зависимости от радиуса R , высоты H , плотности материала частицы ρ , плотности жидкой среды $\rho_{ж}$ можно определить концентрацию частиц n

$$n = n_0 \exp(-(mgH (\rho - \rho_{ж})/(\rho kT))$$

Данная работа состоит из нескольких этапов, при прохождении которых необходимо:

3. Получить случайным образом плотность материала частиц ρ , жидкой среды $\rho_{ж}$ и ее вязкость η , ряд радиусов частиц R .
4. Составить формулу для зависимости радиуса частиц R от скорости осаждения H/t с учетом выбранных параметров $R = R(H/t)$. Рассчитать величины H/t для заданных значений R .
5. Вывести уравнение для зависимости концентрации n частиц $n = n(n_0, R, H, \rho, \rho_{ж}, k, T)$
6. Построить зависимость $n = n(H)$ для заданных значений R
7. Провести краткий анализ полученных результатов, объясняющий результаты на основе представленной теории,
8. Сделать выводы возможности использования метода седиментации для оценки параметров нанокластеров.

Содержание отчета

Отчет предоставляется в электронном виде в виде файла в формате rtf. При необходимости выводится на печать. В отчет входит:

- Цель исследования
- Объект исследования
- (Схема установки, при необходимости)

- (Таблица с начальными данными и результатами)
- Полученные формулы и уравнения.
- Графики зависимости.
- Краткий анализ полученных результатов
- Выводы

Практикум 2.4 «Метод зонной очистки»

Время выполнения практикума: 2 ч. ауд. занятий, 2 ч. самостоятельной работы.

Задача. Познакомить слушателей с методами очистки нано-материалов на всех этапах получения и возможностях их рационального применения. Комплектация состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения поставленной задачи.

Ориентировать слушателей при изучении учебного материала на следующие основные положения:

1. Усвоение слушателями важности очистки материалов, находящихся в наноструктурированном состоянии в связи со значительной долей поверхности нанообъектов.
2. Выявление основных факторов, влияющих на степень очистки материалов и освоение основных понятий и характеристик, связанных с химической и изотопической чистотой.
3. Ознакомление с основными методами очистки веществ и в частности наноматериалов.

Методические рекомендации по выполнению практикума

При выдаче задания на практикум «Методы зонной очистки» рекомендуем:

1. Ориентировать слушателей на важность очистки наноматериалов, так как при работе материалов в экстремальных условиях, например, при повышенных температурах наличие малого количества нежелательных примесей приводит к резкому ухудшению эксплуатационных свойств материалов.
2. Привести слушателей к пониманию необходимости при-



нения мер рациональной очистки наноструктурированных материалов.

Рекомендуемый для использования пример практикума: «Распределение примесей по длине слитка при зонной плавке».

Цель: Определить степень очистки слитка при зонной плавке.

Содержание

При зонной плавке (рис.1) происходит плавление в зоне, которая постепенно перемещается вдоль образца. Для очистки образца от примесей необходимо, чтобы при перемещении расплавленной зоны они оставались в жидкой фазе. Это может быть обеспечено, если растворимость примесей в жидкой фазе значительно больше, чем твердой.

Соотношение между растворимостями описывается коэффициентом распределения примеси k , где $C_{ТВ}$, $C_{Ж}$ – предельная концентрации примеси в твердой и жидкой фазах.

$$k = \frac{C_{ТВ}}{C_{Ж}}$$

В равновесных условиях

$$k = k_0$$

Очистка образца происходит, если $k_0 < 1$.

Введем следующие дополнительные обозначения: C_0 – начальная концентрация примеси в слитке, L – общая длина рафинируемого слитка, l – ширина расплавленной зоны.

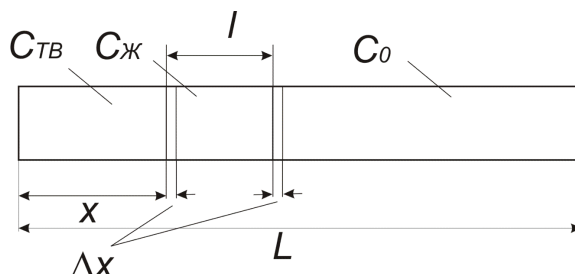


Рис.1. Схема процесса зонной плавки

Процесс распределения примеси при зонной плавке рассмотрим при следующих допущениях:

- большая скорость диффузии примеси в жидкой фазе,
- в твердой фазе диффузия примеси ничтожно мала.

Пусть расплавленная зона, начало которой находится на расстоянии x от левого конца слитка переместится вправо на малое расстояние Δx . Тогда справа от зоны, имеющей концентрацию СЖ, расплавится бесконечно тонкий слой, толщиной Δx с начальной концентрацией примеси C_0 , а слева от зоны затвердеет такой же слой Δx с концентрацией в нем $C_{ТВ}$. При этом концентрация примеси в жидкой зоне увеличится на $\Delta C_{Ж}$.

Уравнение баланса примеси в слитке будет иметь вид:

$$C_0 \cdot \Delta x - C_{ТВ} \cdot \Delta x = l \cdot \Delta C_{Ж}$$

По мере перемещения жидкой зоны концентрация примеси в ней будет возрастать, приближаясь предельной растворимости. При этом концентрация примеси в твердой фазе после кристаллизации в среднем будет уменьшаться. Однако по мере увеличения x происходит насыщение жидкой фазы примесью, которое приводит к росту концентрации в твердой фазе (рис.2).

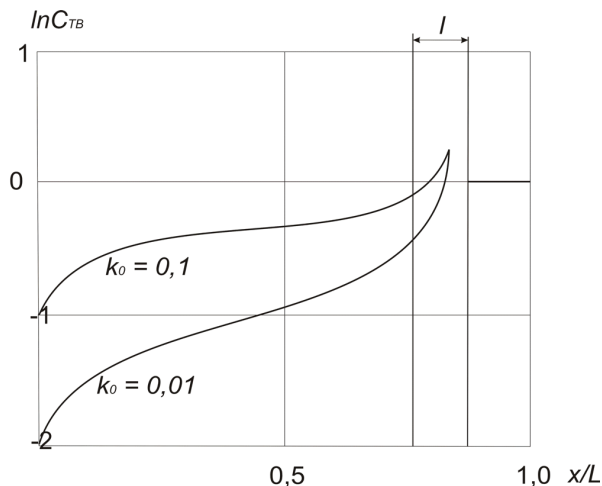


Рис.2. Схема распределения примеси по длине слитка при зонной плавке после одного прохода расплавленной зоны ($C_0 = 1$).



Можно показать, что после одного прохода

$$C_{TB} = C_0 \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{k_0 \cdot x}{l}\right)$$

Для увеличения степени рафинирования необходимо увеличивать число проходов. Число проходов n , при котором распределение примеси приближается к предельному, примерно равно

$$n = 2 \cdot \frac{L}{l} + 2 \quad (6.24)$$

Факторы, влияющие на степень очистки при зонной плавке

Ширина зоны расплавленного металла.

Чем шире зона плавки l , тем за меньшее число проходов достигается конечное распределение, но степень очистки при этом уменьшается. Чем уже зона, тем за большее число проходов достигается равновесное распределение примеси, но степень очистки выше. Поэтому для увеличения степени очистки при первых проходах используют широкую зону, а при последних – узкую.

Скорость движения расплавленной зоны.

На границе кристаллизации образуется тонкий диффузионный слой ($1 \div 103$ мкм) с повышенной концентрацией примеси. При этом рост скорости перемещения расплавленной зоны приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя и соответствующего увеличению в нем концентрации примеси. Это предполагает повышение концентрации примеси и в твердой фазе, поэтому используют небольшие скорости движения расплавленной зоны ($10 - 11$ мм/мин).

Однородность распределения примеси в жидкой фазе

Для увеличения рафинирования производят перемешивание в расплавленной зоне, в частности, токами высокой частоты.

Температура расплавленной зоны

При повышении температуры расплава ухудшаются условия кристаллизации, что ведет к снижению степени очистки, поэтому температура расплава должна быть оптимизирована.

Введение дополнительного компонента

Дополнительный компонент вводится с целью образования с примесью нерастворимого в твердой фазе химического соединения.

Так, для очистки Al от примеси Si вводится Mg, образующий соединение Mg_2Si , не растворимое в твердом Al.

Данная работа состоит из нескольких этапов, при прохождении которых необходимо:

1. Выбрать случайным образом коэффициент k_0 , n , C_0 , CTB , l .
2. Составить уравнение для зависимости CTB от k_0 , CTB , l с учетом выбранных параметров.
3. Построить зависимость $\ln CTB = f(x/L)$ для заданных параметров.
4. Установить число проходов, необходимое для очистки твердой фазы до заданного значения CTB .
5. Провести краткий анализ полученных результатов, объясняющий результаты на основе представленной теории.
6. Сделать выводы возможности использования метода зонной плавки для очистки исходных компонентов наноматериалов.

Содержание отчета

Отчет предоставляется в электронном виде в виде файла в формате rtf. При необходимости выводится на печать. В отчет входит:

- Содержание отчета
- Отчет предоставляется в электронном виде в виде файла в формате rtf. При необходимости выводится на печать. В отчет входит:
 - Цель исследования.
 - Объект исследования.
 - Схема установки (при необходимости).
 - Полученные формулы и уравнения.
 - Таблица с начальными данными и результатами.
 - Графики зависимости.
 - Краткий анализ полученных результатов



Практикум 2.5 «Химический синтез и физико-химический анализ водной дисперсии наночастиц золота»

Время выполнения практикума: 2 часа аудиторные занятия, 2 часа – самостоятельная внеаудиторная работа.

Задача

Получение опыта синтеза и исследования характеристик наночастиц на классическом примере синтеза коллоидного раствора золота. Ознакомление с основами обработки наноструктурированных материалов. Изучение технологического оборудования и основных методов получения нанопорошков, нанослоев и компактных наноматериалов.

Методические рекомендации по выполнению практикума

Данное задание позволяет слушателям непосредственно провести и проконтролировать процесс синтеза наночастиц и исследовать характеристики и поведение наноразмерной системы – водной дисперсии наночастиц золота.

При проведении синтеза наноразмерной системы слушатели должны получить навыки и представление об основных этапах химического конденсационного способа получения наночастиц, а также возможностях управления и контроля этого процесса.

С методической точки зрения целесообразно построить практикум в следующей последовательности:

1. Провести инструктаж по технике безопасности нахождения в химической лаборатории.
2. Провести инструктаж по работе с оборудованием, используемым в работе.
3. Выдать необходимые реактивы и лабораторную посуду.
4. Проговорить план проведения эксперимента с указанием
5. моментов, на которые необходимо обратить особое внимание.
6. В процессе выполнения работы сопровождать наблюдаемые эффекты комментариями и пояснениями.
7. Отобранные в разные моменты проведения синтеза пробы

реакционной смеси измерить на анализаторе размера частиц и построить соответствующую зависимость.

8. В качестве самостоятельной работы предложить включить в отчет по проделанной работе литературный обзор методов получения наночастиц золота различной морфологии и размера и способов их применения.

При выполнении практикума слушатели должны получить навыки проведения синтеза наночастиц химическим способом, а также анализа распределения частиц по размеру методом фотонной корреляционной спектроскопии. Также важной особенностью данного практикума является возможность почувствовать отклик системы на изменение параметров синтеза путем варьирования концентрации компонентов, температуры реакционной смеси, ее pH и т.д. Для достижения поставленных целей, можно рекомендовать следующие практические действия:

1. Самостоятельное формирование слушателями схемы синтеза и программы отбора проб, которая обсуждается с преподавателем перед проведением синтеза с обоснованием предложенных шагов.
2. Проведение синтеза наночастиц золота по намеченной программе.
3. Анализ пределов устойчивости полученной дисперсии путем варьирования характера среды.

Рекомендуется для проведения настоящего практикума следующая схема проведения синтеза сферических наночастиц золота, получаемых восстановлением тетрахлорауровой кислоты цитратом натрия.

Введение

Перед выполнением практикума рекомендуется кратко изложить историю синтеза и использования коллоидного золота. Выделить свойства, отличающие полученные частицы от объемного материала. Особое внимание уделить каталитическим, магнитным, оптическим свойствам, стабильности, применению в медицине и безопасности коллоидных растворов золота для биологических систем. Также необходимо упомянуть, что кол-



лоидный раствор золота, благодаря отсутствию токсичности и хорошей воспроизводимости результата является замечательной модельной системой, на которой удобно демонстрировать химические методы синтеза и методы физико-химического анализа наноразмерных систем.

Цель практикума

Синтез водной дисперсии сферических наночастиц золота и исследование их распределения по размеру методом динамического светорассеяния.

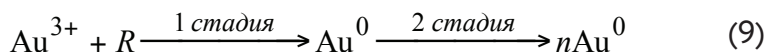
Необходимое оборудование

- магнитная мешалка с подогревом;
- колба Эрленмейера на 200 мл;
- два стеклянных стаканчика на 50 мл;
- набор пипеток на 2 и 5 мл;
- набор пластиковых кювет для проведения анализа методом динамического светорассеяния;
- два пузырька из темного стекла с крышкой на 25 мл;
- набор пробирок со штативом;
- магнитик в хемо-термостойкой оболочке для магнитной мешалки.

Исходные компоненты

- дистиллированная вода;
- 0.0001 М раствор тетрахлорауровой кислоты (HAuCl_4);
- 0.004 М раствор цитрата натрия ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$);
- 0.5 М раствор гидроксида натрия (NaOH);
- 0.2 М раствор соляной кислоты (HCl);
- лакмусовая бумага.

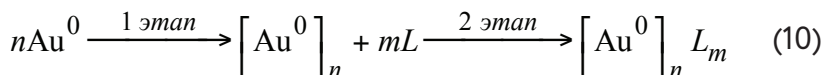
Описание процесса синтеза: для химического синтеза наночастиц золота химическим способом обычно применяют следующую окислительно-восстановительную реакцию:



где R – восстановитель.

Первая стадия реакции (9) соответствует элементарному акту окисления-восстановления. В качестве исходного вещества используют тетрахлорауровую кислоту $\text{HAuCl}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. В качестве восстановителей могут выступать различные реагенты: водород и водородсодержащие соединения, фосфор, цитрат натрия, гидразин, спирты, этиленгликоль, крахмал, глюкоза, аскорбиновая кислота и др. Восстановление часто проводят в присутствии стабилизирующих органических веществ – лигандов, применение которых кроме стабилизирующего фактора иногда приводит к появлению/усилению полезных свойств (каталитических, транспортных, селективных и др.) получаемого продукта.

На второй стадии реакции (9) также можно выделить два этапа:



где L – лиганды.

Первый этап второй стадии реакции (9) соответствует росту наночастицы. При этом лиганды формально не участвуют в процессе, однако, их присутствие определяет размер частиц и придание им соответствующей формы. На втором этапе происходит окончательная стабилизация наночастицы.

Кинетические параметры реакций (9) и (10) зависят от природы восстанавливающего агента и условий протекания синтеза.

В настоящем практикуме для синтеза наночастиц золота используется цитратный метод. Отличительной особенностью этого метода является то, что цитратанион одновременно выступает в роли стабилизатора и восстановителя, поэтому концентрация этого иона играет ключевую роль: её изменение одновременно влияет на скорость восстановления и на процессы роста частиц. Кроме того, в результате реакции в растворе образуются продукты окисления цитратаниона – 1,3-ацетондикарбоновая и итаконовая кислоты, что, в принципе, может вызвать необходимость дополнительной очистки реакционной смеси.



Во время синтеза цвет реакционной смеси изменяется. Первоначально слабо желтая окраска иона AuCl_4^- исчезает, далее через некоторое время раствор приобретает темно синее окрашивание, после чего становится фиолетовым, а на окончательной стадии формирования наночастиц – рубиново-красным. Изменение цвета раствора указывает на структурные превращения, происходящие в системе. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что бесцветный раствор, образующийся сразу после добавления цитрата, содержит нанокластеры золота диаметром около 4 нм. В темно-синем растворе формируется сложная структура, которую можно представить в виде разветвленной сети из нанопроволок диаметром около 5 нм. В стадии темно-фиолетового цвета возникают небольшие сегменты, образующиеся в результате разрыва основной разветвленной сети нанопроволок. Сферические наночастицы с диаметром порядка 10 нм начинают отделяться от нанопроволок в момент, когда раствор становится фиолетовым. Окончательным признаком разрушения сети и образования золотых наносфер служит изменение цвета раствора на рубиново-красный.

Причиной образования линейных цепочечных структур, по-видимому, служит то обстоятельство, что первичные нанокластеры имеют усеченную октаэдрическую геометрию с четкими плоскими гранями. Слияние нанокластеров возможно только путём планарного контакта между гранями решетки.

По мере протекания процесса увеличивается толщина нанопроволок и при диаметре около 8 нм система теряет стабильность и начинает фрагментироваться. К этому времени концентрация ионов AuCl_4^- уменьшается, а цитрат-ионы оказываются доминирующими. Они покрывают образующиеся наночастицы, сообщая им отрицательный заряд, вызывающий сильный отталкивающий эффект, способствующий раскалыванию линейной структуры и образованию сферической формы.

Для окончательного созревания золя и полной дезинтеграции частиц необходимо выдержать раствор при комнатной температуре в течение 10-15 мин.

Порядок выполнения работы

Слушателям необходимо налить 50 мл дистиллированной воды в колбу Эрленмейера емкостью 200 мл и после кратковременного кипячения вылить. После чего необходимо в промытую колбу налить 50 мл 0.0001 М раствора HAuCl_4 , поместить колбу магнитик и разместить ее на магнитной мешалке, предварительно нагретой до 100°C .

Далее необходимо включить перемешивание и нагреть раствор до кипения при непрерывном интенсивном перемешивании. После начала закипания раствора, добавить 5 мл 0.004 М раствора цитрата натрия и взять пробу раствора (2 мл). Продолжать кипятить и непрерывно интенсивно перемешивать раствор до появления рубиново-красной окраски (~10 мин) отбирая пробы через равные промежутки времени и при смене окраски раствора. Во время перемешивания необходимо стараться сохранять объём раствора постоянным, равным 55 мл, добавляя по необходимости небольшие порции дистиллированной воды с помощью пипетки на 5 мл. Во время протекания синтеза необходимо вести журнал, в котором отмечать характер и время изменения цвета раствора, свидетельствующее о протекании химических и структурных превращений в системе, а также время отбора проб.

Когда раствор приобретет окончательный рубиново-красный цвет – выключить нагревание и перемешивание. Снять колбу с мешалки, охладить раствор при комнатной температуре и выдержать его при этой температуре около 15 минут для окончательного созревания золя.

Отобрать в пробирки две пробы по 2 мл и исследовать устойчивость золя при изменении характера среды.



Раздел 3. «Основы сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии»

Практикум 3.1 «Визуализация методом СТМ микро-и наноструктуры поверхности образца мастер-диска, используемого при изготовлении DVD-дисков»

Время выполнения лабораторной работы: 3 часа аудиторной работы, 1 час самостоятельной аудиторной работы.

Задача. Сканирующий зондовый микроскоп по праву является базовым инструментом нанотехнологий. Именно поэтому, в первой практической лабораторной работе слушатель знакомится с устройством и работой сканирующего зондового микроскопа «NanoTutor» в режиме СТМ и знакомится с основными параметрами, определяющими свойства нанобъектов, методами и приборами их характеристики. Слушатель приобретает навыки комплектации состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения проекта, знакомится с требованиями к компетенциям технического персонала и требованиями обеспечения безопасности жизнедеятельности персонала, занятого на производстве наноструктурированных изделий. С помощью преподавателя слушатель выполняет визуализацию пик на поверхности DVD-диска. Получение топографии поверхности исследуемого образца проводится в режиме постоянного туннельного тока.

Методические рекомендации преподавателю по выполнению практикума

Получение СТМ изображения и обработка экспериментальных данных выполняется каждым слушателем при поддержке преподавателя. Практическая часть работы выполняется на одном занятии и обычно занимает 3 часа. Варианты образцов для исследования: дифракционная решетка, покрытая пленкой золота, пиролитический графит, кусочек DVD-диска с пиком с проводящей поверхностью. До начала работы преподавателю необходимо изготовить зонды для каждого слушателя и полу-

чить изображение поверхности исследуемого образца на одном из приборов.

В данном практикуме даются навыки работы на современном диагностическом оборудовании (приборе «NanoTutor»). Преподаватель должен объяснить основы комплектации состава основного диагностического оборудования необходимого для выполнения определенной задачи, т.е. оправдать применение конкретного СЗМ для конкретной задачи. Перед проведением практикума освещаются темы формулирования требований к компетенциям технического персонала для работы на СЗМ и обеспечения безопасности жизнедеятельности.

Конкретные рекомендации по проведению данного практикума представлены в соответствующем учебном пособии к сканирующему зондовому микроскопу «NanoTutor» или аналоге прибора.

Практикум 3.2 «Визуализация и измерение геометрических параметров питов на поверхности CD-диска из поликарбоната»

Время выполнения практикума: 3 часа аудиторной работы, 1 час самостоятельной аудиторной работы.

Задача. Изучить на практике основы атомно-силовой микроскопии. Изучение конструкции и принципов работы прибора NanoTutor в режиме АСМ. Получить СЗМ изображения образца с помощью преподавателя. Получить самостоятельно практический навык измерений, обработки и представления экспериментальных результатов.

Методические рекомендации по выполнению практикума

Данная лабораторная работа является этапом перед итоговым экзаменом, который слушатели сдают по окончании изучения курса. Настоящая работа оценивается согласно критериям оценки при сдаче отчета по лабораторной работе, изложенным в программе курса.



В данном практикуме слушатели продолжают перенимать опыт работы на современном диагностическом оборудовании (приборе «NanoTutor»). Получение изображения выполняется на одном приборе под присмотром преподавателя, обработка экспериментальных данных каждым слушателем индивидуально. Практическая часть работы выполняется на одном занятии и занимает 3 часа. Образец для исследования: тестовый образец TGZ3 или кусочек CD-диска из поликарбоната. До начала работы преподавателю необходимо подобрать зонд с наиболее характерной амплитудно-частотной характеристикой (одиночный симметричный максимум) и получить изображение поверхности исследуемого образца.

Конкретные рекомендации по проведению данного практикума представлены в соответствующем учебном пособии к сканирующему зондовому микроскопу «NanoTutor» или аналоге прибора.

Практикум 3.3 «Создание наноструктуры по цифровому шаблону на поверхности поликарбоната методом динамической силовой литографии»

Время выполнения практикума: 3 часа – аудиторные занятия, 1 час – самостоятельная аудиторная работа.

Задача. Познакомиться с основами обработки наноструктурированных материалов с помощью зондовых технологий. Изучить различные виды литографии, реализуемые с помощью сканирующего зондового микроскопа. Получить практический навык выполнения динамической силовой литографии.

Методические рекомендации по выполнению практикума

Работа выполняется каждым слушателем индивидуально. Обязательная практическая часть работы выполняется на одном занятии и занимает 3 часа. Образец для выполнения литографии: фрагмент компакт-диска без записи информации со снятым защитным слоем.

До начала работы преподавателю необходимо подобрать зон-

ды для каждого слушателя и выполнить литографию тестового изображения на одном из приборов NanoTutor.

Конкретные рекомендации по проведению данного практикума представлены в соответствующем учебном пособии к сканирующему зондовому микроскопу «NanoTutor» или аналоге прибора.

Практикум 3.4 «Изготовление вольфрамовых зондов методом электрохимического травления»

Определение параметров зондов с помощью сканирующего электронного микроскопа и с помощью тестовой TGT решетки в сканирующем силовом микроскопе. Обработка и анализ СЗМ данных, полученных при визуализации объектов различной природы.

Время выполнения практикума: 2 часа – аудиторные занятия, 1 час – самостоятельная аудиторная работа.

Задача. Получить практический навык приготовления зонда для СТМ. Изучить источники артефактов в сканирующей зондовой микроскопии. Исследовать основные характеристики пьезоэлектрической керамики СЗМ сканера. Познакомиться с требованиями по стандартизации, сертификации, метрологии в наноиндустрии применительно к СЗМ. Ознакомиться с комплектацией состава основного технологического и диагностического оборудования для выполнения проекта

Методические рекомендации по выполнению практикума

Данная лабораторная работа является этапом перед итоговым экзаменом, который слушатели сдают по окончании изучения курса. Настоящая работа оценивается согласно критериям оценки при сдаче отчета по лабораторной работе, изложенным в программе курса.

Основная цель работы заключается в получении практического навыка аттестации формы зонда по изображению сверхострых особенностей тестового образца TGT1. Преподавателю



необходимо подготовить оборудование для электрохимической заточки зонда. Варианты образцов для исследования: тестовые решетки TGX1 и TGT1.

К

онкретные рекомендации по проведению данного практикума представлены в соответствующем учебном пособии к сканирующему зондовому микроскопу «NanoTutor» или аналоге прибора.

Практикум 3.5 «Обработка и представление СЗМ данных, измерение геометрических характеристик на СЗМ изображениях»

Время выполнения практикума: 2 часа аудиторные занятия, 1 час – самостоятельная аудиторная работа.

Задача. Получить практические навыки по обработке и количественному анализу СЗМ изображений. Применить современные программные комплексы для обработки данных, полученных на диагностическом оборудовании.

Методические рекомендации по выполнению практикума

Преподавателю необходимо предварительно проверить работоспособность приборов NanoTutor на тестовых образцы с периодическими структурами. Слушатель самостоятельно измеряет рельеф периодической структуры, обрабатывает и анализирует полученное изображение.

Конкретные рекомендации по проведению данного практикума представлены в соответствующем учебном пособии к сканирующему зондовому микроскопу «NanoTutor» или аналоге прибора.

Возможные мастер-классы



Мастер-класс №1

«Резонанс – от искусства к науке»

Тема: Исследование резонансных характеристик зондового датчика

Продолжительность: 30 – 45 минут

Целевая аудитория: дети в возрасте от 14 лет, взрослые совместно с детьми, наставники (с целью повышения квалификации)

Цели и задачи (получение артефакта /формирование навыков / освоение технологии или инструмента обучения):

знакомство с принципом работы СЗМ в полуконтактном режиме, формирование навыков работы с СЗМ микроскопом

Требования к входным компетенциям участников: начальные представления о волновых процессах

Краткое описание: введение в резонансные явления. Вводное описание работы СЗМ. Принцип получения изображения методом СЗМ.

План проведения / алгоритм действий

1. Описание явления резонанса
2. Обсуждение примеров резонанса в музыкальных инструментах, в быту и разрушающих последствий резонанса
3. Описание конструкции пьезодатчика
4. Получение его АХЧ

Необходимое оборудование и расходные материалы

- СЗМ микроскоп NanoTutor
- Прибор для травления зондов из вольфрамовой проволоки
- Камертон (опционально)

Результат

- Представление о полуконтактном зондовом методе
- Начальные представления о работе СЗМ NanoTutor и системе обратной связи

Мастер-класс №2. «Первый “взгляд” на наномир»

Тема: Исследование резонансных характеристик зондового датчика

Продолжительность: 45-60 минут

Целевая аудитория: дети в возрасте от 14 лет, взрослые совместно с детьми, наставники (с целью повышения квалификации)

Цели и задачи (получение артефакта /формирование навыков / освоение технологии или инструмента обучения):

Получение первого изображения методом Сканирующей Силовой Микроскопии (ССМ)

Требования к входным компетенциям участников: прохождение первого мастер-класса на сканирующем зондовом микроскопе NanoTutor, владение базовыми представлениями о сканирующем зондовом микроскопе

Краткое описание: получение первого СЗМ изображения

План проведения / алгоритм действий

- Введение в работу сканера NanoTutor
- Проведение эксперимента на тренажере NanoTutor
- Проведение измерения на приборе с готовым зондом.
- Анализ полученного изображения

Необходимое оборудование и расходные материалы

- СЗМ NanoTutor
- Готовые зонды для СЗМ
- Тестовая решетка TGZ или подобная

Результат

- Получение навыков работы на СЗМ NanoTutor.
- Получение первого СЗМ изображения
- Начальные навыки обработки СЗМ изображения



Мастер-класс №3 «Сверхострая игла»

Тема: Изготовление зондов для сканирующей микроскопии

Продолжительность: 45 – 60 минут

Целевая аудитория: дети в возрасте от 14 лет, взрослые совместно с детьми, наставники (с целью повышения квалификации)

Цели и задачи (получение артефакта /формирование навыков / освоение технологии или инструмента обучения): освоение навыка технологии изготовления вольфрамовых зондов для СЗМ

Требования к входным компетенциям участников: прохождение первого мастер-класса по NanoTutor, владение базовыми представлениями о сканирующем зондовом микроскопе

Краткое описание: Изготовление методом травления и тестирование зондов для СЗМ.

План проведения / алгоритм действий

- Повторение основ СЗМ и обсуждение параметров зонда
- Знакомство с различными зондами в СЗМ микроскопии
- Знакомство с процессом травления вольфрамовых игл в щелочном растворе
- Изготовление зондов для СЗМ NanoTutor и их травление с помощью специализированного прибора
- Опробирование изготовленных зондов на решетке TGT1

Необходимое оборудование и расходные материалы

- СЗМ NanoTutor
- Прибор для травления вольфрамовых зондов для СЗМ
- Тестовая решетка TGT или подобная

Результат

- Получение навыков работы на СЗМ NanoTutor
- Знакомство с теорией травления вольфрамовых зондов
- Получение навыка изготовления вольфрамовых зондов
- Освоение прибора для травления вольфрамовых зондов
- Получение навыка проверки качества зондов для СЗМ

Мастер-класс №4 «Необъяснимый» ток»

Тема: Сканирующая туннельная микроскопия

Продолжительность: 45-60 минут

Целевая аудитория: дети в возрасте от 14 лет, взрослые совместно с детьми, наставники (с целью повышения квалификации)

Цели и задачи (получение артефакта /формирование навыков / освоение технологии или инструмента обучения): Знакомство с квантовым миром, сканирующая туннельная микроскопия

Требования к входным компетенциям участников: прохождение первого мастер-класса по СЗМ NanoTutor, владение базовыми представлениями о сканирующем зондовом микроскопе

Краткое описание: Изучение и использование туннельного тока в СЗМ

План проведения / алгоритм действий

- Повторение основ СЗМ
- Введение в корпускулярно-волновой дуализм
- Получение СЗМ изображение методом туннельной микроскопии.

Необходимое оборудование и расходные материалы

- СЗМ NanoTutor
- Прибор для травления вольфрамовых зондов для СЗМ
- Образец для СЗМ методом туннельной микроскопии

Результат

- Закрепление навыков работы с СЗМ NanoTutor
- Знакомство с теорией квантовых явлений
- Знакомство с явлением туннелирования электронов
- СЗМ изображение методом СТМ



Мастер-класс №5 «Нанооткрытие своими руками»

Тема: Проведение нанолитографии

Продолжительность: 45-60 минут

Целевая аудитория: дети в возрасте от 14 лет, взрослые совместно с детьми, наставники (с целью повышения квалификации)

Цели и задачи (получение артефакта /формирование навыков / освоение технологии или инструмента обучения): освоение технологии нанолитографии и формирование понимания о влиянии измерительного оборудования на исследуемый образец.

Требования к входным компетенциям участников: прохождение первого мастер-класса по NanoTutor, владение базовыми представлениями о сканирующем зондовом микроскопе

Краткое описание: Создание изображения на поверхности материала методом нанолитографии.

План проведения / алгоритм действий

- Повторение основ СЗМ
- Подготовка изображения для проведения литографии (опционально, рисунок или периодическая структура для наблюдения оптических эффектов)
- Подготовка образца для проведения на его поверхности литографии
- Создание литографии методом силовой или электро литографии
- Наблюдение литографии в оптический микроскоп и обсуждение результатов

Необходимое оборудование и расходные материалы

- СЗМ NanoTutor
- Прибор для травления вольфрамовых зондов для СЗМ – Etchenger
- Образец для проведения литографии (мягкий полимер, фотобумага или бумага с металлизацией)

Результат

- Получение представления о том, что измерительный прибор может не только измерять, но и изменять образец
- Более глубокое понимание метода сканирующей зондовой микроскопии
- Получение образца с литографией



Мастер-класс №6. «Макроклуба наноцветов»

Тема: Травление металла и изучение его поверхности

Продолжительность: 45-60 минут

Целевая аудитория: дети в возрасте от 14 лет, взрослые совместно с детьми, наставники (с целью повышения квалификации)

Цели и задачи (получение артефакта /формирование навыков / освоение технологии или инструмента обучения): освоение технологии нанолитографии и формирование понимания о влиянии измерительного оборудования на исследуемый образец.

Требования к входным компетенциям участников: прохождение первого мастер-класса по NanoTutor, владение базовыми представлениями о сканирующем зондовом микроскопе

Краткое описание: Травление поверхности алюминия и получение изображения его поверхности с помощью СЗМ

План проведения / алгоритм действий

- Повторение основ СЗМ
- Обсуждение процесса травления
- Наглядное травление алюминия
- Подготовка образца для измерений СЗМ
- Получение структурированного изображения поверхности алюминия

Необходимое оборудование и расходные материалы

- СЗМ NanoTutor
- Прибор для травления вольфрамовых зондов для СЗМ
- Источник тока для травления алюминия
- Алюминий

Результат

- Получение представления о процессе травления алюминия и процессах окисления поверхности
- Закрепление навыков работы с СЗМ

Источники информации



Список литературы

- Гусев А.И., «Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии», М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 416 с.
- Суздаев И.П., «Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов», М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
- «Новые материалы», под редакцией Ю.С. Карабасова, М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
- «Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов», под редакцией С.В. Калюжного, М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010. – 528 с.
- Гудилин Е.А., «Богатство Наномира. Фоторепортаж из глубин вещества», под редакцией Ю.Д.Третьякова, М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 171 с.
- К. Деффейс, С. Деффейс, «Удивительные наноструктуры», перевод под редакцией Л.Н.Патрикеева, М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 206 с.
- В.Л. Миронов, «Основы сканирующей зондовой микроскопии», М.: Техно, 2009. – 144 с.
- Б.Фехльман, «Химия новых материалов и нанотехнологий», перевод под редакцией Ю.Д. Третьякова и Е.А. Гудилина, Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 464 с.
- Ч. Пул-мл., Ф Оуэнс, «Нанотехнологии», М.: Техносфера, 2006. – 327 с.

Интернет-источники

- Сайт о нанотехнологиях: <http://www.nanonewsnet.ru/>
- Сайт нанотехнологического сообщества Нанометр <http://www.nanometer.ru/>

Онлайн-курсы

- Интернет-курс «Наука для детей: наглядные опыты дома» <https://stepik.org/course/Наука-для-детей-наглядные-опыты-дома-1725>
- Интернет-курс «Fundamentals of Nanoelectronics: Basic Concepts» <https://www.edx.org/course/fundamentalsnanoelectronics-basic-purdue-nano520x>
- Интернет-курс «Coursera: Nanotechnology and Nanosensors» <https://www.class-central.com/mooc/5200/courseranotechnology-and-nanosensors-part1>
- Интернет-курс «Concepts in Nanotechnology» <https://www.canvas.net/courses/concepts-in-nanotechnology>

«Наноквантум тулkit»

Авторы: Михаил Мухин, Иван Мухин, Александр Голубок

Редакционная группа: Марина Ракова, Максим Инкин

Оформление: Николай Скирда (обложка, макет),

Алексей Воронин (верстка)

Базовая серия «Методический инструментарий наставника»



Фонд новых форм
развития образования
PIUS ULTRA | ДАЛЬШЕ ПРЕДЕЛА







КВАНТОРИУМ

www.roskvantorium.ru