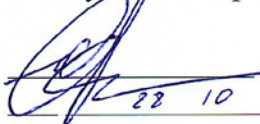
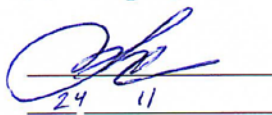


Белорусский национальный технический университет
Приборостроительный факультет
Кафедра «Микро- и нанотехника»

СОГЛАСОВАНО
Заведующий кафедрой


С.А. Чижик
22 10 2025 г.

СОГЛАСОВАНО
Декан факультета


А.И. Свистун
24 11 2025 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

«Материалы микро- и наносистемной техники»
для специальностей

6-05-0716-08 «Микро- и наносистемная техника»

6-05-0716-09 «Технологии микросенсорных систем»

Составитель: Лапицкая Василина Александровна
Рассмотрено и утверждено на заседании Совета приборостроительного
факультета 24 ноября 2025 года
Протокол № 3

ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ

Электронный – учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Материалы микро- и наносистемной техники» состоит из следующих разделов:

I. Теоретический раздел:

- курс лекций;

II. Практический раздел:

- перечень тем практических занятий;
- перечень лабораторных работ;

III. Контроль знаний:

- перечень вопросов, выносимых на зачет;

IV. Вспомогательный раздел:

- учебная программа для учреждения высшего образования.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели создания ЭУМК:

Целью ЭУМК по дисциплине «Материалы микро- и наносистемной техники» является формирование у студентов комплекса знаний по изучаемой учебной дисциплине, соответствующих академическим, социально-личностным и профессиональным компетенциям специалиста в рамках образовательного стандарта для специальностей «Технология материалов и компонентов электронной техники» и «Микро- и наносистемная техника».

Особенностями структурирования и подачи учебного материала являются изучение следующих теоретических материалов:

- классификация материалов МНСТ;
- основные физико-химические свойства материалов, используемых в МНСТ;
- физические эффекты и явления, лежащие в основе применения материалов в микросистемной технике.

Практическая часть состоит из перечня тем практических занятий и методических указаний по выполнению лабораторных и курсовых работ. Раздел контроля знаний содержит вопросы к зачету. Вспомогательный раздел содержит учебную программу по дисциплине «Материалы микро- и наносистемной техники».

Рекомендации по организации работы с ЭУМК: Материалы данного электронного учебно-методического комплекса можно использовать при выполнении лабораторных и практических работ, технологических частей дипломных проектов (работ), связанных с технологиями нано- и микросистемной техники.

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	6
1.1 Научно-технические революции и нанотехнология. Два противоположных технологических подхода.....	6
1.2 Определение нанотехнологий. Какие объекты относят к наноразмерным? На какие группы по размерности делят наноматериалы?	8
1.3. Морфологические единицы в материале. Понятие агломерации	9
1.4. Конструкционные, функциональные и умные материалы	10
1.5. Фотонные кристаллы. Классификация фотонных кристаллов по характеру изменения коэффициентов преломления, в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых зон. Методы изготовления фотонных кристаллов.....	12
1.6. Кремний монокристаллический. Виды кристаллического кремния в зависимости от предназначения	14
1.7. Этапы получения Si. Метод Чохральского	15
1.8. Пористый Si. Степень пористости Si. Определение степени пористости кремния. Классификация по размеру пор.....	17
1.9. Получение пористого Si. Структура пористого слоя кремния. От чего она зависит? Механизм порообразования в кремнии.	18
1.10. Физические и химические свойства Si	20
1.11. Свойства пористого кремния. Применение пористого кремния	21
1.12. Магнитные материалы. Ферромагнитная жидкость	23
1.13. Нанотрубки углерода, строение, хиральность, способы получения	26
1.14. Основные свойства углеродных нанотрубок (УНТ).	28
1.15. Применение углеродных нанотрубок. Композиционные материалы, компоненты наноэлектроники, адгезивная лента, текстильные изделия.	29
1.16. Фуллерены. Строение. Правило изолированных пентагонов. Эндо- и экзоэдральные фуллерены. Получение фуллеренов. Применение фуллеренов.....	30
1.17. Графен. Строение. Методы получения.....	32
Перспективные устройства на основе графена.....	32

1.18. Самосборка наночастиц. Необходимые условия самосборки. Силы, обеспечивающие самосборку. Перспективные применения самосборки.....	33
1.19. Мицеллы. Типы мицеллярных структур. Коллоидные реакторы.....	34
1.20. Виды активных диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Типы поляризации	36
1.21. Механизм образования полярных фаз в сегнетоэлектрике на примере BaTiO ₃	38
1.22. Электрофорез. Применение электрофореза. Ката- и анафорез. Электронная бумага.	40
1.23. Методы разделения наночастиц по размеру. Метод седиментации. Использование молекулярных сит.	42
1.24. Оптический пинцет. Назначение, строение, принцип действия.	43
1.25. Пленки Ленгмюра-Блоджетт. Амфифильные молекулы. Получение многослойных пленок ЛБ.....	44
1.26. Получение нанопорошка методом термического испарения и конденсации материала из паровой фазы.....	46
1.27. Получение нанопорошков механическим размельчением	48
1.28. Получение наноматериалов с использованием интенсивной пластической деформации	50
1.29. Получение нанопорошка методом распыления жидкого расплава.....	51
1.30. Химические методы синтеза наноматериалов. Золь-гель метод, гидротермальный синтез, синтез в микроэмульсиях	53
1.31. Зондовая микроскопия. Роль сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в нанотехнологиях. Методы зондовой микроскопии: сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), магнитно-силовая микроскопия (МСМ).....	54
1.32. Общие принципы всех методик СЗМ. Конструкция современного пьезосканера. Пьезокерамика. Силы, действующие между зондом и образцом в СЗМ.....	56
1.33. Принцип работы туннельного сканирующего микроскопа. Способы получения зонда в туннельной микроскопии	59
1.34. Атомно-силовая микроскопия. Принцип работы АСМ.....	60
1.35. Электросиловая зондовая микроскопия	61
1.36. Магнитно-силовая зондовая микроскопия.....	62

1.37. Электронный микроскоп. Разрешение электронного микроскопа. Виды электронных микроскопов. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа. Его назначение.	64
1.38. Трибологические характеристики наноматериалов. Износ, от каких факторов он зависит. Количественное определение износа. Удельный объемный износ.....	65
1.39. Определение механических свойств НМ. Наноиндентирование. Типичная кривая непрерывного индентирования	66
1.40. Нанотехнологии. Метрология, стандартизация и сертификация	68
ИНФОРМАЦИОННО - МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	70
Основная литература	70
Дополнительная литература	70
II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	72
III. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ.....	73
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА.....	77
Раздел I. Классификация материалов МНСТ	79
Раздел II. Методы исследования материалов МНСТ	79
Раздел III. Кремний как основной конструкционный материал МНСТ.....	80
Раздел IV. Роль поверхности в микросистемах и наноматериалах	80
Раздел V. Функциональные материалы	80
Раздел VI. Методы получения наноматериалов.....	81
Раздел VII. Наноматериалы для МНСТ	82
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ.....	84

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Научно-технические революции и нанотехнология. Два противоположных технологических подхода

Первая научно-техническая революция (НТР) – «*Индустриальная или энергетическая*». Энергетическая революция, начавшаяся с использования энергии пара, затем освоила электрическую энергию, двигатели внутреннего сгорания, атомную, непосредственно солнечную энергию, реактивные двигатели. Первая НТР принципиально увеличила физические возможности человечества.

В 60-х годах XX века началась *информационная НТР*, обусловленная развитием микроэлектроники. Вторая НТР увеличила способность человека к передаче информации.

В конце XX века началась третья научно-техническая революция – эра нанотехнологии. Английский термин "Nanotechnology" был предложен японским профессором Норио Танигучи в середине 70-х годов прошлого века.

Нанотехнология и нанотехника – это искусство создавать и использовать объекты и структуры с характерными размерами в диапазоне от атомарных до – 100 нм (хотя бы в одном из трех измерений). Третья научно-техническая революция, основанная на нанотехнологии, привела человечество к осознанному созданию и использованию наноструктур, являющихся промежуточными объектами между отдельными атомами и макроскопическими твердыми телами. В качестве разумного критерия принадлежности объекта к наноструктурным, можно принять высокую степень влияния на обсуждаемые свойства именно наноразмерных элементов его реальной структуры. Нанометр (нм) – одна миллиардная (10^{-9}) метра. По международной классификации к наноструктурам относятся объекты, которые хотя бы в одном измерении имеют размер не больше 100 нм.

Достоинства нанопродукции – «очевидные» и «скрытые».

«Очевидные»

- крайне низкие материало- и энергоемкость производства в расчете на одно готовое изделие

- снижение сырьевой зависимости и транспортных расходов,

- экологическая чистота нанотехнологий

С уменьшением размеров понижается механическая и электрическая инерционность устройств, что обеспечивает достижение рекордно высокого быстродействия электронных и электромеханических компонентов и приборов.

«Скрытые»:

- разработка и производство нанопродукции требует высококачественного естественно-научного образования, что поднимет престиж и внимание к учебным заведениям всех уровней, интеллектуальный потенциал общества в целом.

– нанореволюция ускорит переход к постиндустриальному этапу развития общества и сделает экономику инновационной по преимуществу, т.е. основанной на знаниях и высоких технологиях, а не на эксплуатации природных ресурсов или крупнотоннажном производстве, наносящем большой ущерб окружающей среде, как в индустриальном обществе.

Существует два противоположных технологических подхода: «сверху вниз» и «снизу вверх».

В технологии «сверху вниз» из макроскопических материалов различными методами получают другие макроскопические или микроскопические материалы и устройства, применяя дробление, растворение и осаждение, обработку поверхности электронным или лазерным излучением и т. д. (т.е. получения деталей или готовых изделий из более крупных заготовок путем отделения ненужных частей).

Развитие нанотехнологий позволило заменить принцип «сверху вниз» (top-down) на принцип «снизу вверх» (bottom-up). Нанотехнология впервые поставила задачу принципиального изменения технологии получения материалов, структур и устройств.

Новая технология провозглашает принцип «снизу вверх»: любой материал или устройство, уже существующее в природе или создаваемое впервые, можно собирать начиная с отдельных атомов по безотходной технологии, по принципу конструктора. При этом на первый план выходят характерные для природы процессы самоорганизации. Примером подхода "снизу вверх" является – физическое и химическое осаждение, самоорганизация.

Объективных причин возникновения нанотехнологии было, по крайней мере, две. **Во-первых**, развитие микроэлектроники. Сорок лет назад был сформулирован эмпирический закон Мура (удвоение плотности чипов каждые полтора-два года), который оказался достаточно универсальным и уже сорок лет используется в ряде областей, основанных на так называемых «критических» технологиях. Дальнейшее развитие микроэлектроники неизбежно приводит ее к наноэлектронике: транзисторы и другие элементы вскоре должны будут состоять из считанного числа атомов. В основном именно микроэлектроника послужила технической основой появления нанотехнологии.

Второй объективной причиной третьей научно-технической революции стали общемировые экологические проблемы. Нанотехнология дает реальные надежды на уменьшение ненужных энергетических затрат, уменьшение загрязнений атмосферы и воды и т. д. Переход к световым диодам, использование фотонных кристаллов в лампах накаливания может резко улучшить ситуацию и т.д.

Нанообъекты обладают физическими и химическими свойствами, отличными от свойств макроскопических тел.

Основателем нанотехнологии считают одного из самых знаменитых физиков нашего времени, лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана.

На лекции перед Американским физическим обществом 29 декабря 1959 года, которая называлась «Есть много места там внизу» и которая была

опубликована в № 12 журнала «Химия и жизнь» за 2002 год, он высказал мысль, что принципы физики не говорят о невозможности манипулирования веществом на уровне атомов. Р. Фейнман развил эту идею, предположив возможность создания устройств микроскопических размеров с колоссальным запасом информации, возможность безотходной сборки из атомов различных веществ и устройств и т. д. В те годы это казалось научной фантастикой. Но уже в 1981 году Герд Биннинг и Генрих Ререр (швейцарское отделение IBM) изобрели сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), а в 1986 году Герд Биннинг с сотрудниками – атомно-силовой микроскоп (АСМ). Их называют «глаза и пальцы нанотехнологии».

1.2 Определение нанотехнологий. Какие объекты относят к наноразмерным? На какие группы по размерности делят наноматериалы?

Нанотехнологии – это совокупность методов и процессов, которые радикально меняют физико-химические характеристики материала (изделия) или придают ему принципиально новые свойства благодаря целенаправленному использованию размерных эффектов, особенно сильных при уменьшении характерных размеров структурных (морфологических) единиц до $R \leq 100$ нм хотя бы в одном измерении.

Нанообласти в структурной иерархии можно выделить практически в любом объемном, пленочном или волокнистом объекте (примесные кластеры, границы зерен, ядра дислокаций и т.п. в кристаллах; области упорядочения молекул в полимерах; глобулярные белки, мембраны и мицеллы в биоматериалах и т.д.).

В качестве разумного критерия принадлежности объекта к наноструктурным, можно принять высокую степень влияния на обсуждаемые свойства именно наноразмерных элементов его реальной структуры.

Нанообъекты занимают промежуточную область между миром отдельных атомов, управляемым квантовой механикой, и макромиром, хорошо описываемым в рамках различных континуальных теорий (упругости, гидро- и электродинамики и т.п.).

Схематическое изображение объектов различной размерности представлено на рис.1.

D – размерность объекта Dimensional (англ.) – пространственный, размерностный, размерный

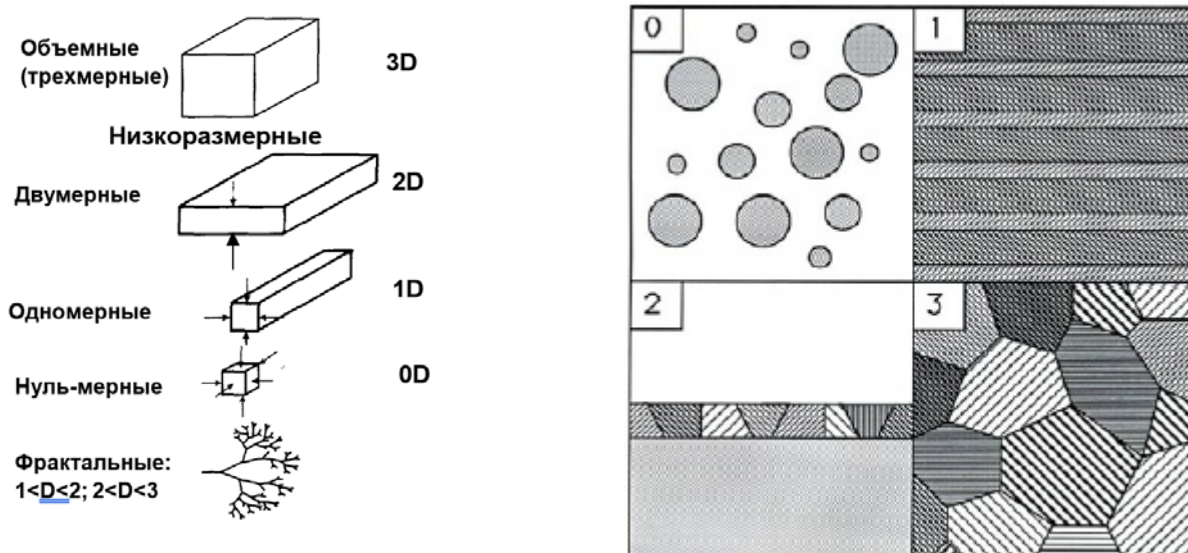


Рис. 1. Схематическое изображение объектов различной размерности

Примеры структур различной размерности:

3D – материалы, в которых наноразмерные элементы (кристаллиты, волокна) плотно расположены друг к другу, например, поликристаллические материалы с размером зерна до 100 нм.

2D – атомарно тонкие, слоистые материалы, которые имеют прочное сцепление в плоскости кристалла, но чьи соседние атомные плоскости удерживаются вместе гораздо более слабыми силами Ван-дер-Ваальса, пленки и покрытия толщиной в нанометровом диапазоне, графен, дихалькогениды переходных металлов.

1D – Нанопроволоки, напыленные на диэлектрическую подложку; нановолокна; одно- и многостенные нанотрубки; органические макромолекулы, двойные спирали ДНК.

0D – Частицы порошка, кластеры, квантовые точки.

1.3. Морфологические единицы в материале. Понятие агломерации

Примеры морфологических или структурных единиц:

Наночастица (англ. nanoparticle) – изолированный твердофазный объект, имеющий отчетливо выраженную границу с окружающей средой, размеры которого во всех трех измерениях составляют от 1 до 100 нм.

Нанокластеры – скопления атомов, объединенные в группы, которые обладают уникальными свойствами.

Нанопористые структуры – материалы с порами нанометрового размера, которые используются в фильтрации или для хранения веществ.

Нанотрубки, нановолокна и наноленты – одномерные структуры, напоминающие трубы, волокна или ленты, например, углеродные нанотрубки.

Наноструктурированные поверхности и пленки – поверхности или тонкие

пленки, на которых создана наноструктура, например, для создания покрытий с особыми свойствами.

Нанодисперсии (коллоиды) – смеси, в которых наночастицы распределены в жидкой среде.

Зерно (англ. grain) – однородная часть твердого тела, имеющая отчетливо различимые границы в микроскопии; единичный элемент поликристаллического материала.

Межзеренные границы чрезвычайно дефектны: они являются стоками вакансий, примесей и пор и отличаются весьма разупорядоченной структурой.

Важность морфологических единиц:

1. Размер и форма: эти параметры напрямую влияют на физические, химические и механические свойства материала.

2. Пространственные измерения: наноматериалы классифицируют по количеству пространственных измерений, которые меньше 100 нм: нульмерные (частицы, кластеры), одномерные (трубки, волокна) и двумерные (пленки, поверхности).

3. Применение: выбор морфологической единицы зависит от конкретной задачи, будь то создание катализаторов, электронных устройств или биомедицинских материалов.

Масштабирующие факторы в наноматериалах:

- Толщина пленки
- Период сверхрешетки
- Структурный параметр (размер зерна, ячейки, фазы, домена, корреляционный радиус взаимодействия)

Агломерация

Общей особенностью наночастиц порошков, полученных любым методом, является их склонность к объединению в агрегаты и агломераты.

В результате необходимо учитывать не только размеры отдельных наночастиц, но и размеры их объединений. Четкого терминологического различия между агрегатами и агломератами провести нельзя, однако считается, что в агрегатах связь между кристаллитами прочнее, а межкристаллитная пористость меньше. При последующем компактировании для достижения заданной пористости материала агрегатированные порошки требуют больших температуры и/или давления по сравнению с неагрегатированными.

1.4. Конструкционные, функциональные и умные материалы

Конструкционные материалы обеспечивают необходимые в эксплуатации механические свойства различных изделий и конструкций.

Функциональные материалы, как это следует из их названия, обеспечивают другие требования к изделиям и конструкциям: определённые электрофизические, оптические, магнитные свойства, биологическую совместимость имплантатов и пр.

«Функциональные материалы могут быть определены как материалы, свойства которых организуют или конструируют таким образом, чтобы они могли удовлетворить конкретному назначению (исполнительной функции) контролируемым способом».

Функциональные материалы обладают физическими и химическими свойствами, которые или стабильны, или, наоборот, изменяются при изменении внешних условий или параметров окружающей среды, причем задание или изменение этих свойств должны быть предсказываемыми и управляемыми.

Изменения условий или параметров могут включать изменения температуры, давления, электрических и магнитных полей, длин волн видимого света, типа молекул абсорбированного газа, кислотности среды и т.д.

Функциональные материалы могут быть созданы впервые или решать свою задачу за счёт модификации (комбинации) ранее известных материалов.

«Умные» или «интеллектуальные» материалы (intelligence, smart materials) должны адаптироваться к изменяющимся внешним условиям и менять свои свойства в заданном направлении сами, без участия человека или управляющих воздействий.

«Умный» материал на самом деле представляет собой некоторую организованную систему и строится из подсистем:

- считывания внешнего сигнала (воздействия);
- его обработки;
- исполнения некоторого действия (функциональный отклик);
- системы обратной связи;
- систем самодиагностирования и самовосстановления.

Вся система («умный» материал) устроена таким образом, чтобы выполнить самоконтролируемое «умное» действие, подобное действию живого организма, способного «думать», принимать решение и совершать действие.

Известными примерами подобных материалов, на основе которых можно сконструировать «умную» систему, являются:

- сплавы и полимеры с памятью формы, которые деформируются и затем восстанавливают свою форму при изменении температуры или напряженности магнитного поля;
- pH-чувствительные полимеры, которые набухают или коллапсируют при изменении кислотности окружающей среды;
- температурочувствительные полимеры, которые изменяют свои

свойства при изменении температуры внешней среды;

– галохромные, электрохромные, термохромные, фотохромные материалы, которые изменяют свою окраску при изменении кислотности среды, приложенного напряжения электрического поля, температуры среды, облучении светом, соответственно.

1.5. Фотонные кристаллы. Классификация фотонных кристаллов по характеру изменения коэффициентов преломления, в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых зон. Методы изготовления фотонных кристаллов

Фотонный кристалл – это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением показателя преломления в пространственных направлениях

«Фотонными кристаллами принято называть среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света».

Брэгговская дифракция – явление сильного рассеяния волн на периодической решётке рассеивателей при определенных углах падения и длинах волн.

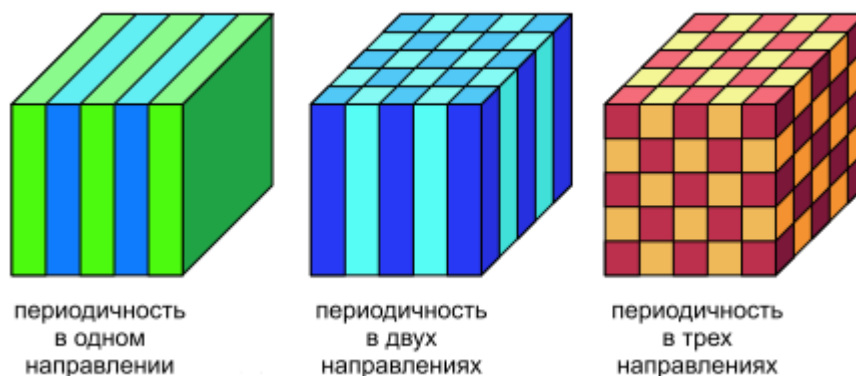
Условие Вульфа-Брэгга

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda,$$

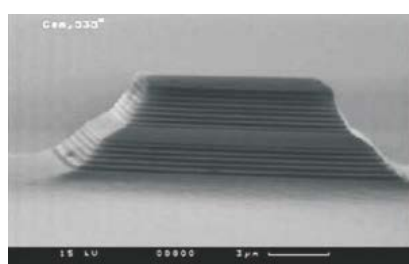
где d – период дифракционной решетки, θ угол скольжения – дополнительный угол к углу падения, λ – длина волны, n ($n = 1, 2, \dots$) – целое число, называемое порядком дифракции).

Классификация фотонных кристаллов по характеру изменения коэффициента преломления (рис. 2):

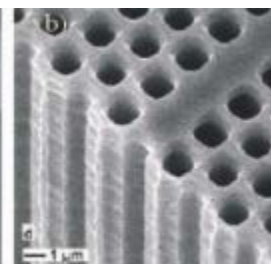
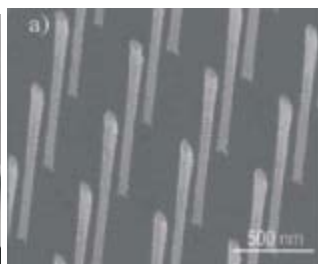
- одномерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении;
- двумерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях;
- трёхмерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в трёх пространственных направлениях.



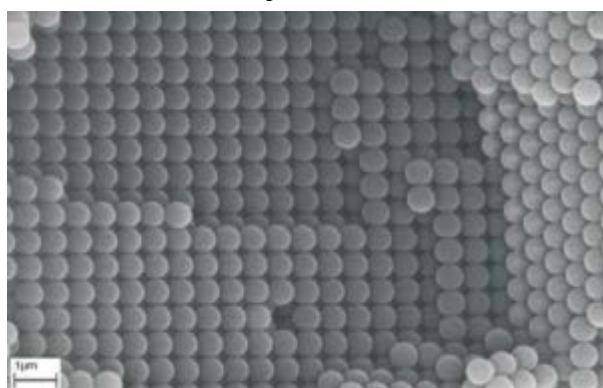
а



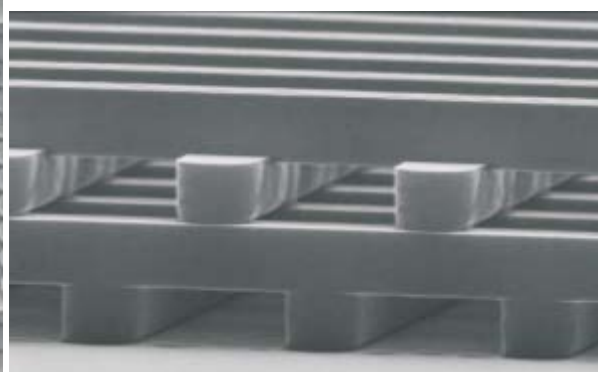
б



в



г



д

Рис. 2. Фотонные кристаллы по характеру изменения коэффициента преломления (а) и примеры одномерного (б, используется в лазере как брэгговское многослойное зеркало), двумерного прямого и обратного ФК с треугольной решеткой (в), трёхмерного ФК с кубической решеткой на основе самоорганизованных сферических микрочастиц полистирола (г) из металлических параллелепипедов (д)

Классификация фотонных кристаллов в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых фотонных зон

- проводники – способные проводить свет на большие расстояния с малыми потерями;
- диэлектрики – практически идеальные зеркала;
- полупроводники – вещества способные, например, выборочно отражать фотоны определённой длины волны;

– сверхпроводники, в которых благодаря коллективным явлениям фотоны способны распространяться практически на неограниченные расстояния.

Существует множество методов изготовления фотонных кристаллов, часть из них основана на варьировании размерности структурных элементов.

Кроме того, фотонные кристаллы можно создавать за счёт оптической нелинейности, перехода метал-неметалл, жидкокристаллического состояния, ферроэлектрического двойного лучепреломления, набухания и сжатия полимерных гелей и так далее, главное, чтобы изменился показатель преломления.

При самопроизвольном формировании фотонных кристаллов используются коллоидные частицы. При изготовлении фотонных волокон технологический процесс состоит из двух основных этапов:

- изготовления заготовки волокна из стеклянных трубок, формируя из них заданную периодическую структуру;
- вытяжки волокна.

1.6. Кремний монокристаллический. Виды кристаллического кремния в зависимости от предназначения

Кремний Si – элемент главной подгруппы IV группы периодической системы Д. И. Менделеева, с атомным номером 14. В природе встречается в виде кремнезёма – соединений на основе диоксида кремния (IV) SiO_2 . Основные минералы, образуемые диоксидом кремния – это песок, кварц и кварциты, кремнь. Кристаллическая решетка кремния кубическая гранецентрированная типа алмаза.

К монокристаллическому кремнию относятся цилиндрические слитки кремния, выращенные методом Чохральского.

Метод Чохральского – это метод выращивания кристаллов путём вытягивания их вверх от свободной поверхности большого объёма расплава с инициацией начала кристаллизации путём приведения затравочного кристалла (или нескольких кристаллов) заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава.

Слитки могут иметь монокристаллическую бездислокационную структуру (число дислокаций не более 10шт/кв.см); монокристаллическую структуру с линиями скольжения, двойниковую структуру (двух и трёхзеренные кристаллы), поликристаллическую структуру с мелким и крупным зерном.

Виды кристаллического кремния в зависимости от предназначения

1. Кремний электронного качества (т. н. «электронный кремний») –

наиболее качественный кремний с содержанием кремния свыше 99,999 % по весу, используемый для производства твердотельных электронных приборов, микросхем и т. п. Удельное электрическое сопротивление кремния электронного качества может находиться в интервале примерно от 0,001 до 150 Ом·см, но при этом величина сопротивления должна быть обеспечена исключительно заданной примесью, т. е. попадание в кристалл других примесей, хотя бы и обеспечивающих заданное удельное электрическое сопротивление, как правило, недопустимо. Основная масса кристаллов кремния электронного качества является т.н. «бездислокационными кристаллами», т. е. плотность дислокаций в них не превышает 10 см^{-2} .

2. Кремний солнечного качества (т. н. «солнечный кремний») – кремний с содержанием кремния свыше 99,99 % по весу, с удельным электросопротивлением до 10 Ом·см), используемый для производства фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей);

3. Технический кремний – блоки кремния поликристаллической структуры, полученного методом карботермического восстановления из чистого кварцевого песка; содержит 98 % кремния, основная примесь – С, отличается высоким содержанием легирующих элементов – В, Р, Al; в основном используется для получения поликристаллического кремния.

1.7. Этапы получения Si. Метод Чохральского

Метод Чохральского состоит из следующих этапов:

1. превращение кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено;
2. очистка соединения физическими и химическими методами;
3. восстановление соединения с выделением чистого кремния;
4. окончательная кристаллизационная очистка и выращивание монокристаллов.

Метод Чохральского (рис. 3) – это метод выращивания кристаллов путём вытягивания их вверх от свободной поверхности большого объёма расплава с инициацией начала кристаллизации путём приведения затравочного кристалла (или нескольких кристаллов) заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава.

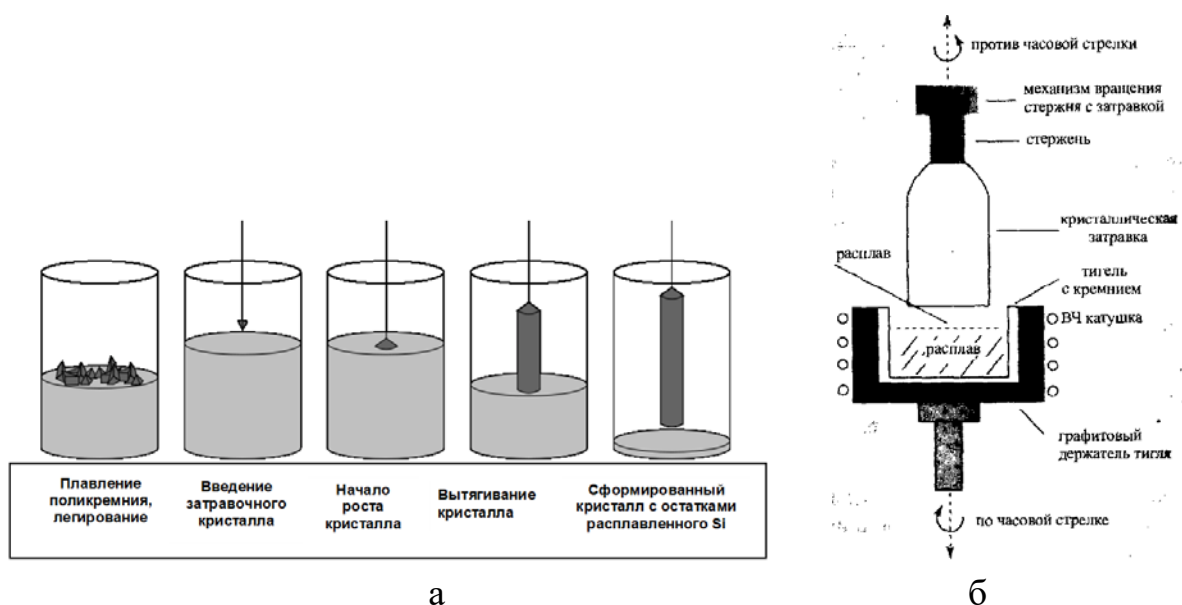
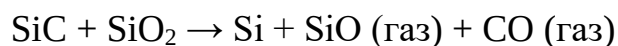


Рис. 3. Этапы метода Чохральского (а) и аппарат Чохральского

1 этап – плавление

По этому методу чистый кварцевый песок (SiO_2) помещается в печь, где уже находятся углеродсодержащие материалы, такие как уголь и кокс. В печи протекают несколько типов реакции, но для нас важна следующая:



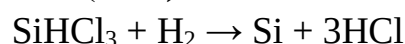
Кремний, полученный таким образом, называется кремнием металлургического качества (MGS). Он содержит не более 2% примесей.

2 этап – очистка

Далее кремний обрабатывается при помощи хлористой кислоты для получения трихлорсилана:



При комнатной температуре трихлорсилан является жидкостью. Фракционная перегонка позволяет очистить трихлорсилан от примесей. После чего очищенный SiHCl_3 помещается в водородную среду, где превращается в кремний электронного качества (EGS):



EGS – это поликристаллический кремний очень высокой чистоты, используемый для производства высококачественных подложек.

3-5 этапы – начало роста кристалла, вытягивание кристалла, сформированный кристалл с остатками расплавленного Si.

При выращивании кристаллов в тигель помещается EGS и печь нагревается выше температуры плавления кремния. В этот расплав опускается затравочный монокристалл кремния высокого качества и соответствующей ориентации (например, 100). При этом и затравочный кристалл, и тигель вращаются, но в противоположных направлениях. В начале процесса роста часть затравочного кристалла расплавляется, затем происходит постепенное вытягивание стержня с затравкой из расплава. При быстром охлаждении на границе раздела твердое состояние-расплав происходит формирование большого монокристалла кремния. Обычная скорость вытягивания кристалла составляет несколько миллиметров в минуту.

1.8. Пористый Si. Степень пористости Si. Определение степени пористости кремния. Классификация по размеру пор.

Пористый кремний (por-Si или ПК) – кремний, испещренный порами, то есть имеющий пористую структуру

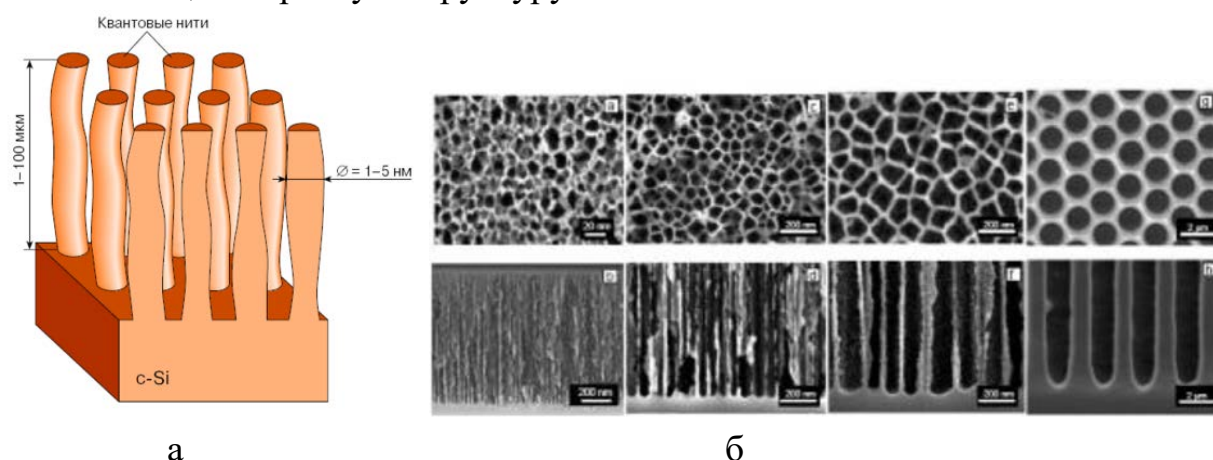


Рис. 4. Вид пористого кремния (а) и реальные изображения пористого кремния (б)

Степень пористости. Важнейшей характеристикой пористого кремния, определяющей большинство его физических параметров, является степень пористости или пористость (Π).

Она определяется выражением:

$$\Pi = \frac{\rho_{Si} - \rho_{por Si}}{\rho_{Si}}$$

где ρ_{Si} и $\rho_{\text{por Si}}$ – плотности монокристаллического и пористого кремния соответственно.

Значения пористости могут варьироваться от 5 до 95 %

Определение степени пористости

Степень пористости образца определяется обычно гравиметрическим методом (взвешиванием).

Определение пористости этим методом проводится в три этапа:

1. Взвешивание монокристаллической кремниевой пластины;
2. Вытравливание на ней пористого слоя и взвешивание получившегося образца;
3. Удаление пористого слоя путем травливания его с кремниевой подложки и повторное взвешивание образца.

Погрешность гравиметрического метода при малых толщинах (до 10 мкм) пористого слоя и больших пористостях (более 70 %) может достигать 15-20 %/

Пористый кремний классифицируют по размеру пор:

- Микропористый кремний – $R < 2$ нм.
- Мезопористый кремний – $2 \text{ нм} < R < 50 \text{ нм}$.
- Макропористый кремний – $R > 50 \text{ нм}$.

1.9. Получение пористого Si. Структура пористого слоя кремния. От чего она зависит? Механизм порообразования в кремнии.

Пористый кремний получают путем электрохимического анодного травления (рис. 5). Для этого пластину монокристаллического кремния помещают в электрохимическую ячейку, содержащую слабый раствор плавиковой кислоты. Присоединяют к положительному электроду – аноду и пропускают слабый постоянный электрический ток. Вторым электродом (катодом) обычно служит платиновая пластина. При подходящем выборе плотности электрического тока на поверхности c-Si происходит формирование пористого слоя.

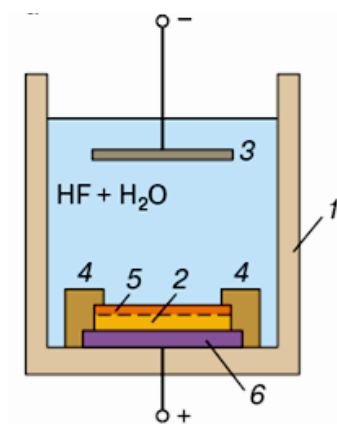


Рис. 5. Схема анодного получения пористого кремния (с течением времени электрический ток и ионы фтора травят поверхность):
1 – корпус, 2 – пластина кремния, 3 – катод, 4 – изолятор, 5 – растущий пористый слой, 6 – анод

Структура пористого слоя

Установлено, что толщина пленки пористого кремния практически линейно зависит от времени травления и может меняться от долей до сотен микрометров. Структура пористого слоя определяется плотностью тока, концентрацией HF в электролите и характером легирования кремниевой подложки. В пористом кремнии, в основном, сохраняется порядок расположения атомов, унаследованный от подложки. Непосредственно после получения поверхность кремниевого скелета образцов пористого кремния покрыта адсорбированным в различных формах водородом. Выдержка на воздухе, особенно сопровождающаяся освещением, приводит к значительному окислению материала

Механизм порообразования. Поверхность Si при контакте с водными растворами HF насыщается водородом и становится химически инертной по отношению к электролиту. Если на электроды подать разность потенциалов, то дырки в кремниевой пластине начинают мигрировать к поверхности раздела кремний-электролит. При этом атомы Si освобождаются от блокирующего их водорода, начинают взаимодействовать с ионами и молекулами электролита и переходят в раствор. Если электролиз проводят *при высокой плотности тока*, то к поверхности электрода поступает большое количество дырок. Они движутся к границе раздела сплошным фронтом и обеспечивают реакционную способность практически каждому атому Si. Поскольку микровыступы имеют большую поверхность, чем ровные участки, то они растворяются быстрее. Таким образом, поверхность кремниевого анода постепенно выравнивается. Это режим электрохимической полировки. Если же электролиз проводить *при низкой*

плотности тока, то количества дырок не хватает для организации сплошного фронта и поэтому происходит локальное растворение кремния на поверхности. Согласно различным моделям, зарождение пор может начинаться на микроуглублениях, дефектах структуры, механически напряженных участках или локальных возмущениях потенциального поля поверхности. С течением времени появившиеся поры продолжают свой рост в глубь электрода за счет дрейфа дырок к кончикам пор, где напряженность электрического поля выше.

1.10. Физические и химические свойства Si

Кремний – элемент главной подгруппы четвертой группы третьего периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 14. Обозначается символом Si (лат. Silicium). Кристаллическая решетка кремния кубическая гранецентрированная типа алмаза, параметр $a = 0,357$ нм. Из-за большей длины связи между атомами Si–Si по сравнению с длиной связи C–C твердость кремния значительно меньше, чем алмаза. Кремний **хрупок**, только при нагревании выше 800 °С он становится пластичным веществом. Кремний прозрачен к инфракрасному излучению, начиная с длины волны 1,1 микрометр (и поэтому используется для изготовления окошек в ИК датчиках). Элементарный кремний в монокристаллической форме является непрямозонным полупроводником. Ширина запрещённой зоны при комнатной температуре составляет 1,12 эВ, а при $T = 0$ К составляет 1,21 эВ. Концентрация собственных носителей заряда в кремнии при нормальных условиях составляет порядка $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Химические свойства кремния. При нормальных условиях кремний весьма инертен, нерастворим в воде, не вступает в реакцию со многими кислотами. При нагревании легко взаимодействует с галогенами, на воздухе при температуре выше 900°С начинает интенсивно окисляться с образованием двуоксида SiO₂, а при температуре 1100–1300°С соединяется с азотом, образуя нитрид Si₃N₄. Растворим во многих расплавленных металлах (Al, Ga, Sn, Au, Ag), с рядом металлов (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg) образует устойчивые соединения – силициды. В отношении взаимодействия кремния с газами, химическими, биологическими жидкостями и ферментами кремний считается стабильным и устойчивым к действию многих элементов и химических веществ типичных ежедневных приложений. Например, эксперименты показали, что кремний остается неизменным в присутствии фреона, а также тормозной жидкости; работает как клапан, связанный с доставкой ультра-высокой чистоты газов. Кремний не выделяет токсичных веществ при контакте с биологическими жидкостями.

Однако, чистые поверхности кремния могут не подходить для высокопроизводительной полимеразной цепной реакции (ПЦР), предназначенной для усиления генетического материала ДНК.

1.11. Свойства пористого кремния. Применение пористого кремния

Характерной чертой пористого кремния является большая *суммарная площадь его внутренней поверхности*. В зависимости от величины пористости и геометрии пор она может составлять

- для макропористого кремния от 10 до 100 м²/см³,
- для мезопористого от 100 до 300 м²/см³ и
- для нанопористого от 300 до 800 м²/см³.

Пористый кремний в зависимости от условий травления обладает широким интервалом величин *удельного сопротивления* 10⁻²–10¹¹ Ом·см.

Теплопроводность высокопористого кремния более чем на порядок ниже, чем у монокристаллического (126 W/mK при 300K).

Оптические свойства пористого кремния также существенно отличаются от таковых для объемного материала.

Фотолюминесценция – способность эффективно люминесцировать в видимой области спектра. Эффективно люминесцируют образцы пористого кремния, в которых пористость превышает 50 %. Эффективность фотолюминесценции может достигать десятков процентов. Длиной волны излучения можно управлять, изменяя условия анодирования. Оказалось, возможным получать красный, зеленый и синий цвета, необходимые для изготовления цветных дисплеев.

Электролюминесценция в пористом кремнии изучена в меньшей степени, чем фотолюминесценция. В то же время именно с электролюминесценцией связаны перспективы практического использования пористого кремния как материала для создания светоизлучающих устройств (светодиодов, плоских цветных дисплеев) (рис. 6).

Предполагается, что светодиоды из пористого кремния будут значительно дешевле, чем производимые сейчас на базе полупроводниковых соединений.

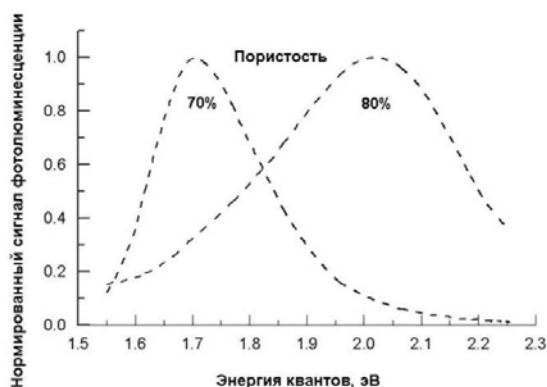


Рис. 6. Спектры люминесценции пористого кремния демонстрируют сдвиг в голубую область при увеличении пористости образца

Применение пористого кремния

Создание толстых диэлектрических пленок. Для создания кремниевых приборов, работающих при высоких напряжениях, существует необходимость в толстых диэлектрических слоях толщиной более 10 мкм. Диэлектрические пленки SiO₂, получаемые окислением обычного кремния не могут быть толще нескольких микрон. Пористый кремний хорошо подходит для решения этой задачи. Если этот материал подвергнуть термическому окислению, то за счет развитой системы пор молекулы кислорода способны проникнуть на всю толщину пористого кремния и привести к полному его окислению. Оптимальными для этих целей являются слои с пористостью около 50 %. Процесс формирования диэлектрических пленок с использованием пористых слоев происходит при температурах более низких, чем при традиционном термическом окислении кремния.

Изолирующая основа для структур «кремний на изоляторе». Структура «кремний на изоляторе» (КНИ) представляет собой основу из диэлектрического материала с выращенным монокристаллическим слоем кремния. Элементы интегральных схем формируются в объеме слоя, после чего выполняется операция локального окисления по их периметру и каждый элемент становится изолированным от своих соседей. В качестве изолирующей основы КНИ-структур уже в первых экспериментах хорошо зарекомендовал себя *окисленный пористый кремний*.

Буферные слои. Низкопористый кремний ($\Pi < 30 \%$) оказался эффективным буферным слоем при эпитаксии монокристаллических пленок других полупроводников на кремнии. Основным условием выращивания качественных слоев является близость величин постоянных решёток кремния и наносимого материала. Однако можно выращивать слои с большим рассогласованием решеток, если использовать промежуточные (буферные) слои. Использование буферного слоя пористого кремния позволило решить задачу

выращивания качественных пленок полупроводников GaAs, PbS, PbTe и др. при выращивании структур на подложке кремния

Выращивание наноразмерных структур. В пористом кремнии в ходе электрохимического травления возможно получать квантовые точки, квантовые нити, элементы с различной фрактальной размерностью. Поэтому пористый кремний с $P > 50 \%$ следует рассматривать как один из материалов наноэлектроники. Перспективным может оказаться заполнение пор другими химическими соединениями, что даст возможность формировать дополнительные низкоразмерные элементы в объеме пористого кремния.

Создание светоизлучающих приборов. Основной интерес к пористому кремнию вызван его способностью эффективно, в отличие от монокристаллического кремния излучать свет в видимом диапазоне. Это может быть использовано для создания значительно более дешёвых светоизлучающих устройств (светодиодов, плоских цветных дисплеев).

Создание световодов. Для целей интегральной оптики применяются планарные световоды, представляющие собой пленочную структуру, в которой свет распространяется в слое с высоким показателем преломления, ограниченном с двух сторон слоями с меньшим показателем преломления (эффект полного внутреннего отражения). Для пористого кремния этот показатель зависит от пористости (чем больше пористость, тем меньше показатель преломления), и поэтому формирование многослойных структур с разной пористостью позволяет получать на их основе волноводные элементы с низким уровнем потерь. Потери на поглощение можно дополнительно уменьшить окислением слоев пористого кремния.

Создание различных датчиков. Поскольку пористый кремний обладает очень высокой удельной поверхностью, то его можно использовать для создания датчиков влажности, газовых, химических и биологических сенсоров. Такие датчики фиксируют изменение емкостных, проводящих, люминесцентных свойств пористого кремния при наличии в контролируемой среде заданных молекул.

Использование в фотодинамической терапии. Фотовозбужденный пористый кремний может генерировать синглетный кислород. Кремний сам по себе не является токсичным для организма и имеет невысокую стоимость.

1.12. Магнитные материалы. Ферромагнитная жидкость

Магнитные материалы (магнетики) – материалы, вступающие во взаимодействие с магнитным полем, выражающееся в его изменении, а также в других физических явлениях – изменение физических размеров, температуры,

проводимости, возникновению электрического потенциала и т.д.

В основном магнитные материалы делят на две большие группы:

- магнитотвёрдые материалы
- магнитомягкие материалы.

Новые большие группы магнитных материалов:

- магнитострикционные материалы,
- магнитооптические материалы,
- термомагнитные материалы.

Выделяют несколько основных типов магнетиков, различимых по конфигурации их магнитных структур: ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики, спиновые стёкла.

Ферромагнетики – вещества (как правило, в твёрдом кристаллическом или аморфном состоянии), в которых ниже определённой критической температуры (точки Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов (в неметаллических кристаллах) или моментов коллективизированных электронов (в металлических кристаллах).

Антиферромагнетик – вещество, в котором установился антиферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов. В антиферромагнетиках спиновые магнитные моменты электронов самопроизвольно ориентированы антипараллельно друг другу. Такая ориентация охватывает попарно соседние атомы. В результате антиферромагнетики обладают очень малой магнитной восприимчивостью и ведут себя как слабые парамагнетики. Обычно вещество становится антиферромагнетиком ниже определённой температуры, так называемой точки Нееля. Среди элементов антиферромагнетиками являются твёрдый кислород, марганец, хром, а также ряд редкоземельных металлов (Диспрозий, Гольмий, Эрбий).

Ферримагнетики – материалы, у которых магнитные моменты атомов различных подрешёток ориентируются антипараллельно, как и в антиферромагнетиках, но моменты различных подрешёток не равны, и, тем самым, результирующий момент не равен нулю. Ферримагнетики характеризуются спонтанной намагниченностью. Различные подрешётки в них состоят из различных атомов или ионов, например, ими могут быть различные ионы железа, Fe^{2+} и Fe^{3+} . Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом, различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

Ферримагнетики имеют доменную структуру, состоящую из двух или более подрешёток, связанных антиферромагнитно (антипараллельно).

Поскольку подрешетки образованы атомами (ионами) различных химических элементов или неодинаковым их количеством, они имеют различные по величине магнитные моменты, направленные антипараллельно. В результате появляется отличная от нуля разность магнитных моментов подрешеток, приводящая к спонтанному намагничиванию кристалла. Таким образом, ферримагнетики можно рассматривать как нескомпенсированные антиферромагнетики (у них магнитные моменты атомов не скомпенсированы). Своё название эти материалы получили от ферритов – первых нескомпенсированных антиферромагнетиков, а магнетизм ферритов называли ферримагнетизмом. У ферритов доменная структура, как и у ферромагнетиков, образуется при температурах ниже точки Кюри. К ферритам применимы все магнитные характеристики, введенные для ферромагнетиков. В отличие от ферромагнетиков, они имеют высокое значение удельного сопротивления, меньшую величину индукции насыщения, более сложную температурную зависимость индукции. Ферромагнетизм в металлах объясняется наличием обменного взаимодействия, которое образуется между соприкасающимися атомами, а также взаимной ориентацией спиновых магнитных моментов. В ферримагнетиках магнитные моменты ионов ориентированы антипараллельно, и обменное взаимодействие происходит не непосредственно, а через ион кислорода O^{2-} . Такое обменное взаимодействие называют косвенным обменом или сверхобменом. Оно усиливается по мере приближения промежуточного угла от 0° к 180° .

Спиновые стёкла – разбавленные магнитные сплавы (например, $CuMn$, $AgMn$ или $AuFe$), то есть немагнитные материалы с включением магнитных примесей с относительной концентрацией магнитных ионов от 10^{-3} до 10^{-1} . Между магнитными ионами существует дальнodelствующее РККИ-обменное взаимодействие посредством электронов проводимости. Спиновые стёкла рассматриваются как состояние магнитной системы со случайным распределением спин-спиновых взаимодействий. В системе отсутствует дальний порядок, причем беспорядок в системе замороженный, то есть не меняется со временем. Энергия обменного взаимодействия осциллирует, меняя знак, в зависимости от расстояния между атомами, поэтому в спиновых стёклах конкурируют ферромагнитные и антиферромагнитные взаимодействия, распределённые случайным (но постоянным во времени) образом благодаря случайному расположению магнитных атомов.

Магнитно-мягкие материалы – магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряжённостью $H \sim 8\text{--}800 \text{ А/м}$ ($0,1\text{--}10 \text{ э}$).

Магнитно-твёрдые материалы, магнитно-жёсткие (высококоэрцитивные)

материалы, магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряжённостью в тысячи и десятки тысяч А/м (10^2 – 10^3 Э). Магнитно-твёрдые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r , магнитной энергии $(BH)_{max}$ на участке размагничивания – спинке петли гистерезиса.

Магнитострикция (от лат. *strictio* – сжатие, натягивание) – явление, заключающееся в том, что при изменении состояния намагниченности тела его объем и линейные размеры изменяются.

К магнитным материалам относятся: никель, сплавы Fe-Al (алфер), Fe-Ni (пермаллой), Co-Ni, Fe-Co, Co-Fe-V (пермендюр) и другие; ряд ферритов ($CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$ и др.),

Ферромагнитная жидкость – жидкость, сильно поляризуемая в присутствии магнитного поля. Ферромагнитные жидкости представляют собой коллоидные системы, состоящие из ферромагнитных частиц нанометровых размеров (магнетита, гематита или другого материала, содержащего железо), находящихся во взвешенном состоянии в несущей жидкости, в качестве которой обычно выступает органический растворитель или вода. Для обеспечения устойчивости такой жидкости ферромагнитные частицы связываются с поверхностно-активным веществом (ПАВ), образующим защитную оболочку вокруг частиц и препятствующем их слипанию из-за Ван-дер-Ваальсовых или магнитных сил.

Несмотря на название, ферромагнитные жидкости не проявляют ферромагнитных свойств, поскольку не сохраняют остаточной намагниченности после исчезновения внешнего магнитного поля.

Ферромагнитные жидкости используются для создания жидких уплотнительных устройств вокруг вращающихся осей в жёстких дисках.

1.13. Нанотрубки углерода, строение, хиральность, способы получения

Нанотрубка, углеродная (УНТ) – полая цилиндрическая структура диаметром от десятых до нескольких десятков нм и длиной от одного до нескольких сотен микрометров и более, образованная атомами углерода и представляющая собой свернутую в цилиндр графеновую плоскость.

Свертка графенового листа в однородный по длине цилиндр может происходить вдоль различных направлений, вследствие чего номенклатура нанотрубок весьма обширна. Однослойные нанотрубки характеризуются так называемым хиральным вектором (n, m) (рис. 7), соединяющим пары атомов, совпадающие при такой умозрительной свертке, где числа n и m являются

координатами данного вектора в кристаллографическом базисе графенового листа и $n \geq m$. В зависимости от n и m электронные свойства нанотрубок существенно различаются: нанотрубки, для которых $n-m$ делится на 3, проявляют металлические свойства, а все прочие – полупроводниковые, хотя с ростом диаметра нанотрубки ширина запрещенной зоны в любом случае приближается к нулю. Числа n и m однозначно определяют диаметр и зонную структуру нанотрубок.

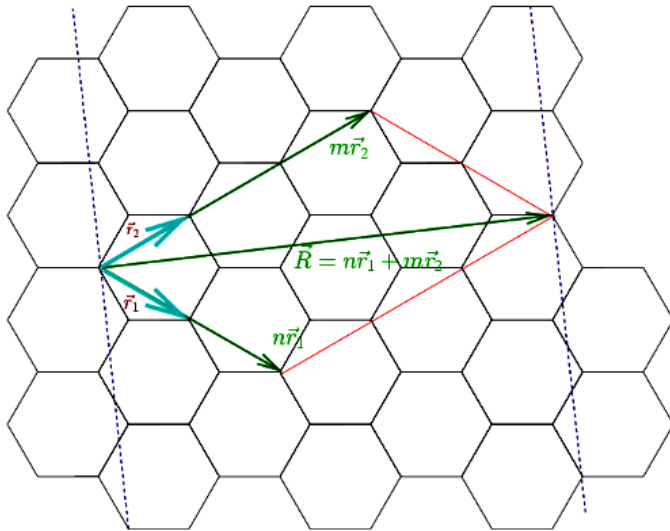


Рис. 7. Графеновая плоскость, из которой получают НТ

Индексы хиральности однослойной нанотрубки (m, n) однозначным образом определяют её диаметр D . Указанная связь имеет следующий вид:

$$D = \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \cdot \sqrt{3}d_0/\pi,$$

где $d_0 = 0,142$ нм — расстояние между соседними атомами углерода в графитовой плоскости. Связь между индексами хиральности (m, n) и углом α даётся соотношением:

$$\sin \alpha = 3m/2\sqrt{m^2 + n^2 + mn}.$$

Выделяют нанотрубки типа «зигзаг», или $(n, 0)$, и нанотрубки типа «кресло», или (n, n) . Эти нанотрубки обладают зеркальной симметрией, тогда как все остальные являются хиральными. Помимо однослойных, существуют многослойные (многостенные) нанотрубки, представляющие собой несколько одностенных нанотрубок, вложенных одна в другую. Также нанотрубки подразделяют на открытые и закрытые.

Существует две больших группы *методов получения УНТ*:

возгонка-десублимация графита,
пиролиз углеводородов.

В настоящее время наиболее распространенным является метод термического распыления графитовых электродов в плазме дугового разряда.

Процесс синтеза осуществляется в камере, заполненной гелием под давлением около 500 торр. При горении плазмы происходит термическое испарение анода, при этом на торцевой поверхности катода образуется осадок, в котором формируются нанотрубки углерода. Они нарастают на катоде перпендикулярно плоской поверхности его торца и собраны в цилиндрические пучки диаметром около 50 мкм. Пространство между пучками нанотрубок заполнено смесью неупорядоченных наночастиц и одиночных нанотрубок. Содержание нанотрубок в углеродном осадке (депозите) может приближаться к 60%.

Пиролитические методы по способу проведения подразделяются на две группы: с катализатором на подложке или в виде порошка и с летучим катализатором.

1.14. Основные свойства углеродных нанотрубок (УНТ).

Механические свойства УНТ. УНТ демонстрируют высокую прочность на растяжение и изгиб, способность перестраиваться под действием механических напряжений, высокую проводимость, необычные магнитные и оптические свойства. Прочность на разрыв 100 ГПа, плотность 2000 кг/м³. Значение модуля упругости (модуля Юнга) при комнатной температуре может достигать 1300 ГПа. В зависимости от метода получения колеблется от 10 ГПа до 1300 ГПа. Наименьшее значение зафиксировано для УНТ, полученных методом CVD. Высокая пластичность УНТ при повышенных температурах. При 2000К величина растяжения на разрыв 280%. Жесткость УНТ по отношению к радиальной нагрузке значительно ниже, чем в случае продольного растяжения либо сжатия. Модуль упругости 3 - 40 ГПа. Электропроводность УНТ является ключевым параметром этих объектов, от величины и возможности измерения которого зависят перспективы их использования в целях дальнейшей миниатюризации устройств микроэлектроники. УНТ могут иметь как металлическую, так и полупроводниковую проводимость. Т.о., проводящие УНТ, обладающие высокой проводимостью и теплопроводностью (термической стабильностью), при использовании их в качестве проводников в наноэлектронных приборах и интегральных микросхемах позволят пропускать токи огромной плотности, не нагреваясь, и обладают существенно более высокой надежностью при нанометровых (до 22 нм) проектных нормах.

Одно из примечательных свойств НТ – ярко выраженная зависимость их электропроводности от магнитного поля. При этом в большинстве экспериментов наблюдается рост проводимости с магнитным полем.

Эмиссионные свойства УНТ. Электронная эмиссия – явление испускания электронов поверхностью твердого тела или жидкости. Наиболее важной

особенностью УНТ с точки зрения их эмиссионных свойств является их высокое aspectное отношение (отношение длины h к диаметру d). Благодаря этой особенности величина напряженности электрического поля вблизи наконечника вертикально ориентированной индивидуальной УНТ во много раз превышает среднее значение этого параметра E_0 , определяемое как отношение приложенного напряжения U к расстоянию между наконечником нанотрубки и анодом D .

1.15. Применение углеродных нанотрубок. Композиционные материалы, компоненты наноэлектроники, адгезивная лента, текстильные изделия.

Механические применения: сверхпрочные нити, композитные материалы, нановесы.

Применения в микроэлектронике: транзисторы, нанопровода, прозрачные проводящие поверхности, топливные элементы. На основе нанотрубок создаются диоды и полевые транзисторы, плотность тока в металлических нанотрубках может на порядки превышать соответствующие величины для металлов.

Для создания *соединений* между биологическими нейронами и электронными устройствами в новейших нейрокомпьютерных разработках.

Капиллярные применения: капсулы для активных молекул, хранение металлов и газов, нанопипетки

Оптические применения: дисплеи на основе электронной эмиссии, светодиоды.

Нанодатчики для мониторинга окружающей среды, в военных, медицинских и биотехнологических применениях: Одностенные нанотрубки (индивидуальные, в небольших сборках или в сетях) являются миниатюрными датчиками для обнаружения молекул в газовой среде или в растворах с ультравысокой чувствительностью — при адсорбции на поверхности нанотрубки молекул её электросопротивление, а также характеристики нанотранзистора могут изменяться.

«Резина» из УНТ: Применение покрытий из вертикально выровненных и единообразно закрученных кольцами УНТ в качестве тонких конструкционных пенопластов для амортизации и поглощения энергии для защиты электронных приборов (MP3 плееров, мобильных телефонов КПК и пр.) от микровоздействий при случайных падениях, а также на макроуровне для обеспечения сохранности взрывоопасных грузов)

C_{60} является наиболее распространенным и изучаемым фуллереном. Его молекула, в которой все атомы эквиваленты вследствие высокой симметрии, имеет сферическую форму с расстоянием от центра до ядер атомов около 0,36 нм и ван-дер-ваальсовым радиусом около 0,5 нм. C_{60} образует молекулярный кристалл, в котором молекулы находятся в узлах кубической гранецентрированной решетки, т. е. трехслойной плотнейшей шаровой упаковки. При высоких температурах C_{60} сублимирует без образования жидкой фазы. Лучше всего C_{60} растворим в ароматических веществах и таких растворителях, как сероуглерод, тогда как в полярных растворителях он растворим плохо. Физические и химические свойства C_{70} , имеющего вытянутую эллипсоидальную форму, и высших фуллеренов близки к свойствам C_{60} .

С точки зрения химии, фуллерены дают богатые возможности для получения различных классов производных. Внедрение атомов и малых кластеров внутрь углеродного каркаса приводит к *эндоэдральным* фуллеренам.

Наиболее богато семейство продуктов внешнесферного (*экзоэдрального*) присоединения, поскольку каждый атом углерода в фуллеренах фактически является доступным реакционным центром.

Наиболее эффективный *способ получения фуллеренов* основан на термическом разложении графита. Используется как электролитический нагрев графитового электрода, так и лазерное облучение поверхности графита. Распыление графита осуществляется при пропускании через электроды переменного тока в атмосфере гелия. Осажденную графитовую сажу выдерживают в течение нескольких часов в кипящем толуоле, при этом получается темно-бурая жидкость. При выпаривании получается мелкодисперсный порошок, вес его составляет не более 10% от веса исходной графитовой сажи, в нем содержится до 10% фуллеренов C_{60} (90%) и C_{70} (10%).

Фуллерены применяются для синтеза металлов и сплавов с новыми свойствами.

Планируется использовать фуллерены для создания фотоприемников и оптоэлектронных устройств, катализаторов роста алмазных и алмазоподобных пленок, сверхпроводящих материалов, а также в качестве красителей для копировальных машин, в качестве присадок для ракетных топлив, смазочного материала.

1.17. Графен. Структура. Методы получения. Перспективные устройства на основе графена

Графен (англ. Graphene, рис.9) – плоский слой sp^2 -гибридных атомов углерода толщиной в один атом, образующих гексагональную решетку; двумерная форма углерода.

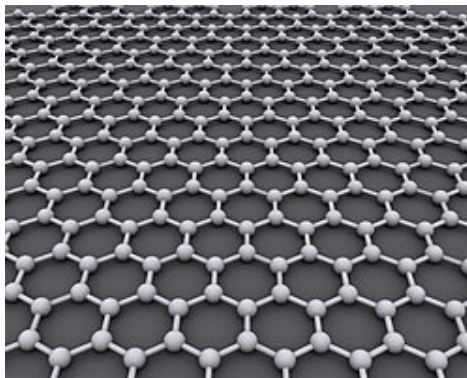


Рис.9. Вид графена

Графен можно представить как одну атомарную плоскость графита, отделенную от объемного кристалла – плоскую сетку из шестиугольников, в вершинах которой находятся атомы углерода. Каждый из них имеет три соседа, на образование связей, с которыми уходят три из четырехвалентных электронов углерода. Четвертый электрон участвует в образовании π -системы графенового листа, определяющей его электронные свойства.

Сам графен удалось *получить* из графита именно с помощью стабилизации монослоев подложками. Благодаря слабому связыванию между графитовыми слоями удалось последовательно расщепить графит на все более тонкие слои с помощью липкой ленты (*механическое «отшелушивание»*), а затем, растворив ее, перенести графеновые фрагменты на кремниевую подложку. Стабилизация плёнки графена достигалась благодаря наличию связи с тонким слоем диэлектрика SiO_2 . За эту работу А. К. Гейму и К. С. Новоселову в 2010 г. была присуждена Нобелевская премия.

Среди *других способов* можно выделить: основанные на эпитаксиальном росте при термическом разложении карбида кремния, на эпитаксиальном росте на металлических поверхностях, а также на химическом раскрытии нанотрубок.

Интерес к графену основывается на его *электронных свойствах*. Подвижность носителей в графене на один – два порядка выше, чем в чистом кремнии. Так, в нем реализуется баллистический (т. е. практически без рассеяния) транспорт электронов, на характеристики которого подложка и окружающая среда влияют весьма слабо.

Предел прочности, составил около 42 Н/м и на настоящий день является рекордным.

Свойства графена могут варьироваться под действием химической модификации. Среди уже реализованных всего за несколько лет прототипов *перспективных устройств* на основе графена можно упомянуть полевые транзисторы с баллистическим транспортом при комнатной температуре, газовые сенсоры с экстремальной чувствительностью, графеновый одноэлектронный транзистор, жидкокристаллические дисплеи и солнечные батареи с графеном в качестве прозрачного проводящего слоя, спиновый транзистор и многие другие.

1.18. Самосборка наночастиц. Необходимые условия самосборки. Силы, обеспечивающие самосборку. Перспективные применения самосборки

Самосборка – самопроизвольный процесс упорядочения системы.

Подобно атомарным ансамблям и макросферам сферические наночастицы способны спонтанно собираться в упорядоченные агрегаты (сверхрешетки).

Не нужно выстраивать требуемую структуру вручную, помещая нанообъекты в требуемые точки пространства один за другим – создаваемые условия таковы, что нанообъекты делают это сами и одновременно. Процессы, использующие создание таких особых условий, называются процессами самосборки. Основными причинами самосборки наночастиц являются различные слабые силы (электростатические и капиллярные взаимодействия, поверхностное натяжение), которые, в целом, стремятся уменьшить общую площадь поверхности наночастиц и, следовательно, их поверхностную энергию.

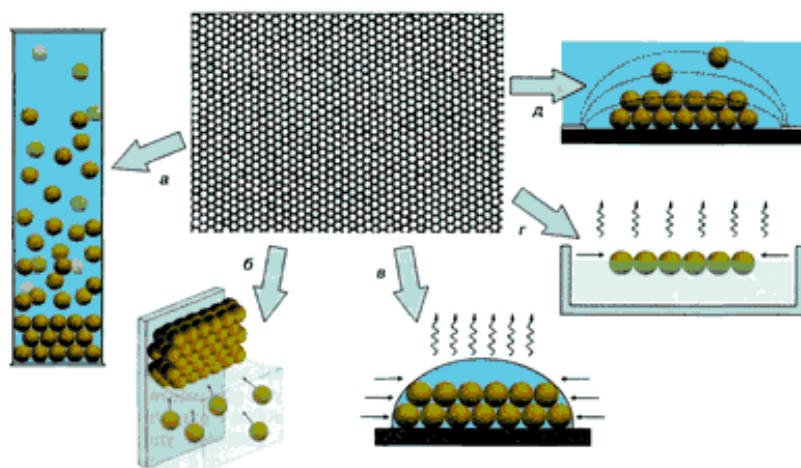


Рис. 10. Самосборка полистирольных микросфер под действием (а) гравитационного поля, (б) капиллярных сил, (в, г) сил поверхностного натяжения и (д) электрического поля. В центре – электронно-микроскопическое изображение упорядоченных полистирольных микросфер.

Необходимые условия самосборки: для формирования устойчивых упорядоченных структур необходимо наличие локального минимума потенциальной энергии, среди возможных других состояний системы, иными словами, формирование упорядоченных структур оказывается *невозможным при наличии только притягивающего или только отталкивающего потенциала* между простейшими элементами

Для создания особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поля, капиллярные силы, игра на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы.

Применение самосборки. Многообразие микро- и наноструктурированных материалов, полученных методами самосборки велико – это и самособирающиеся монослои, и различные мезопористые структуры, и фотонные кристаллы.

На сегодняшний день синтезированы дву- и трехмерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, FePt, Fe₃O₄, Co₃O₄, CoO, CdS, CdSe, CdTe, PbSe, сплавов Fe-Pt, Au-Ag, наноструктур «ядро в оболочке» CdS/CdSe, CdSe/CdTe, Pt/Fe, Pd/Ni и других, стабилизированных *поверхностно-активными веществами*.

В технике рассматриваются вопросы применения пространственно-упорядоченных массивов для *устройств хранения информации* со сверхвысокой скоростью записи, оптических позиционно-чувствительных *наносенсоров* и люминесцентных панелей. Корпорация IBM уже выпустила первые интегральные чипы с применением самосборки составных узлов.

Один из мировых лидеров в производстве носителей информации – компания Seagate использует самоупорядочение магнитных частиц для создания сред хранения информации со сверхвысокой плотностью записи.

1.19. Мицеллы. Типы мицеллярных структур. Коллоидные реакторы

Наиболее часто встречаются коллоидные нанореакторы формирующиеся ввиду лиофильных/лиофобных (или гидрофильных/гидрофобных) взаимодействий. В этом случае молекулы, ограничивающие реакционную зону, должны являться амфифильными, то есть иметь неполярный «хвост», растворимый в неполярных растворителях, или гидрофобный, и полярную «голову», обладающую гидрофильными свойствами. В воде гидрофобные части таких молекул стремятся объединиться, формируя неполярный «островок»

(часто сферической формы) в полярном растворителе. Самыми яркими амфифильными свойствами обладают молекулы и ионы поверхностно-активных веществ (ПАВ).

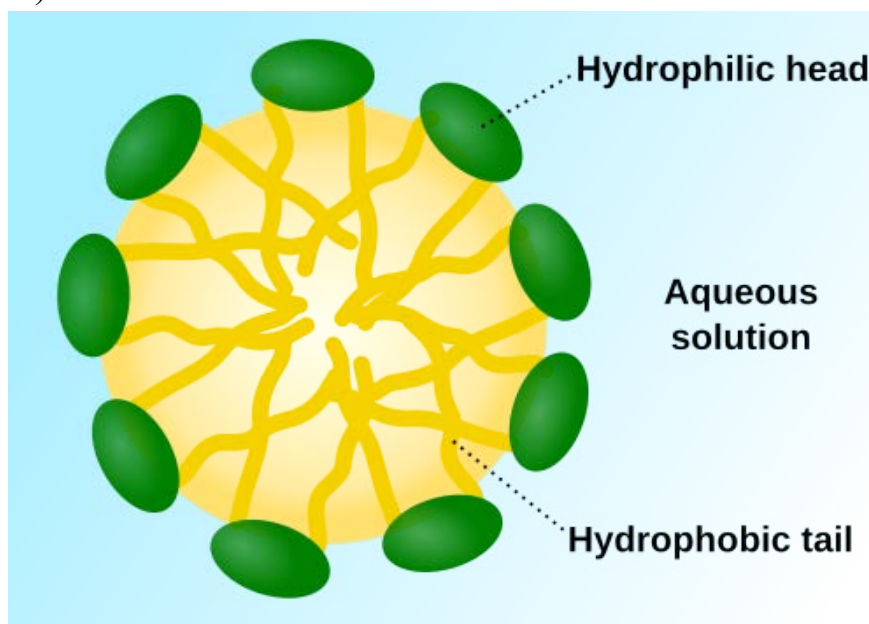


Рис.11. Схематическое изображение мицеллы фосфолипида в водном растворе

На одном конце молекулы ПАВ содержатся отрицательно ($-\text{SO}_3^-$, $-\text{SO}_4^-$, $-\text{COO}^-$) или положительно ($-\text{N}(\text{CH}_3)^{3+}$, $-\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)^{3+}$) заряженные группы, а на другом – длинный неполярный углеводородный радикал.

Попадая в воду, молекулы ПАВ, прежде всего, заполняют ее поверхность, образуя мономолекулярную пленку. В пленке полярная часть молекулы оказывается погружена в воду, а неполярный гидрофобный радикал находится в воздухе, что приводит к понижению поверхностного натяжения воды (отсюда происходит термин «поверхностно-активные вещества»). После заполнения поверхности новые молекулы ПАВ переходят в объем воды, а при достижении определенной концентрации – критической концентрации мицеллообразования (ККМ), – начинают спонтанно образовывать агрегаты (ансамбли) молекул.

В нормальных мицеллах гидрофобные углеводородные окончания ПАВ ориентированы друг к другу внутрь мицеллы, а гидрофильные группы ПАВ находятся в контакте с окружающей водной средой. Выше ККМ изменяются физические свойства молекул ПАВ (осмотическое давление, плотность, поверхностное натяжение, проводимость, самодиффузия).

В неполярных растворителях аналогичным образом возможно образование коллоидных структур, в которых углеводородные хвосты расположены по внешней нормали к поверхности, – так называемых обращенных мицелл и обратных микроэмульсий (часто называемых микроэмульсиями типа вода-масло, в противоположность эмульсиям масло-вода в системах, где полярная

фаза преобладает над неполярной). Т.е. в обращенных мицеллах гидрофильные группы образуют полярное ядро, а гидрофобные “хвосты” обращены наружу.

Коллоидные нанореакторы – это пространственно-ограниченные коллоидные системы. Формирование пространственно-ограниченной реакционной зоны в коллоидных системах происходит, главным образом, в результате нековалентных (лиофильных/ лиофобных, Ван-дер-Ваальсовых, электростатических) взаимодействий органических молекул между собой.

Размер образующихся в нанореакторе частиц не может превосходить размера самого нанореактора. Основным преимуществом пространственного ограничения реакционной зоны, в которой происходит образование нанофазы, является высокая степень монодисперсности синтезируемых частиц, редко достижимая другими методами. В качестве коллоидных нанореакторов наиболее часто используют обращенные мицеллы, адсорбционные слои, пленки Лэнгмюра-Блоджетт, микроэмульсии.

1.20. Виды активных диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Типы поляризации

Активными (управляемыми) диэлектриками являются сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электролюминофоры, материалы для излучателей и затворов в лазерной технике, электреты и др. При приложении электрического поля к диэлектрику, не происходит переноса свободных носителей заряда, т. к. их концентрация ничтожно мала. Однако при этом происходит смещение связанных зарядов, вызывающее появление поляризованного состояния.

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема.

Различают поляризацию, возникающую под действием внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), существующую в отсутствие поля. В некоторых случаях поляризация диэлектриков появляется под действием механических напряжений.

Поляризация диэлектриков — явление, связанное с ограниченным смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом электрических диполей, обычно под воздействием внешнего электрического поля, иногда под действием других внешних сил или спонтанно.

Поляризация – такое состояние вещества, при котором электрический момент некоторого объема этого вещества имеет значение отличное от нуля, а также сам процесс перехода в это состояние (рис.12).

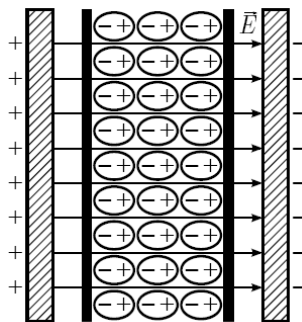


Рис. 12 Поляризация

Поляризацию диэлектриков характеризует вектор электрической поляризации. Физический смысл вектора электрической поляризации – это дипольный момент, отнесенный к единице объема диэлектрика. Иногда вектор поляризации коротко называют просто поляризацией. Количественной характеристикой поляризации служит поляризованность диэлектрика.

Поляризованностью P называют векторную физическую величину, равную отношению электрического момента dp элемента диэлектрика к объему dV этого элемента и выражаемую в Кл/м: $P = dp/dV$.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Самая быстрая поляризация (до 10 с).

Ионная поляризация обусловлена смещением упруго связанных ионов из положения равновесия на расстояния, меньшие периода кристаллической решетки. Время протекания – порядка 10 с.

Дипольно-релаксационная поляризация происходит под действием электрического поля, которое вызывает преимущественную ориентацию диполей. Протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Более медленная по сравнению с электронной и ионной поляризацией. После снятия поля, частицы постепенно разориентируются. Характерна для жидкостей, состоящих из полярных молекул.

Резонансная поляризация – ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.

Миграционная поляризация обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованием объемных зарядов, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация существует только у сегнетоэлектриков.

Сегнетоэлектрики — твердые диэлектрики (некоторые ионные кристаллы и пьезоэлектрики), обладающие в определенном интервале температур собственным электрическим дипольным моментом, который может быть переориентирован за счет приложения внешнего электрического поля.

Наличие явления гистерезиса по отношению к электрическому дипольному моменту дало второе название данных веществ – ферроэлектрики (в иностранной литературе)

Пьезоэлектрический эффект – эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект).

Физической причиной пьезоэффекта является асимметричное, упругое смещение зарядов в ионных или сильнополярных диэлектриках, в результате которого в структуре диэлектрика возникают диполи.

Пироэлектрики – кристаллические диэлектрики, сильно изменяющие поляризованность P при изменении температуры T .

Количественно пироэффект характеризуется пироэлектрическим коэффициентом:

$$p = - \frac{dP}{dT}$$

Пироэффект обратим, то есть изменение P также вызывает изменение T .

Электретом называют тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле, т. е. электрет является формальным аналогом постоянного магнита

Виды электретов: термоэлектреты; фотоэлектреты; электроэлектреты; радиоэлектреты; трибоэлектреты.

1.21. Механизм образования полярных фаз в сегнетоэлектрике на примере BaTiO_3

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема

В электрическом поле у сегнетоэлектрика появляется поляризация, состоящая из двух компонентов

$$P = P_{\text{см}} + P_{\text{сп}},$$

где $P_{\text{сп}}$ – проекция вектора спонтанной поляризации на направление поля; $P_{\text{см}}$ – поляризация смещения.

Диэлектрическая проницаемость представляется в виде

$$\epsilon_r = 1 + 4\pi \frac{P_{cn}}{E_{cp}} + 4\pi \frac{P_{cm}}{E_{cp}}$$

В сегнетоэлектриках возникает большое внутреннее поле.

В решетке BaTiO₃ между ионами O²⁻ и Ti⁴⁺ имеется односторонний зазор, равный 0,1 Å.

В результате такой «рыхлости», ион Ti⁴⁺ может свободно смещаться в октаэдрической пустоте. И он действительно прилипает к одному или нескольким ионам кислорода в октаэдре. Возникает нарушение симметрии решетки кристалла и появляется мощное внутреннее поле. Это поле действует на соседние области кристалла, поляризуя их, а они в свою очередь, на другие и так в пределах домена.

Появляется, ориентированная в определенном направлении, спонтанная поляризация.

При понижении температуры в кристаллах титаната бария (рис.13) происходит ряд последовательных сегнетоэлектрических фазовых переходов: при 120 °С они переходят из кубической (параэлектрической) фазы с пр. гр. Pm3m в тетрагональную полярную (сегнетоэлектрическую) фазу с пр. гр. P4mm,

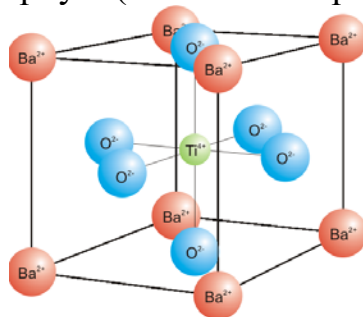


Рис.13. Кристалл титаната бария

Изменение структуры и направления вектора спонтанной поляризации в кристаллах титана бария при понижении температуры.

Фазовый переход при температуре 120°С сводится к тому, что одно из ребер кубической ячейки удлиняется и становится полярной тетрагональной осью симметрии, два других ребра укорачиваются, переходя в тетрагональные оси. Ниже 5°С титанат бария испытывает второе фазовое превращение. Получается новая сегнетоэлектрическая фаза, устойчивая между 5°С и -90°С и обладающая орторомбической симметрией. Элементарная ячейка может быть получена из исходной кубической ячейки, если её растянуть вдоль диагонали одной из граней

куба и сжать вдоль другой диагонали той же грани. Растянутая диагональ служит полярной осью кристалла.

При -90°C происходит третий фазовый переход: кристалл становится ромбоэдрическим с полярной осью вдоль одной из пространственных диагоналей куба.

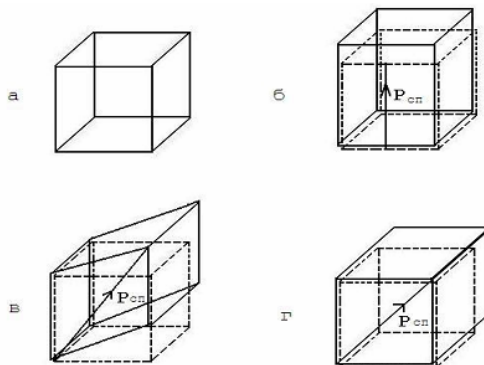


Рис. 14. Элементарные ячейки четырёх фаз кристалла BaTiO_3

- а) кубическая, стабильна выше 120°C
- б) тетрагональная, стабильна между 1200°C и 50°C
- в) ромбическая, стабильна между 50°C и -900°C
- г) ромбоэдрическая, стабильна при температуре ниже -900°C .

1.22. Электрофорез. Применение электрофореза. Ката- и анафорез. Электронная бумага.

Электрофорез (от электро- и греч. φορέω – переносить) – это электрокинетическое явление перемещения частиц дисперсной фазы (коллоидных или белковых растворов) в жидкой или газообразной среде под действием внешнего электрического поля.

С помощью электрофореза удаётся покрывать мелкими частицами поверхность, обеспечивая глубокое проникновение в углубления и поры.

Различают две разновидности электрофореза: **катафорез** – когда обрабатываемая поверхность имеет отрицательный электрический заряд (то есть подключена к отрицательному контакту источника тока) и **анафорез** – когда заряд поверхности положительный.

Электрофорез применяют в физиотерапии, для окраски автомобилей, в химической промышленности, для осаждения дымов и туманов, для изучения состава растворов и др.

Электрофорез является одним из наиболее важных методов для разделения и анализа компонентов веществ в химии, биохимии и молекулярной биологии.

В биохимии и молекулярной биологии электрофорез используется для разделения макромолекул – белков и нуклеиновых кислот (а также их фрагментов).

Этот метод находит широчайшее применение для разделения смесей биомолекул на фракции или индивидуальные вещества и используется в биохимии, молекулярной биологии, клинической диагностике, популяционной биологии (для изучения генетической изменчивости) и др.

Электронная бумага (также электронные чернила) – технология отображения информации, разработанная для имитации обычной печати на бумаге, в которой используется электрофорез.

В отличие от традиционных плоских жидкокристаллических дисплеев, в которых используется просвет матрицы для формирования изображения, электронная бумага формирует изображение в отражённом свете, как обычная бумага, и может хранить изображение текста и графики в течение достаточно длительного времени, не потребляя при этом электрической энергии и затрачивая её только на изменение изображения.

В отличие от традиционной бумаги – позволяет произвольно изменять записанное изображение. Изображение на ней формируется аналогично письму по обычной бумаге карандашом – твёрдыми пигментными частицами, на (в) микроструктурном материале, дисперсно рассеивающем свет подобно волокнам бумаги. Из-за чего угол обзора получается практически такой же, как и обычной бумаги – много превосходя таковой у плоских жидкокристаллических дисплеев.

Электронная бумага также является устройством светомодулирующего типа с присущими ему положительными свойствами и работает в чистом виде в отражённом свете без промежуточных преобразований светового потока – как обычный лист с печатным текстом или изображением, вследствие чего достигается высокая яркость и контрастность получаемого изображения. Эффект памяти обеспечивается удержанием пигментных частиц на поверхности твёрдого тела (подложки) силами Ван-дер-Ваальса

Электронная бумага была впервые разработана в Исследовательском Центре компании Ксерокс в 1970-х годах. Первая электронная бумага, названная Гирикон (англ. Gyricon), состояла из полиэтиленовых сфер от 20 до 100 мкм в диаметре. Каждая сфера состояла из отрицательно заряженной чёрной и положительно заряженной белой половины. Все сферы помещались в прозрачный силиконовый лист, который заполнялся маслом, чтобы сферы свободно вращались. Полярность подаваемого напряжения на каждую пару электродов определяла, какой стороной повернется сфера, давая, таким образом, белый или чёрный цвет точки на дисплее.

1.23. Методы разделения наночастиц по размеру. Метод седиментации. Использование молекулярных сит.

Метод седиментации

Данный метод основан на различной скорости оседания частиц разного размера в поле силы тяжести. Согласно формуле Стокса, скорость оседания частиц пропорциональна квадрату радиуса

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) = 6 \pi \eta r v$$

где r – радиус частицы, ρ – плотность частицы, ρ_0 – плотность растворителя) скорость оседания частиц пропорциональна квадрату радиуса. Следовательно, определение скорости седиментации может быть положено в основу определения распределения частиц по размеру.

Для проведения анализа в хорошо диспергированной системе регистрируют изменение веса осадка в зависимости от времени. Для монодисперсной системы зависимость веса осадка от времени определяется выражением

$$\frac{dP}{dt} = c \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right) v S g ,$$

где c – концентрации частиц дисперсной фазы, v – скорость оседания, S – площадь подложки.

Скорость накопления осадка постоянна до момента времени t_r , когда все частицы осядут:

$$t_r = \frac{H}{v} = \frac{9 \eta H}{2 r^2 (\rho - \rho_0) g}$$

Таким образом размер частиц монодисперсной системы можно определить по формуле

$$r = \sqrt{\frac{9 \eta H}{2 (\rho - \rho_0) g t_r}} .$$

В реальной полидисперсной системе значения r лежат в интервале от $r_{\min}$ до $r_{\max}$, а фракционный состав может быть охарактеризован соответствующей функцией распределения массы частиц по размерам $f(r)$. Тогда

$$f(r) = \frac{1}{m_{\max}} \cdot \frac{dm(r)}{dr}$$

При седиментации полидисперсной системы частицы разных радиусов оседают независимо друг от друга и движутся с определенной для каждого радиуса скоростью $v(r)$, то есть скорость накопления осадка постоянно меняется.

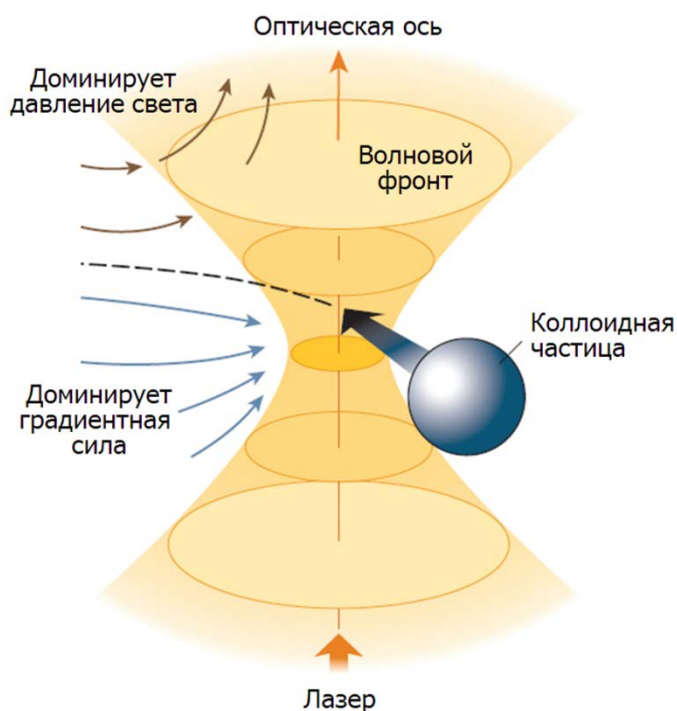
Второй способ разделения наночастиц по размеру – использование молекулярных сит: размерно-селективная адсорбция наночастиц мезопористыми молекулярными ситами. Например, диаметр пор молекулярных сит на основе мезопористого оксида кремния (МСМ) составляет от 2 до 50 нм. Подбирая молекулярные сита с узким диапазоном пор различного размера, можно отделять наночастицы узкого гранулометрического состава.

1.24. Оптический пинцет. Назначение, строение, принцип действия.

С помощью оптического пинцета можно контролируемо передвигать частицы размером от 10 нанометров до 10 микрометров, изучать их поведение, а при желании – даже собирать из них различные структуры.

Оптический пинцет, иногда «лазерный пинцет» или «оптическая ловушка» – научный прибор, который позволяет манипулировать микроскопическими объектами с помощью лазерного света (обычно испускаемого лазерным диодом). Он позволяет прикладывать к диэлектрическим объектам силы от фемтоньютон до наноньютон и измерять расстояния от нескольких нанометров до микронов. В последние годы оптические пинцеты начали использовать в биофизике для изучения структуры и принципа работы белков.

Для «захвата» коллоидной частицы оптический пинцет использует сильно сфокусированный лазерный пучок.



Градиент интенсивности излучения затягивает частицу в область перетяжки пучка, тогда как давление света выталкивает ее по направлению оптической оси.

Когда градиентная сила доминирует – частица «поймана» в области точки фокуса; в противном случае частица движется вдоль оптической оси.

При взаимодействии с электромагнитным полем, создаваемым светом, у коллоидной частицы возникает дипольный момент, благодаря чему под

действием градиента поля частица затягивается в перетяжку лазерного пучка. Для стабильного «захвата» необходимо, чтобы градиент электромагнитного поля доминировал над давлением света, что достигается путем правильно сконфигурированной оптической схемы.

1.25. Пленки Ленгмюра-Блоджетт. Амфифильные молекулы. Получение многослойных пленок ЛБ

Ленгмюровские пленки – мономолекулярные пленки нерастворимых амфифильных веществ на поверхности жидкости. Процесс образования пленки происходит на фазовой границе раздела газ-жидкость. Ленгмюровская ванна заполняется водой, на поверхность помещается капля поверхностно-активного вещества в органическом растворителе, который быстро испаряется. Образуется адсорбционный слой на границе раздела фаз. Образование мономолекулярного слоя на поверхности жидкости. Одни органические молекулы гидрофильны, а другие гидрофобны. Однако, существуют сложные молекулы, разные части которых обладают в этом отношении разными свойствами, а молекула в целом называется амфифильной. Например, в молекуле стеариновой кислоты, имеется полярная головка, образованная группой – COOH , которая может отдать свой протон воде, а сама зарядиться отрицательно. Головка, таким образом, будет удерживаться в воде силой кулоновского притяжения. В то же время гидрофобный углеводородный хвост – $\text{C}_{17}\text{H}_{35}$ выталкивается из воды. Для такой молекулы характерно расположение на границе раздела жидкой и газовой фазы

Перенос монослоя на твердую подложку осуществляется вертикальным или горизонтальным лифтом (рис. 15). Получение многослойных пленок ЛБ

ЛБ-метод позволяет получать моно- и многослойные пленочные структуры контролируемого состава. Последовательным переносом монослоев можно приготовить многослойную наноразмерную пленку из мономолекулярных (по толщине) слоев.

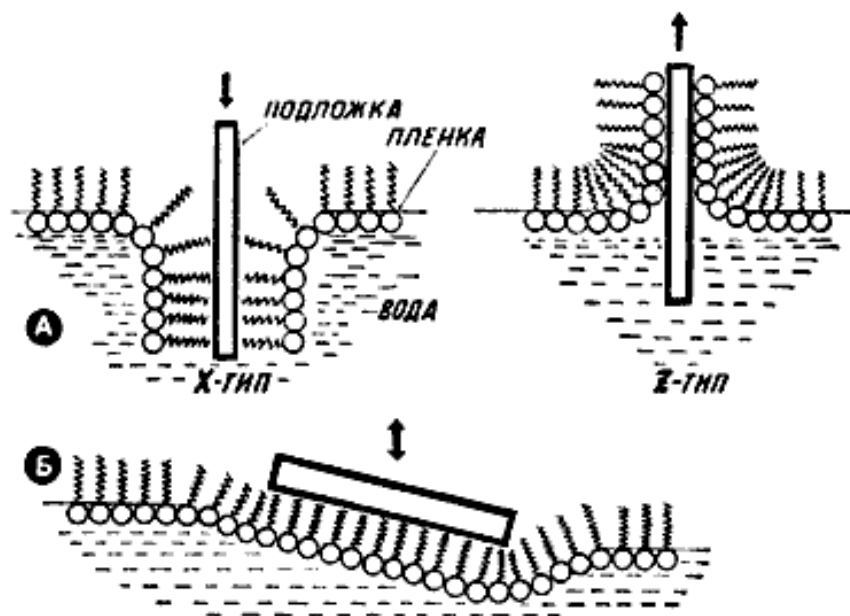


Рис.15. Перенос монослоя на твердую подложку

В зависимости от способа переноса и типа подложки (гидрофильной или гидрофобной), формируются структуры с различной укладкой молекул в смежных слоях, так называемые X-, Y-, Z-структуры. Многослойные структуры X-, Z- и Y-типов отличаются ориентацией молекул относительно подложки. Структуры X- и Z-типов полярны, так как все молекулы «смотрят» согласованно в одну сторону (хвосты – к подложке или от подложки для X- и Z-типов соответственно).

Y-структура соответствует неполярной двухслойной упаковке, напоминающей устройство биологической мембраны в зависимости от способа переноса и типа подложки.

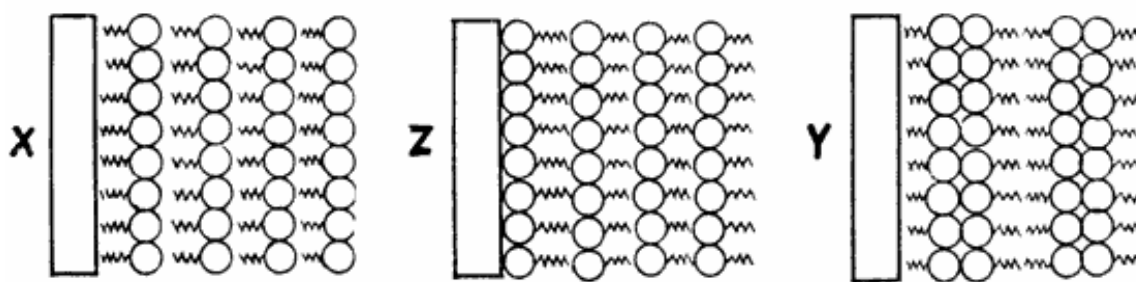


Рис. 16. X-, Y-, Z-структуры

1.26. Получение нанопорошка методом термического испарения и конденсации материала из паровой фазы

Методы физического осаждения из паровой фазы

Данные методы получения нанопорошков в настоящее время используются наиболее широко. Это связано с тем, что технологии испарения вещества с помощью различных высокоинтенсивных источников энергии и последующего осаждения его из паровой фазы являются достаточно отработанными, легко контролируются и обеспечивают высокие требования по чистоте получаемого нанопорошка, особенно при использовании камер с контролируемой атмосферой. В последнем случае чаще всего используются вакуумные камеры или камеры, заполненные инертными газами – гелием или аргоном, ксеноном. При испарении металлов в вакууме или инертном газе атомы металла, перешедшего в газовую фазу (пар), стремятся к объединению в частицы порядка нескольких нанометров, которые затем осаждаются на охлаждаемую подложку.

Данная группа методов позволяет получать сложно легированные порошки, причем сплавы заданного состава можно получать как испарением предварительно легированного материала, так и одновременным испарением отдельных компонентов. Размер частиц получаемых порошков в зависимости от разновидности метода и технологических параметров может составлять от 5 до 100 нм.

Термическое испарение. При данном методе проводят нагрев испаряемого вещества в тигле. В настоящее время используются разные способы нагрева, как правило, с использованием высокоинтенсивных источников энергии: высокочастотный индукционный, электронно-лучевой, электродуговой, плазменный, лазерный.

Принципиальная схема получения нанопорошка методом термического испарения и конденсации материала из паровой фазы

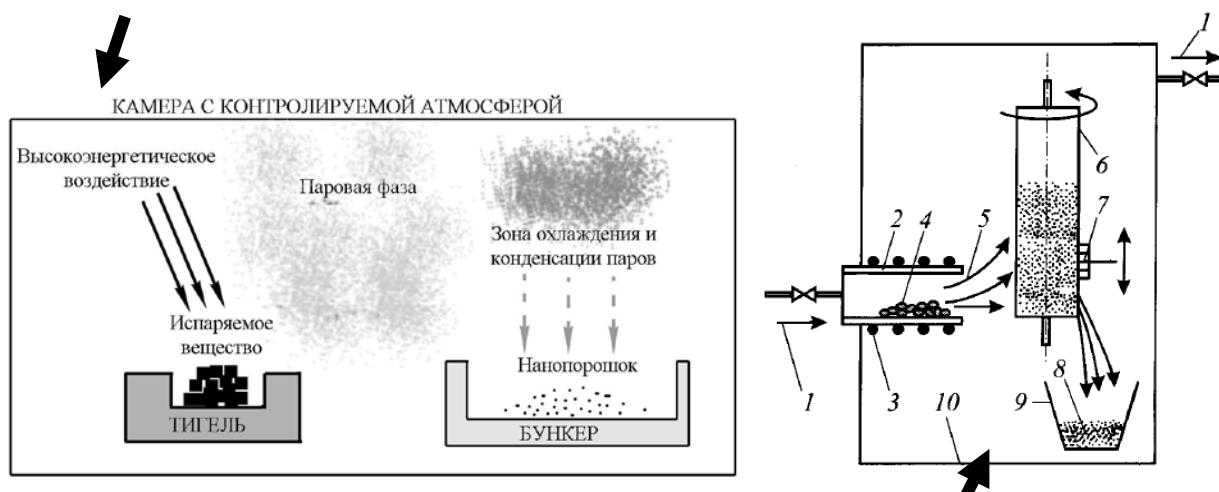


Рис. 17. Установка для получения нанопорошков методом испарения-конденсации: 1 - инертный газ; 2 - электропечь; 3 - нагреватель; 4 - сырье; 5 - поток пара; 6 - охлаждаемый вращающийся барабан; 7 - скребок; 8 - нанопорошок; 9 - контейнер; 10 - корпус

Получаемые этим методом порошки имеют сферическую или ограниченную форму и могут быть, как металлическими, так и представлять собой интерметаллиды или другие соединения. Термическим испарением массивных оксидов электронным пучком в инертной атмосфере получали порошки аморфных Al_2O_3 и SiO_2 и кристаллического Y_2O_3 . Преимуществом метода является получение чистых порошков с узким распределением частиц по размерам, а недостатком – низкая производительность процесса.

Методы формования изделий из нанопорошков

Компактирование является технологическим процессом, в результате которого из порошка получают готовую деталь. Процесс обычно проводят в две стадии: *формовка и спекание*. В ряде методов обеспечивается совмещение этих стадий в одну. Для получения объемных наноматериалов из порошков в основном используется формовка при комнатной температуре с последующим спеканием. В порошковой металлургии в настоящее время применяются множество технологий формовки. Для прессования нанопорошков наиболее широкое распространение получила *технология одноосного прессования*. Используются такие его методы как: статическое (прессование в пресс-формах или штамповка), динамическое (магнитно-импульсное и взрывное) и вибрационное (ультразвуковое) прессование. Для получения высокоплотных формовок используется прессование, при котором условия сжатия материала близки к всестороннему. Эта технология получила название *изостатического прессования*. Существует несколько его вариантов: гидростатическое, газостатическое, квазигидростатическое.

Методы спекания. Спекание формовок из нанопорошка ограничено невозможностью использовать высокие температуры. Повышение температуры спекания приводит к уменьшению пористости, но, с другой стороны, ведет и к росту зерна. Эту проблему решают рядом методов активации, позволяющих добиваться получения низкой пористости изделий при более низких температурах спекания:

- применение высокоскоростного микроволнового нагрева (при увеличении скорости нагрева с 10 до 300 град/мин необходимая температура спекания нанопорошка TiO_2 снижается с 1050 до 975°C;
- ступенчатое контролируемое спекание;
- плазмоактивированное спекание.
- проведение спекания в вакууме или восстановительных средах (для металлических порошков)

1.27. Получение нанопорошков механическим размельчением

Механическое измельчение частиц материала принадлежит к числу наиболее распространенных методов изготовления порошков. Особенно легко получать порошки на основе хрупких материалов. Порошки пластичных, высокопрочных и аморфных материалов получить труднее. В этом случае возрастает опасность чрезмерного нагрева материала и загрязнения его продуктами износа рабочих частей технологического оборудования.

При *механическом размельчении с использованием мельниц* уменьшение размеров частиц материала происходит в результате интенсивного раздавливания между рабочими органами мельницы.

В зависимости от вида материала и требуемых свойств нанопорошка используются в основном планетарные, шаровые и вибрационные мельницы. Средний размер частиц получаемых порошков может составлять от 5 до 200 нм. Другим вариантом метода может быть использование атриторов-высокоэнергетических измельчительных аппаратов с неподвижным корпусом-барабаном и мешалками, передающими движение шарам в барабане. В этом случае измельчение размалываемого материала идет главным образом за счет истирания, а не удара. Главный недостаток метода – загрязнение порошка вследствие износа рабочих частей оборудования.

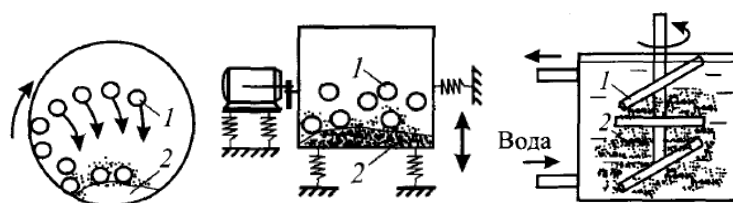


Рис 18. Шаровая мельница Вибромельница Аттритор

При *методе противоточного размола в псевдоожигенном слое* измельчение частиц порошка происходит за счет столкновения друг с другом. При этом процессы взаимного столкновения частиц, разогнанных до высоких скоростей в струе газа, происходят в середине псевдоожигенного слоя, образованного этими частицами. Только очень незначительная доля частиц соприкасается со стенками камеры, в которой осуществляется процесс размола. В нижней части рабочей камеры имеется система сопел, из которых под высоким давлением выходит газ. Образующиеся газовые струи встречаются друг с другом в центре нижней части камеры, разрыхляют размалываемое вещество и образуют псевдоожигенный слой. В этом слое размалываемые частицы с большими скоростями перемещаются от краев к центру камеры. Из зоны размола поток частиц уносится струями газа в верхнюю часть установки, в которой имеется сепаратор для разделения частиц по размерам. Частицы меньшие определенного размера уносятся с потоком газа в систему фильтров, где отделяются от газового потока и попадают в накопительный бункер. Крупные частицы сепаратор направляет обратно в зону размола.

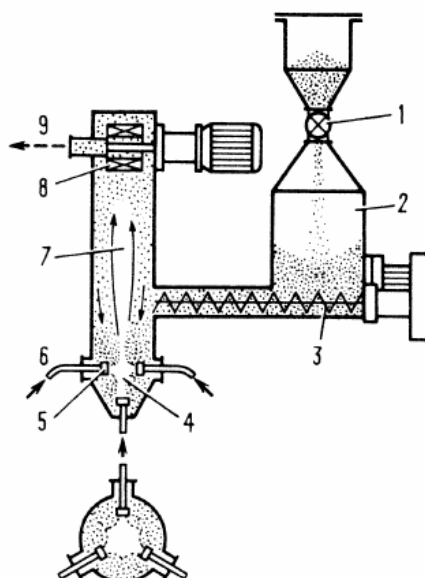


Рис 19 Схема установки для противоточного размола в псевдоожигенном слое :
1-питающее устройство, 2- бункер с исходными частицами вещества, 3- система подачи частиц в камеру размола, 4- псевдоожигенный слой, 5- сопла подачи

газа, 6- трубопровод подачи газа высокого давления, 7- камера для размола, 8- сепаратор, 9- выходной коллектор газа с мелкими частицами

1.28. Получение наноматериалов с использованием интенсивной пластической деформации

Получение наноматериалов с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) включает обработку металлов и сплавов сверхбольшими деформациями, что приводит к образованию ультрамелкозернистой структуры с размером зерна около 100 нм. Для достижения этого применяют такие методы, как экструзия или сдвиг при высоком давлении, что приводит к фрагментации и сильной разориентации зерен, улучшая механические (прочность, пластичность) и функциональные свойства материалов.

Принципы метода

Интенсивная деформация: Материал подвергается деформациям, которые в десятки и сотни раз превышают обычные, часто при высоких температурах и давлениях.

Фрагментация и разориентация: В процессе деформации происходит сильное измельчение зерен, их фрагментация и сильная разориентация относительно друг друга.

Образование наноструктуры: В итоге формируется структура с ультрамелкими зернами размером порядка 100 нм, что и является ключевым для получения наноматериалов.

Методы интенсивной пластической деформации

Равноканальное угловое прессование (РКУП): Образец проходит через канал, имеющий форму, напоминающую букву "Г" (например, под углом (90°)).

Протяжка со сдвигом: Материал подвергается одновременному сжатию и сдвигу.

Другие методы: Также могут использоваться другие виды деформации, такие как экструзия, вытяжка, осадка и другие, но с целью наноструктурирования они должны обеспечить сверхбольшие деформации.

Преимущества метода

Создание объемных наноматериалов: ИПД позволяет получать объемные (не в виде порошков или тонких пленок) наноструктурные материалы.

Улучшение свойств: Получаемые наноматериалы обладают высокой прочностью, повышенной пластичностью, стойкостью к коррозии и радиации, а также улучшенной электропроводностью.

Широкое применение: Наноматериалы, полученные методом ИПД, могут найти применение в медицине, машиностроении и других областях.

1.29. Получение нанопорошка методом распыления жидкого расплава

Данная группа методов основана на быстром распылении и охлаждении расплава исходного материала. Технология позволяет получить порошки размером не меньше 100 нм. Вместе с тем, получаемые порошки с размером частиц 0,5-10 мкм имеют нанокристаллическую (а в ряде случаев и аморфную) структуру и могут также быть отнесены к наноматериалам. Процессы получения порошка можно вести в защитной атмосфере. В настоящее время для получения нано- и/или нанокристаллических порошков используются в основном три следующих варианта этой технологии.

Контактное охлаждение при помощи водоохлаждаемого диска или барабана. Метод основан на подаче расплавленного материала на быстро вращающийся водоохлаждаемый диск или барабан, которые изготовлены из материалов с высокой теплопроводностью (медь). Скорость охлаждения до 10^8 К/с. Поверхность барабана или диска выполняется шероховатой (зубчатой), так как в случае гладкой поверхности будет обеспечиваться получение фольги толщиной порядка 10-50 мкм с аморфной или нанокристаллической структурой. Получаемый порошок отличается хлопьевидной формой частиц. Такая форма может приводить к неоднородной структуре и анизотропии свойств у изделий, сформированных из подобных порошков. Поэтому данные порошки обычно дополнительно подвергают механическому измельчению. Это и является главным недостатком метода.



Рис. 20. Принципиальная схема распыления порошка из расплава при помощи водоохлаждаемого барабана

Ударное распыление расплава. При этом методе струя или капли расплава механически разбиваются на мелкие частицы при соударении с интенсивно охлаждаемыми, быстро вращающимися металлическими лопатками. Обеспечивается скорость охлаждения до 107 К/с. Частички порошка имеют неправильную форму и для получения при последующем формовании качественных изделий с однородной структурой необходимо дополнительно подвергать порошок механическому измельчению.

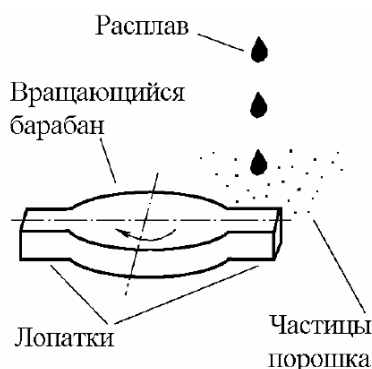


Рис.21. Принципиальная схема процесса ударного распыления расплава.

Электрогидродинамическое распыление расплава. В этом методе для распыления расплава используются электростатические силы. Струя расплава подается в сопло с диаметром отверстия порядка 80 мкм, перед которым расположен кольцевой электрод. К нему прикладывается постоянное напряжение 3-20 кВ. В результате из сопла вылетают положительно заряженные мелкие капли расплава, образующие после охлаждения частицы порошка. Размер частиц в зависимости от материала и технологических параметров может составлять 100 нм – 10 мкм.

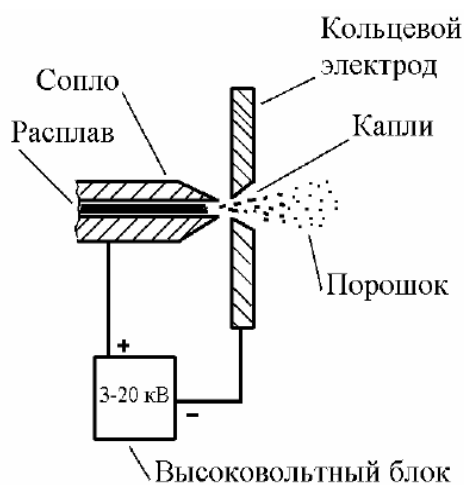


Рис.22. Принципиальная схема процесса электрогидродинамического распыления расплава

Недостатком этого метода является очень низкая производительность (2 г/ч с одного сопла).

1.30. Химические методы синтеза наноматериалов. Золь-гель метод, гидротермальный синтез, синтез в микроэмульсиях

К чисто химическим методам можно отнести такие способы получения, в которых наночастицы образуются из прекурсоров, не подвергающихся сильным воздействиям, например, испарению

“Золь-гель метод” - совокупность стадий, включающих приготовление раствора прекурсора, последовательный перевод его сначала в золь, а затем в гель за счет процессов гидролиза и конденсации, последующую старение, высушивание и термообработку продукта

Золи, коллоидные растворы — это ультрамикроретерогенные дисперсные системы, размер частиц которых лежит в пределе от 1 до 100 нм. Золи занимают промежуточное положение между истинными растворами и грубодисперсными системами (суспензиями, эмульсиями). Дисперсная система — это смесь из двух или более веществ, которые совершенно или практически не смешиваются и не реагируют друг с другом химически. Первое из веществ (дисперсная фаза) мелко распределено во втором (дисперсионная среда).

Гели — дисперсные системы, характеризуются структурой, придающей им механические свойства твердых тел. Гель — это когерентная система, состоящая из как минимум двух компонентов, как минимум один из которых непрерывно простирается в растворителе. Гели образуются при коагуляции и последующей коалесценции золь. При высушивании гели необратимо разрушаются.

Факторы, влияющие на размер частиц в “золь-гель методе”. При образовании золь распределение наночастиц по размерам определяется временем образования зародышей. Размер коллоидных частиц возрастает с увеличением времени реакции (поскольку к поверхности нанокристалла поступает больше вещества) и с повышением температуры (возрастает скорость роста существующих зародышей).

Гидротермальный и сольвотермальный синтез наночастиц. В основе гидротермального метода синтеза лежит высокая растворимость большого количества неорганических веществ в воде при повышенных температуре и давлении и возможность последующей кристаллизации растворенного материала из жидкой фазы. Высокая температура воды играет важную роль в трансформации материала, т.к. при этом создается повышенное давление паров,

а сама структура воды отличается от таковой при комнатной температуре. При высокой температуре изменяются свойства самих реагентов (растворимость, скорости диффузии, реакционная способность).

Синтез в микроэмульсиях. Микроэмульсии – термодинамически устойчивые, изотропные жидкие коллоидные системы, образующиеся самопроизвольно при смешении двух жидкостей с ограниченной взаимной растворимостью (например вода и масло), стабилизированные межфазной пленкой поверхностно-активного вещества. От обращенных мицелл микроэмульсии отличаются большим размером (диаметр микрокапель может достигать 100 нм).

Для получения твердых наночастиц обычно проводят смешивание двух идентичных (содержащих одно и то же ПАВ, с одинаковым соотношением вода-масло) обращенных микроэмульсий, водные фазы которых содержат исходные реагенты, например, хорошо растворимые соли, дающие после реакции искомое малорастворимое вещество, или соль и восстановитель.

1.31. Зондовая микроскопия. Роль сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в нанотехнологиях. Методы зондовой микроскопии: сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), магнитно-силовая микроскопия (МСМ)

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) (англ. scanning probe microscopy, SPM) — область микроскопии, в которой изображение поверхности объекта формируется с помощью зонда, сканирующего его поверхность. Изображение получается путем механического перемещения зонда по траектории в виде раstra (строка за строкой) и регистрации взаимодействия между зондом и поверхностью как функции его положения (координат).

Их называют «глаза и пальцы нанотехнологии»: с их помощью можно манипулировать отдельными атомами и «видеть» отдельные атомы.

Наиболее широко используются атомно-силовая и сканирующая туннельная микроскопия, а также магнитно-силовая и сканирующая ближнеполевая оптическая микроскопия.

Общим для них является наличие зонда (кантилевера), расположенного в непосредственной близости от исследуемой поверхности, и сканирующего механизма, с помощью которого происходит последовательный тестинг поверхности от точки к точке, а затем на мониторе построчно строится изображение.

Кантилевер (англ. cantilever) — устоявшееся название наиболее

распространенной в сканирующей зондовой микроскопии конструкции микромеханического зонда.

Кантилевер представляет собой массивное прямоугольное основание размерами примерно $1,5 \times 3,5 \times 0,5$ мм с выступающей из него балкой (собственно кантилевером) шириной около 0,03 мм и длиной от 0,1 до 0,5 мм. Одна из сторон балки является зеркальной (иногда для усиления отраженного лазерного сигнала на нее напыляют тонкий слой алюминия), что позволяет использовать оптическую систему контроля изгиба кантилевера. На противоположном свободном конце балки находится игла, взаимодействующая с измеряемым образцом. Форма иглы может значительно изменяться в зависимости от способа изготовления. Радиус острия иглы промышленных кантилеверов находится в пределах от 5 до 90 нм, лабораторных — от 1 нм.

Сканирующая туннельная микроскопия СТМ (англ. STM) — один из методов зондовой сканирующей микроскопии, в котором анализируют плотность состояний атомов поверхности с помощью измерения туннельного тока. Предназначен для исследования поверхности проводящих веществ и материалов на атомном уровне и для формирования трехмерного изображения поверхности. Метод является также одной из технологий, позволяющих создавать на поверхности вещества (материала) искусственные наноструктуры путем перемещения отдельных атомов.

АСМ. Основной принцип работы АСМ заключается в воздействии сил со стороны поверхности образца на острие сканирующей иглы. Сила, которая чаще всего ассоциируется с АСМ, — это межатомная сила, называемая также Ван-дер-Ваальсовой.

Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) отображает пространственные вариации магнитных сил на поверхности образца. Особенностью конструкции МСМ является то, что острие сканирующей иглы покрывается тонкой ферромагнитной пленкой. В магнитных АСМ датчиках зонды покрываются тонкими слоями ферромагнитных материалов, таких как Co, Fe, CoCr, FeCr, CoPt и др.

МСМ может визуализировать естественно встречающиеся и свободно записанные доменные структуры в магнитных материалах

Для МСМ исследований магнитных образцов с сильно развитым рельефом поверхности применяется двухпроходная методика. В каждой строке сканирования производится следующая процедура. На первом проходе снимается АСМ изображение рельефа в контактном или "полуконтактном" режиме. Затем зондовый датчик отводится от поверхности на расстояние OZ , и осуществляется повторное сканирование. Расстояние $o\ z$ выбирается таким образом, чтобы сила Ван-дер-Ваальса была меньше силы магнитного

взаимодействия. На втором проходе датчик перемещается над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца. Поскольку в этом случае локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке постоянно, изменения изгиба кантилевера в процессе сканирования связаны с неоднородностью магнитных сил, действующих на зонд со стороны образца. Таким образом, итоговый МСМ кадр представляет собой двумерную функцию $F(x,y)$, характеризующую распределение силы магнитного взаимодействия зонда с образцом.

1.32. Общие принципы всех методик СЗМ. Конструкция современного пьезосканера. Пьезокерамика. Силы, действующие между зондом и образцом в СЗМ

Зондовая сканирующая микроскопия, *сокр.*, СЗМ (англ. scanning probe microscopy *сокр.*, SPM) — область микроскопии, в которой изображение поверхности объекта формируется с помощью зонда, сканирующего его поверхность. Изображение получается путем механического перемещения зонда по траектории в виде раstra (строка за строкой) и регистрации взаимодействия между зондом и поверхностью как функции его положения (координат).

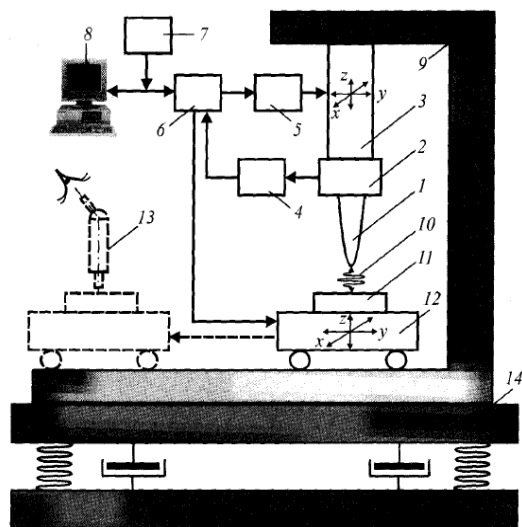


Рис.23. Принципиальная схема сканирующего зондового микроскопа (СЗМ)

1 – зонд; 2 – датчик полезного сигнала; 3 – трехкоординатный пьезосканер; 4 – цепи обратной связи; 5 – высоковольтный усилитель; 6 – контроллер; 7 – программное обеспечение для управления всеми узлами микроскопа и обработки сигнала; 8 – персональный компьютер; 9 – рама; 10 – локальное взаимодействие вершины зонда с расположенным под ним участком исследуемой поверхности; 11 – образец; 12 – управляемый двух- или трехкоординатный столик; 13 – оптический микроскоп; 14 – виброзащитный стол.

Общим для них является наличие зонда, расположенного в непосредственной близости от исследуемой поверхности, и сканирующего механизма, с помощью которого происходит последовательный тестинг поверхности от точки к точке, а затем на мониторе построено изображение.

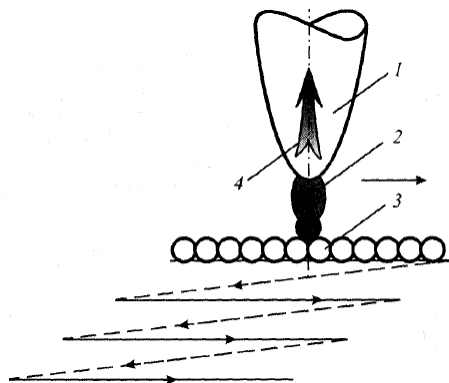


Рис.24.Схема, иллюстрирующая движение образца под зондом в процессе сбора данных. 1 — зонд; 2 - локализованное физическое поле; 3 - атомы на исследуемой поверхности; 4 - сигнал с зонда; сплошные линии - рабочие ходы развертки при сканировании поверхности; пунктирные - обратные нерабочие ходы.

Пьезокерамика представляет собой поляризованный поликристаллический материал, получаемый методами спекания порошков из кристаллических сегнетоэлектриков. Составы: титанат бария, титанат бария-кальция, титанат – цирконат свинца.

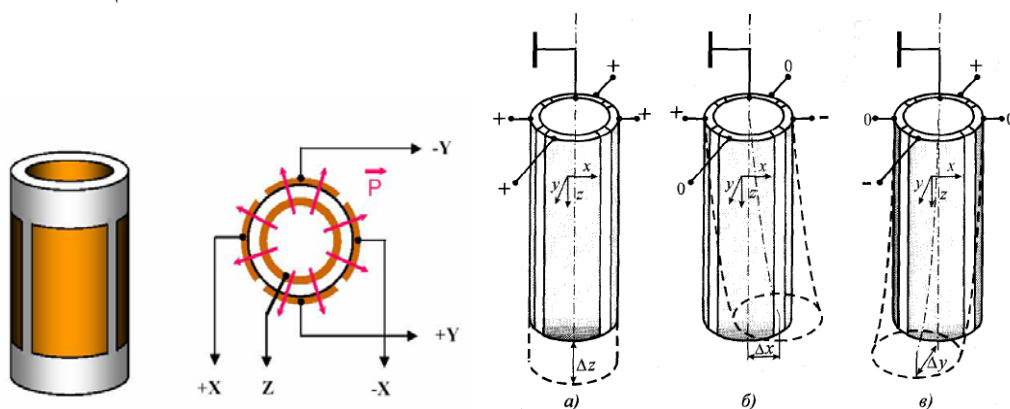


Рис.25.Конструкция и схемы работы трубчатого пьезокерамического пьезосканера

Исследование образца возможно благодаря силам, возникающим между кантилевером и поверхностью. Они довольно разнообразны. При разных расстояниях преобладают те или иные силы. Во время контакта при деформации поверхности образца кантилевером преобладает сила упругого отталкивания, а

соответствующее приближение называется задачей Герца. На расстояниях кантилевер-образец порядка нескольких десятков ангстрем главным является межмолекулярное взаимодействие, называемое силой Ван-дер-Ваальса. На таких же масштабах в присутствии жидких пленок большое влияние могут оказывать капиллярные силы и адгезия. При дальнейшем удалении от поверхности преобладающим становится электростатическое взаимодействие. На масштабах порядка тысячи ангстрем преобладают магнитные силы.

Потенциал взаимодействия зонда с поверхностью. Учитывая потенциалы сил, действующих на различных расстояниях между образцом и кантилевером, можно получить кривую, позволяющую классифицировать режимы работы атомно-силового микроскопа.

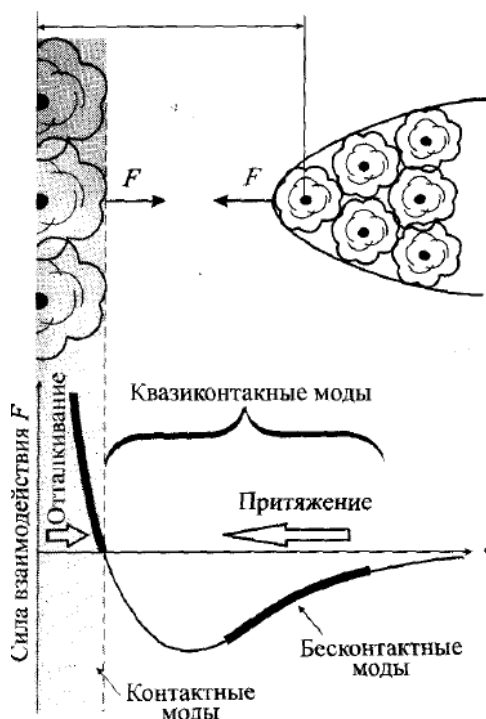
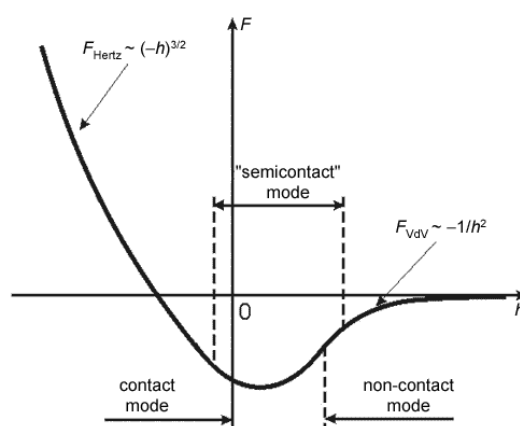


Рис.26.Схема возникновения и использования межатомных сил

1.33. Принцип работы туннельного сканирующего микроскопа. Способы получения зонда в туннельной микроскопии

Сканирующая туннельная микроскопия, *сокр.*, СТМ (англ. scanning tunneling microscopy *сокр.*, STM) – один из методов СЗМ, в котором анализируют плотность состояний атомов поверхности с помощью измерения туннельного тока. Предназначен для исследования поверхности проводящих веществ и материалов на атомном уровне и для формирования трехмерного изображения поверхности. Метод является также одной из технологий, позволяющих создавать на поверхности вещества (материала) искусственные наноструктуры путем перемещения отдельных атомов.

В СТМ острая металлическая игла подводится к образцу на расстояние нескольких ангстрем. При подаче на иглу относительно образца небольшого потенциала возникает туннельный ток. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния образец-игла.

Туннельный эффект – преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия (остающаяся при Т. э. большей частью неизменной) меньше высоты барьера.

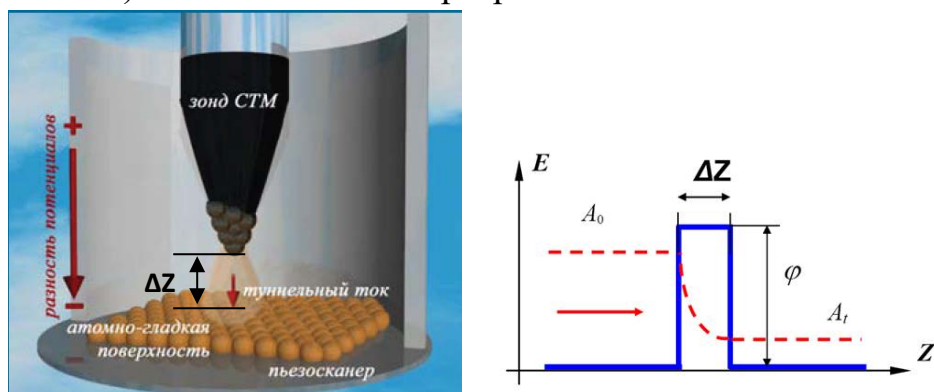


Рис.27. Принцип работы СТМ

В основе принципа работы СТМ лежит эффект туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между двумя проводниками - зондом и подложкой - во внешнем электрическом поле. В СТМ зонд подводится к образцу на расстояние порядка 1 нм. При этом образуется потенциальный барьер шириной Δz . При уменьшении зазора между зондом и образцом до нескольких ангстрем волновые функции электронов, находящихся на кончике острия и в ближайших к нему атомах исследуемой поверхности, перекрываются, и при подаче небольшого напряжения (0,01... 10 В) на зонд возникает туннельный ток. Роль барьера играет вакуумированный зазор между зондом и поверхностью. Высота барьера определяется значениями работы выхода электронов из материала зонда A_0 и образца A_t .

Так как в области зазора волновая функция электрона спадает по экспоненте, то и туннельный ток через зазор экспоненциально сильно зависит от его величины Δz

$$I_t \sim \exp(\Delta z)$$

Два основных способа создания острых игл-зондов

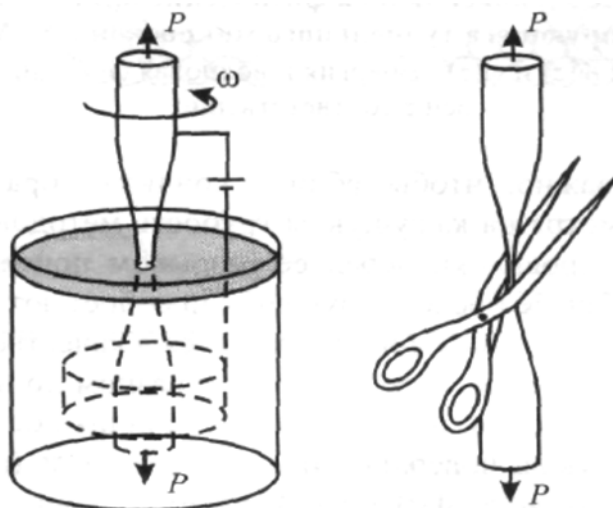


Рис.27. создание острых игл-зондов

а - метод электрохимического травления с одновременным растяжением и вращением исходной проволоки;

б - метод разрезания под острым углом растягиваемой проволоки

1.34. Атомно-силовая микроскопия. Принцип работы АСМ

Основной принцип работы АСМ заключается в воздействии сил со стороны поверхности образца на острие сканирующей иглы.

В атомно-силовой микроскопии (АСМ) изображение поверхности формируется за счет перемещения специального микрозонда по исследуемой поверхности. Микрозонд представляет собой упругую консоль (кантилевер) размером несколько сотен микрометров с острой иглой на конце.

Силы, ответственные за функционирование АСМ, – это поверхностные силы, включающие межатомные взаимодействия, молекулярные, называемые также Ван-дер-ваальсовыми, электростатические, а также капиллярные. Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли зондового датчика. В АСМ для этой цели широко используются оптические методы.

Изменения вертикального положения иглы в каждой измеряемой точке формируют матрицу данных, которая описывает топографию поверхности. Величина кручения консоли регистрируется в дополнительном файле "Torsion"

(или режим латеральных сил). Часто данный режим оказывается более чувствителен к границам структурных элементов материала, чем топография.

Горизонтальное перемещение образца в процессе сканирования (перемещение в плоскости XY) осуществляется посредством пьезокерамического сканера. Образец перемещается под острием зонда от точки к точке по растровой схеме.

1.35. Электросиловая зондовая микроскопия

В электросиловой микроскопии для получения информации о свойствах поверхности используется электрическое взаимодействие между зондом и образцом.

Рассмотрим систему, состоящую из зондового датчика, у которого зонд имеет проводящее покрытие, и образца, представляющего собой тонкий слой материала на хорошо проводящей подложке.

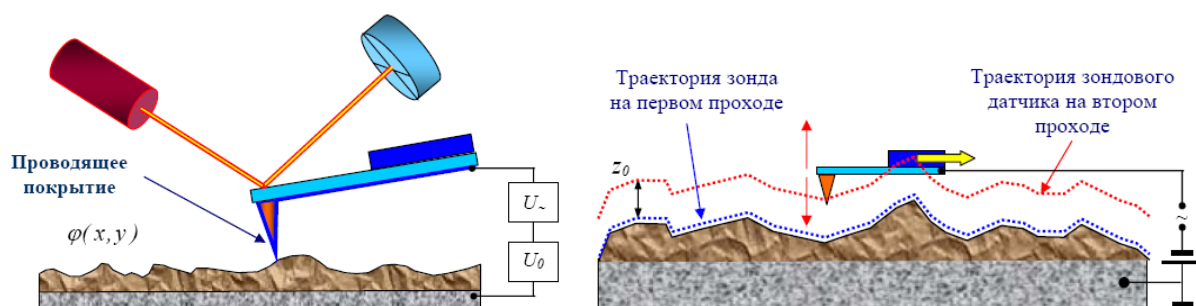


Рис.28 Электросиловая зондовая микроскопия

Как и атомно-силовая, электросиловая микроскопия имеет множество разновидностей, но все они используют локализованное электрическое поле между кончиком зонда и образцом

Для проведения электрических измерений на зонд наносятся проводящие покрытия из различных материалов (Au, Pt, Cr, W, Mo, Ti, W2C и др.).

Двухпроходная методика ЭСМ. Сила взаимодействия зонда с поверхностью на основе простой модели плоского конденсатора может быть представлена в виде

$$F_{PS} = -\frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial z} \cong -\frac{1}{2} \alpha U^2 \frac{\pi R^2}{h^2},$$

где α – постоянная величина, R – характерный радиус закругления кончика зонда, h – расстояние зонд-поверхность (или толщина пленки диэлектрика на проводящей подложке). С другой стороны сила, действующая на кантилевер со стороны образца:

$$F_{cs} = -\frac{1}{2}U^2 \frac{\partial C}{\partial z} \cong -\frac{1}{2}\alpha U^2 \frac{LW}{H^2},$$

где α – постоянная величина, L - длина кантилевера, W - ширина кантилевера, H - расстояние до поверхности (определяется размерами зонда).

Из условия

$$F_{ps} > F_{cs}$$

следует:

$$h < \sqrt{\frac{\pi R^2 H^2}{LW}}$$

Отсюда для типичных значений параметров зондовых датчиков ($L \sim 100$ мкм, $W \sim 30$ мкм, $H \sim 30$ мкм, $R \sim 10$ нм) можно получить следующую оценку: **$h < 10$ нм.**

Поскольку сама величина $\frac{\partial C}{\partial z}$ зависит от расстояния зонд-образец, для исследования диэлектрических свойств образцов применяется двухпроходная методика.

1.36. Магнитно-силовая зондовая микроскопия

Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) был изобретен для исследования локальных магнитных свойств образцов. В МСМ используются силы магнитного взаимодействия между зондом и поверхностью. Для того чтобы они возникли, необходимо, чтобы кончик зонда и локальные участки исследуемой поверхности обладали магнитным моментом

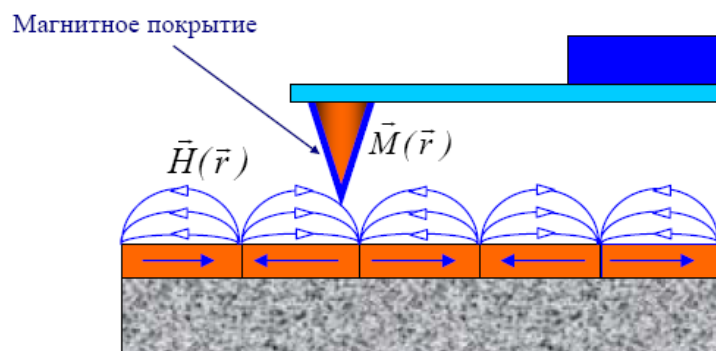


Рис.29. МСМ

В магнитных АСМ датчиках зонды покрываются тонкими слоями ферромагнитных материалов, таких как Co, Fe, CoCr, FeCr, CoPt и др.

Для МСМ исследований магнитных образцов с сильно развитым рельефом поверхности применяется двухпроходная методика. В каждой строке сканирования производится следующая процедура. На первом проходе снимается АСМ изображение рельефа в контактный или "полуконтактный" режиме. Затем зондовый датчик отводится от поверхности на расстояние z_0 , и осуществляется повторное сканирование. Расстояние z_0 выбирается таким образом, чтобы сила Ван-дер-Ваальса была меньше силы магнитного взаимодействия.

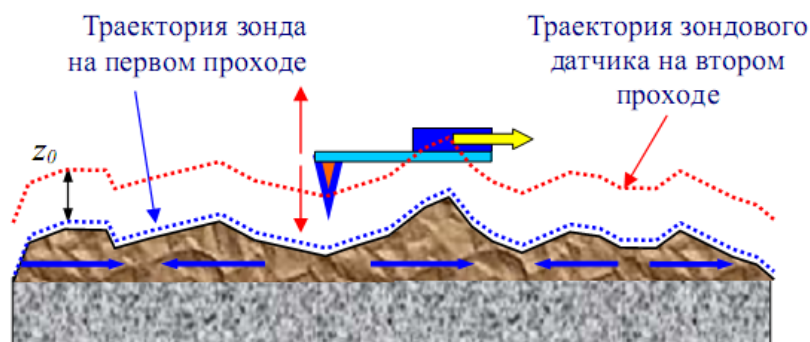


Рис.30 Траектории зонда

На втором проходе датчик перемещается над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца. Поскольку в этом случае локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке постоянно, изменения изгиба кантилевера в процессе сканирования связаны с неоднородностью магнитных сил, действующих на зонд со стороны образца. Таким образом, итоговый МСМ кадр представляет собой двумерную функцию $F(x,y)$, характеризующую распределение силы магнитного взаимодействия зонда с образцом.

1.37. Электронный микроскоп. Разрешение электронного микроскопа. Виды электронных микроскопов. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа. Его назначение.

Электронный микроскоп (ЭМ) — прибор, позволяющий получать изображение объектов с максимальным увеличением до 10^6 раз, благодаря использованию, в отличие от оптического микроскопа, вместо светового потока пучка электронов с энергиями 200 В ÷ 400 кэВ и более (например, просвечивающие электронные микроскопы высокого разрешения с ускоряющим напряжением 1 МВ).

Разрешающая способность электронного микроскопа в $1000 \div 10000$ раз превосходит разрешение светового микроскопа и для лучших современных приборов может быть меньше одного ангстрема.

Разрешение электронного микроскопа

Электрон, обладающий свойствами не только частицы, но и волны, может быть использован как опорное излучение в микроскопии.

Длина волны электронного излучения зависит от его энергии, а энергия электрона равна $E = Ve$, где V — разность потенциалов, проходимая электроном, e — заряд электрона.

Длины волн электронного излучения при прохождении разности потенциалов 200 000 В составляет порядка 0,1 нм.

Электронное излучение легко фокусировать электромагнитными линзами, так как электрон — заряженная частица. Электронное изображение может быть легко переведено в видимое.

Виды электронных микроскопов

1 Трансмиссионная (просвечивающая) микроскопия

Пучок электронов, пройдя через образец, фокусируется на экране или пластинке.

2 Сканирующая микроскопия

В основе лежит телевизионный принцип развертки тонкого пучка электронов по поверхности образца.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ, англ. Scanning Electron Microscope, SEM) — прибор класса электронных микроскопов, предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким (до 0,4 нанометра) пространственным разрешением, также информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв. Основан на принципе взаимодействия электронного пучка с исследуемым веществом.

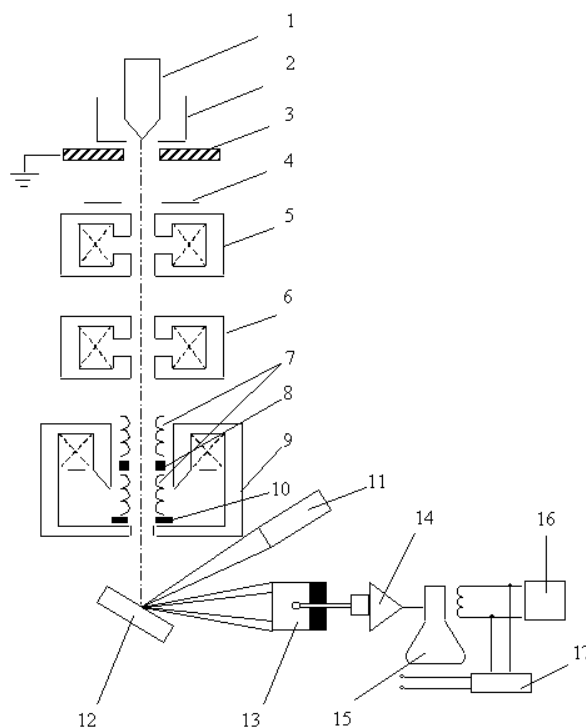


Рис.31. Схема ЭМ

Электронная пушка состоит из катода 1, цилиндра Венельта 2 и анода 3. Пучок электронов от пушки проходит через три электромагнитные линзы (5, 6, 9).

Фокусировка потока электронов осуществляется магнитным полем, имеющим осевую симметрию. Оно создаётся электромагнитной линзой, которая представляет собой соленоид.

1.38. Трибологические характеристики наноматериалов. Износ, от каких факторов он зависит. Количественное определение износа. Удельный объемный износ

Трибология (лат. tribos – трение) как наука занимается исследованием и описанием процессов контактного взаимодействия взаимоперемещающихся деформируемых тел. Областью трибологических исследований являются процессы трения, изнашивания и смазки.

Трибологические характеристики

1) Коэффициент трения; 2) Износ

Износ — изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия или инструмента вследствие разрушения (изнашивания) поверхностного слоя изделия при трении.

Износ деталей машин зависит от: условий трения, свойств материалов, конструкции.

Количественное определение износа

Износ – результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объема, массы и др. Способы оценки величины износа: микрометрирование; искусственных баз ; весовой метод ; химический и спектральный анализы ; - профилографирование.

Универсальной характеристикой, позволяющей сравнивать износостойкость исследуемых слоев не только между собой, но и с покрытиями, полученными другими методами и при различных условиях испытаний, является *удельный объемный износ ω* .

$$\omega = \frac{\Delta V}{N \cdot L}$$

где ΔV – объем изношенного материала;

N – нормальная нагрузка; L – длина пути скольжения

Объем изношенного материала

Объем материала, удаленного индентором с поверхности в процессе проведения испытания, определялся с учетом микрогеометрии профиля дорожки трения.

Рассматривая схему испытаний, когда один проход индентора длиной l многократно повторяется, и, аппроксимируя сечение дорожки трения треугольником с площадью S , высотой $h_{\max}$ и основанием b , объем изношенного материала может быть определен по формуле:

$$\Delta V = lS = \frac{1}{2} l h_{\max} b$$

где ΔV – объем изношенного материала;

l – длина пути индентора, в данном случае длина единичного прохода;

S – площадь сечения дорожки трения;

$h_{\max}$ – максимальная глубина дорожки трения; b – ширина дорожки трения.

1.39. Определение механических свойств НМ. Наноиндентирование.

Типичная кривая непрерывного индентирования

Для тонких покрытий и плёнок стандартный метод определения твёрдости не пригоден, т.к. размер отпечатка сравним с толщиной покрытия, и начинает сказываться влияние подложки (корректными измерениями твёрдости покрытий

принято считать такие измерения, при которых глубина погружения составляет не более 10-12% от его толщины).

Наноиндентирование («Силовой нанотестинг») - испытание материала методом индентирования (вдавливания в поверхность образца специального инструмента — индентора), применяемое к нанообъемам материала (тонкие пленки и покрытия, микро- и наноструктуры)

Наноиндентирование (синонимы: кинетическое или непрерывное индентирование) - вся совокупность методов, использующих прецизионное локальное силовое воздействие на материал и одновременную регистрацию деформационных откликов с нанометровым разрешением.

Индентирование производится вдавливанием в изучаемый образец индентора, обладающего известными механическими свойствами — формой, модулем упругости и т. д., с заданным усилием.

Далее либо исследуется форма и размер пятна контакта, либо строится кривая зависимости положения индентора от нагрузки. В первом случае требуется более простое оборудование, во втором удастся получить больше информации о материале.

При переходе к наномасштабам для изучения пятна контакта требуется атомный силовой микроскоп либо сканирующий электронный микроскоп, поэтому наноиндентирование практически всегда проводится со снятием кривой нагрузка/внедрение.

Количественные механические характеристики материалов, измеряемые наноиндентированием:

- модуль Юнга E ;
- твердость H ;
- вязкость разрушения K_{Ic} ;
- локальные контактные характеристики (контактную жесткость S).

Для определения модуля упругости методом индентирования требуется *построить диаграмму нагрузка/внедрение*. Наклон этой диаграммы при разгрузке, т. е. снижении действующей силы до нуля, определяется модулем упругости материала.

В качестве индентора при наноиндентировании используют, как правило, трехгранную алмазную пирамиду Берковича с углом заточки $65,3^\circ$

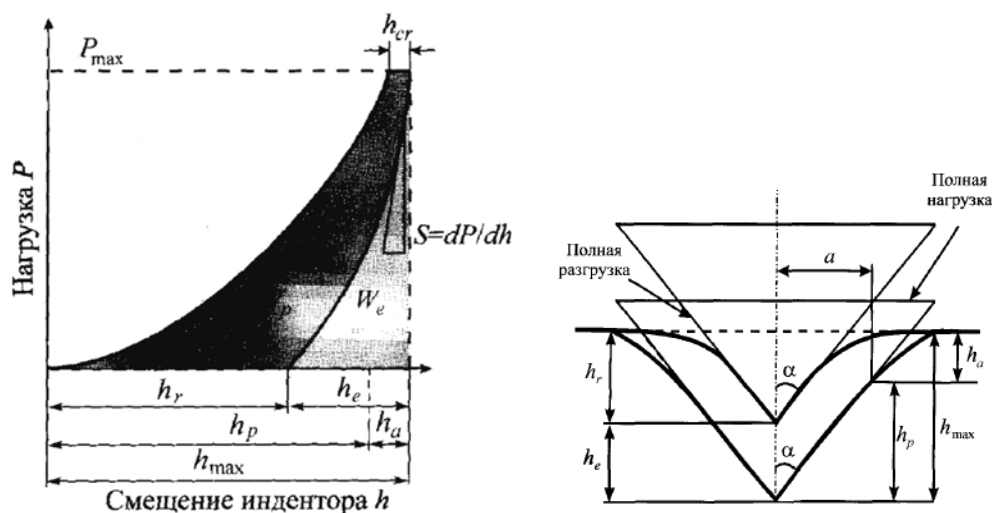


Рис.1.23 Типичная кривая непрерывного индентирования позволяет оценить механические свойства наноматериалов по следующим параметрам:

h_r - глубина остаточного отпечатка; h_e - упругое восстановление; h_p - глубина остаточного отпечатка при максимальной нагрузке на индентор; h_a - упругий прогиб поверхности образца; h_{max} - максимальная глубина отпечатка при максимальной нагрузке P_{max} ; h_{cr} - ползучесть при $P = const$; W_p - работа пластической деформации при формировании отпечатка; W_e - работа упругой деформации; $dP/dh = S$ - жесткость в контакте индентор - образец

1.40. Нанотехнологии. Метрология, стандартизация и сертификация

Метрология, стандартизация и сертификация в нанотехнологии — это система мер по обеспечению качества, безопасности и измерительной точности при работе с наноматериалами и наноустройствами. Метрология обеспечивает единство и точность измерений размеров, массы и других характеристик на наноуровне. Стандартизация разрабатывает правила и нормы для нанопроизводств, а сертификация подтверждает соответствие продукции этим стандартам.

Метрология

Задача: Обеспечение единства и точности измерений на наноуровне.

Значение: Необходимо для контроля размеров, структуры и свойств наноматериалов и наноструктур, поскольку даже небольшие отклонения могут радикально изменить свойства материала.

Стандартизация

Задача: Разработка и внедрение правил, норм и характеристик, которые должны быть достигнуты при производстве и использовании нанопродукции.

Значение: Создает основу для производства конкурентоспособной и

безопасной продукции, устанавливает требования к качеству, безопасности, маркировке и процедурам оценки соответствия.

Сертификация

Задача: Формальное подтверждение того, что нанопродукция соответствует установленным стандартам.

Типы: Может быть обязательной или добровольной, в зависимости от требований законодательства или рынка.

Значение: Дает потребителям уверенность в качестве и безопасности продукта, а производителям помогает подтвердить соответствие продукции требованиям, что облегчает выход на рынок.

Связь между элементами

Стандартизация формирует базу для сертификации, создавая правила и требования.

Сертификация подтверждает, что продукция соответствует стандартам, установленным в рамках стандартизации.

Метрология является инструментом, с помощью которого можно проверить соответствие продукции требованиям стандартов и обеспечить точность измерений в процессе производства.

ЛИТЕРАТУРА

ИНФОРМАЦИОННО - МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основная литература

1. Белоус А.И., Чижик С.А. МЭМС: конструкции, технологии, приложения. - Москва: Техносфера. -2024. - 620 с.
2. Э.Родунер. Размерные эффекты в наноматериалах. - Москва: Техносфера. -2010. - 352 с.
3. Наноструктурные покрытия. Под.ред. А.Кавалейро, Д.де Хоссона. Москва: Техносфера. -2011. - 752 с.
4. Н.Герасименко, Ю.Пархоменко. Кремний – материал наноэлектроники. Москва: Техносфера. -2007. - 352 с.
5. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам : сборник статей / П.П. Мальцев. — Москва
6. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. Учебное пособие / Б.М. Балоян [и др.].- М.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна» Филиал «Угreshа», 2007.— 125с
7. Сертификация микро- и наноматериалов и структур: учебное пособие / [В. В. Рубаник и др.]; Министерство образования Республики Беларусь, Учреждение образования "Витебский государственный технологический университет". – Витебск: ВГТУ, 2018. – 71 с.: ил., табл. ISBN 9789854815633: 5.00
8. Эггинс, Б. Химические и биологические сенсоры : пер. с / Б. Эггинс. — Москва : Техносфера, 2005. — 335 с. : ил. — (Мир электроники) . — Режим доступа : http://Libsrv24.library.bntu.bytextinetEggins_Bdoc1.pdf. — ISBN 5-948360-45-8 : 16013.00.
9. Петрова, Е. В. Синтез и свойства микро- и наноразмерных предшественников керамики и компонентов полимерных композиционных материалов /Е. В. Петрова, А. Ф. Дресвянников. - Казань : Изд. Казанского университета, 2015. - 227 с.
10. Дьячков, П. Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П. Н. Дьячков. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, - 2014. - 488 с.
11. Материалы электронных средств / Гатчин Ю.А [и др.], Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 112 с.

Дополнительная литература

1. Введение в нанотехнологию: методические указания / сост. : А.В. Рухов, Е.Ю. Филатова. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 16 с.
2. Каманина, Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы наноэлектроники. Свойства и области применения. Учебное пособие./ Н. В. Каманина - СПб: СПбГУИТМО, 2008 – 137с

3. Получение и исследования наноструктур: Лабораторный практикум по нанотехнологиям/ под ред. А.С. Сигова. - М.: ГОУ ВПО «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)», 2008.- 116 с.

II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Перечень тем практических занятий

1. Атомно-силовая, зондовая микроскопия.
2. Электронно-зондовая микроскопия, наноиндентирование.
3. Кремний монокристаллический, поликристаллический, пористый.
4. Функционально активные диэлектрические материалы и оптические материалы.
5. Функционально активные магнитные материалы.
6. Технологии получения тонких пленок, порошков.
7. Мономолекулярные пленки полимеров, полученные технологией Ленгмюра-Блоджетт
8. Нанотрубки, графен, фуллерены

Перечень тем лабораторных занятий

1. Изучение принципа работы и устройства атомно-силового микроскопа модели НТ-206
2. Изучение программ визуализации изображения «Surface View» и «Surface Explorer»
3. Изучение работы управляющей программы «Surface Scan» АСМ модели НТ-206
4. Изучение микро- и нанощероховатости поверхности твердых тел.
5. Изучение устройства ванны Ленгмюра-Блоджетт
6. Получение мономолекулярных слоев поливинилпиридина и полиметилметакрилата на кремнии с использованием технологии Ленгмюра-Блоджетт

III. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Перечень вопросов, выносимых на зачет

1. Научно-технические революции и нанотехнология. Два противоположных технологических подхода
2. Определение нанотехнологий. Какие объекты относят к наноразмерным? На какие группы по размерности делят наноматериалы? Приведите примеры
3. Методы получения углеродных нанотрубок
4. Получение нанопорошка методом термического испарения и конденсации материала из паровой фазы
5. Получение нанопорошков механическим размельчением
6. Морфологические единицы в материале. Понятие агломерации
7. Конструкционные, функциональные и умные материалы
8. Зондовая микроскопия. Роль сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) в нанотехнологиях. Методы зондовой микроскопии: сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), магнитно-силовая микроскопия (МСМ)
9. Общие принципы всех методик СЗМ. Конструкция современного пьезосканера. Пьезокерамика.
10. Принцип работы туннельного сканирующего микроскопа. Способы получения зонда в туннельной микроскопии
11. Силы, действующие между зондом и образцом в СЗМ
12. Атомно-силовая микроскопия. Принцип работы АСМ
13. Электросиловая зондовая микроскопия
14. Магнитно-силовая зондовая микроскопия
15. Электронный микроскоп. Разрешение электронного микроскопа. Виды электронных микроскопов. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа. Его назначение.
16. Получение наноматериалов с использованием интенсивной пластической деформации
17. Получение нанопорошка методом распыления жидкого расплава
18. Химические методы синтеза наноматериалов. Золь-гель метод, гидротермальный синтез, синтез в микроэмульсиях
19. Фотонные кристаллы. Классификация фотонных кристаллов по характеру изменения коэффициентов преломления, в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых зон. Методы изготовления фотонных кристаллов
20. Трибологические характеристики. Износ, от каких факторов он зависит. Количественное определение износа. Удельный объемный износ
21. Определение механических свойств НМ. Наноиндентирование. Типичная кривая непрерывного индентирования
22. Кремний монокристаллический. Виды кристаллического кремния в зависимости от предназначения
23. Этапы получения Si. Метод Чохральского

24. Пористый Si. Степень пористости Si. Определение степени пористости кремния. Классификация по размеру пор.
25. Получение пористого Si. Структура пористого слоя кремния. От чего она зависит? Механизм порообразования в кремнии.
26. Физические и химические свойства Si
27. Свойства пористого кремния. Применение пористого кремния
28. Магнитные материалы. Ферромагнитная жидкость
29. Нанотрубки углерода, строение, хиральность, способы получения
30. Основные свойства углеродных нанотрубок (УНТ). Механические, электронные и эмиссионные свойства УНТ.
31. Применение углеродных нанотрубок. Композиционные материалы, компоненты наноэлектроники, адгезивная лента, текстильные изделия.
32. Фуллерены. Строение. Правило изолированных пентагонов. Эндо- и экзоэдральные фуллерены. Получение фуллеренов. Применение фуллеренов
33. Графен. Строение. Методы получения. Перспективные устройства на основе графена
34. Самосборка наночастиц. Необходимые условия самосборки. Силы, обеспечивающие самосборку. Перспективные применения самосборки
35. Электрофорез. Применение электрофореза. Ката- и анафорез. Электронная бумага.
36. Мицеллы. Типы мицеллярных структур. Коллоидные реакторы.
37. Пленки Ленгмюра-Блоджетт. Амфифильные молекулы. Получение многослойных пленок ЛБ
38. Методы разделения наночастиц по размеру. Метод седиментации. Использование молекулярных сит.
39. Оптический пинцет. Назначение, строение, принцип действия.
40. Виды активных диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Типы поляризации.
41. Механизм образования полярных фаз в сегнетоэлектрике на примере BaTiO_3
42. Получение фуллеренов. Применение фуллеренов

IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Белорусского национального
технического университета

 С.В.Харитончик

26.06.2025

Регистрационный № УД- ТСР 06-15 /уч.

МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

**Учебная программа учреждения образования
по учебной дисциплине для специальности**

6-05-0716-09 «Технологии микросенсорных систем»

2025 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 6-05-0716-09-2024 и учебного плана по специальности 6-05-0716-09 «Технологии микросенсорных систем» (рег. №ПСФ 06д-1/уч утв. 15.03.2024).

СОСТАВИТЕЛИ:

В.А. Лапицкая, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент
Е.Н. Щербакова, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Д.А. Котов, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кандидат технических наук, доцент;
П.С. Богдан, доцент кафедры «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета
(протокол № 9 от 27.05.2025 г.)

Заведующий кафедрой



С.А.Чижик

Методической комиссией приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета
(протокол № 10 от 18.06.2025 г.)

Председатель методической комиссии



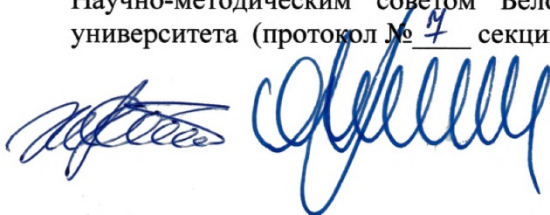
С.Г.Монич

Научной библиотекой БНТУ



Т.И.Бирюкова

Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета (протокол № 4 секции №1 от 26.06 2025 г.)



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа по учебной дисциплине «Материалы микро- и наносистемной техники» разработана для специальностей 6-05-0716-08 «Микро- и наносистемная техника» и 6-05-0716-09 «Технологии микросенсорных систем».

Целью дисциплины является формирование знаний о механических, теплофизических, электрофизических, оптических и химических свойствах материалов микро- и наносистемной техники (МНСТ), используемых при создании сверхминиатюрных приборов, механизмов и машин с учетом особенностей их функционирования и условий эксплуатации.

Основными задачами преподавания учебной дисциплины являются: ознакомление с классификацией материалов МНСТ, ознакомление со строением материалов МНСТ, изучение физических законов, на основе которых функционируют материалы МНСТ, ознакомление с механическими, теплофизическими, электрофизическими, оптическими и химическими свойствами материалов МНСТ, определение области применения материалов МНСТ.

Дисциплина «Материалы микро- и наносистемной техники» является частью специальной подготовки инженера.

Дисциплина основывается на фундаментальной общенаучной подготовке и направлена на формирование базы углубленной подготовки по специализации в области нано- и микросистемной техники. Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как: «Физика», «Химия», «Математика», «Материаловедение и технология материалов». Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих специальных дисциплин и дисциплин специализаций «Физика нано- и микросистем», «Физика и химия наноструктур», «Физико-химические методы анализа», «Технологии нано- и микросистемной техники», «Микро- и наномеханика», «Компоненты нано- и микросистемной техники», «Техника наноконтроля».

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- классификацию материалов МНСТ;
- основные физико-химические свойства материалов, используемых в МНСТ;
- физические эффекты и явления, лежащие в основе применения материалов в микросистемной технике.

уметь:

- осуществлять выбор материалов для разработки компонентов МНСТ с учетом конструкции, технологии их создания и условий эксплуатации;
- осуществлять сравнение характеристик материалов МНСТ и определять область их рационального применения.

иметь навык:

- анализа физико-химических свойств материалов, используемых в МНСТ;
- использования различных материалов для создания компонентов МНСТ.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующей компетенции:

Использовать знания о механических, теплофизических, электрофизических, оптических и химических свойствах материалов микро- и наносистемной техники, применять эти материалы с учетом особенностей функционирования и условий эксплуатации микро- и наносистемной техники.

Темы, зачтенные в соответствии с учебным планом УО с уровня среднего специального образования: функциональные материалы, методы получения наноматериалов.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной (дневной) формы получения высшего образования всего 160 ч., из них аудиторных – 82 часов;
- для заочной формы получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием (специальность 6-05-0716-08 «Микро- и наносистемная техника»), всего 160 ч., из них аудиторных – 16 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже. Таблица 1.

Очная (дневная) форма получения высшего образования						
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации	Форма промежуточной аттестации
2	3	50	16	16	Выполнение практической работы Защита лабораторной работы	зачет

Таблица 2.

Заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием (специальность 6-05-0716-08 «Микро и наносистемная техника»)						
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации	Форма промежуточной аттестации
2	3	6	6	4	Выполнение практической работы Защита лабораторной работы	зачет

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

РАЗДЕЛ I. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ МНСТ

Тема 1.1. Основные виды микросистем и материалов для них

Введение. Виды микросистем, классификация материалов для микросистем. Конструкционные, функциональные и умные материалы.

Тема 1.2 Введение в нанотехнологии и наноматериалы

Научно-технические революции и нанотехнология. Противоположные технологические подходы «сверху вниз и снизу вверх». Определение нанотехнологий. Основной критерий наноматериала. Физические причины особых свойств наноматериалов. Группы наноматериалов по размерности. Морфологические (структурные) единицы в материале. Примеры и определения. Понятие агломерации.

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ МНСТ

Тема 2.1. Зондовая микроскопия

Зондовая микроскопия. Роль СЗМ в нанотехнологиях. Атомно-силовая микроскопия. Устройство атомно-силового микроскопа. Общие принципы всех методик СЗМ. Конструкция современного пьезосканера. Пьезокерамика. Режимы работы атомно-силового микроскопа. Роль зонда в разрешении прибора. Туннельная микроскопия. Способы получения зонда в туннельной микроскопии. Электросиловая микроскопия. Магнитносиловая микроскопия. Силы, действующие между зондом и поверхностью. Потенциал Леннарда-Джонса. Артефакты в АСМ. Влияние зонда, гистерезис пьезотрубки, краевые эффекты. Силовая спектроскопия в АСМ. Методы нанолитографии с использованием СЗМ и АСМ. Сканирующая ближнепольная микроскопия.

Тема 2.2. Электронная микроскопия

Виды микроскопов. Разрешающая способность микроскопа. Электронный микроскоп. Разрешение электронного микроскопа. Виды электронных микроскопов. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа. Его назначение. Виды взаимодействия электронов с веществом.

Тема 2.3. Наноиндентирование

Наноиндентирование как способ оценки механических свойств материалов МНСТ. Типичная кривая непрерывного индентирования «нагрузка – глубина вдавливания». Характеристики, определяемые по данной кривой. Соответствие областей кривой наноиндентирования и параметров отпечатка. Определение модуля упругости и микротвердости наноиндентированием.

РАЗДЕЛ III. КРЕМНИЙ КАК ОСНОВНОЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ МНСТ

Тема 3.1. Монокристаллический кремний

Физические и химические свойства кремния. Кремний монокристаллический. Стадии производства монокристаллического кремния. Метод Чохральского. Влияние затравочного кристалла на форму слитка. Окончательная обработка слитка кремния. Маркировка пластин кремния. Анизотропное травление кремния. Совместимые с кремнием материалы.

Тема 3.2. Различные виды кремния

Виды кристаллического кремния в зависимости от предназначения. Эпитаксиальные пленки кремния. Механизмы наращивания. Кремний поликристаллический. Кремний напряженный. Получение полых частиц кремния, их типы и применение. Получение упорядоченных кремниевых нанокolonн.

Тема 3.3. Пористый кремний

Пористый Si. Получение пористого Si. Механизм порообразования в кремнии. Классификация по размеру пор. Структура пористого кремния. Факторы, определяющие пористость. Классификация по степени пористости Si. Способ определения степени пористости кремния. Свойства пористого кремния. Применение пористого кремния.

РАЗДЕЛ IV. РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ В МИКРОСИСТЕМАХ И НАНОМАТЕРИАЛАХ

Тема 4.1. Процессы трения и адгезии на поверхности твердых тел

Поверхность. Трение. Трибологические характеристики. Адгезия. Адгезионное и абразивное трение. Износ, факторы, влияющие на износ. Количественное определение износа АСМ. Удельный объемный износ. Шероховатость поверхности. Определение шероховатости с использованием АСМ. Определение удельной работы адгезии с использованием АСМ.

РАЗДЕЛ V. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тема 5.1. Проводниковые материалы

Общие сведения о проводниках. Сравнение проводников.

Тема 5.2. Активные диэлектрики

Активные диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Сегнетоэлектрики. Механизм образования полярных фаз в сегнетоэлектрике на примере BaTiO_3 , Пьезоэлектрики, пирозэлектрики, электреты. Жидкие кристаллы. Смектическая, нематическая, холестерическая фазы.

Тема 5.3. Оптические материалы

Двойное лучепреломление, поляризация, люминесценция, квантовый выход. Стекла. Полиметилметакрилат. Оптические волокна. Фотохромные материалы. Просветляющие покрытия.

Тема 5.4. Фотонные кристаллы

Классификация фотонных кристаллов по характеру изменения коэффициентов преломления, в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых зон. Методы изготовления фотонных кристаллов. Применение фотонных кристаллов.

Тема 5.5. Магнитные материалы

Магнитный гистерезис, память. Ферромагнетики: железо, никель, редкоземельные металлы, их сплавы и соединения, керамические ферриты, феррит-гранаты. Явление магнитострикции. Материалы для магнитострикционных преобразователей. Ферромагнитная жидкость.

Тема 5.6. Материалы с «памятью формы»

Сплавы с памятью формы. Мартенсит-аустенитные превращения. Никель-титановые сплавы. Полимеры с памятью формы.

РАЗДЕЛ VI. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Тема 6.1. Методы получения порошков

Получение нанопорошка методом термического испарения и конденсации материала из паровой фазы. Получение нанопорошков механическим размельчением. Получение нанопорошка методом распыления жидкого расплава. Золь-гель метод. Факторы, влияющие на размер наночастиц в золь-гель методе. Методы разделения наночастиц по размеру. Метод седиментации. Формула Стокса. Технология получения изделий из нанопорошков .

Тема 6.2. Методы получения тонких пленок

PVD и CVD методы. Эпитаксиальный синтез. Спин-коутинг. Самосборка наночастиц. Необходимые условия самосборки. Силы, обеспечивающие самосборку. Перспективные применения самосборки.

Тема 6.3. Биоматериалы

Использование биологических структур в качестве наноматериалов МНСТ. ДНК, ферменты, белки.

РАЗДЕЛ VII. НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МНСТ

Тема 7.1. Пленки Ленгмюра-Блоджетт

Амфифильные молекулы. Поверхностно-активные вещества. Изотерма сжатия. Назначение и устройство ванны Ленгмюра-Блоджетт. Пластика Вильгельми, ее принцип действия. Получение многослойных пленок ЛБ. Типы пленок. Управление ориентацией пленки на подложке.

Тема 7.2. Мицеллы

Мицеллы. Типы мицеллярных систем. Коллоидные реакторы. Синтез в микроимпульсах. Стадии образования наночастиц в микроэмульсиях.

Тема 7.3. Аллотропные формы углерода

Нанотрубки углерода, строение, хиральность, типы УНТ. Основные свойства углеродных нанотрубок. Методы получения УНТ Применение углеродных нанотрубок. Композиционные материалы, компоненты наноэлектроники, адгезивная лента, текстильные изделия.

Фуллерены. Строение. Правило изолированных пентагонов. Эндо- и экзоэдральные фуллерены. Получение фуллеренов. Применение фуллеренов.

Графен. Строение. Методы получения. Перспективные устройства на основе графена.

Тема 7.4. Перспективные материалы МНСТ

Эволюция материаловедческого базиса, интеллектуальные материалы и конструкции.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Очная (дневная) форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы, занятия	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
	2	3	4	5	6	7	8	9
	3 семестр							
1	Классификация материалов МНСТ							
1.1	Основные виды микросистем и материалов для них	2						
1.2	Введение в нанотехнологии и наноматериалы	2						
2	Методы исследования материалов МНСТ							
2.1	Зондовая микроскопия	6						
	Практическое занятие №1. Атомно-силовая, зондовая микроскопия.		2					Выполнение практической работы
	Лабораторная работа №1. Изучение принципа работы и устройства атомно-силового микроскопа модели НТ-206				4			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа №2. Изучение программ визуализации изображения «Surface View» и «Surface Explorer»				2			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа №3. Изучение работы управляющей программы «Surface Scan» ACM модели НТ-206				2			Защита лабораторной работы
2.2	Электронная микроскопия	2						
2.3	Наноиндентирование	2						

	Практическое занятие №2. Электронно-зондовая микроскопия, наноиндентирование		2					Выполнение практической работы
3	Кремний как основной конструкционный материал МНСТ							
3.1	Монокристаллический кремний	4						
	Практическое занятие №3. Кремний монокристаллический, поликристаллический, пористый		2					Выполнение практической работы
3.2	Различные виды кремния	2						
3.3	Пористый кремний	2						
4	Роль поверхности в микросистемах и наноматериалах	2						
4.1	Процессы трения и адгезии на поверхности твердых тел							
	Лабораторная работа №4. Изучение микро- и наношероховатости поверхности твердых тел				2			Защита лабораторной работы
5	Функциональные материалы							
5.1	Проводниковые материалы	2						
5.2	Активные диэлектрики	2						
5.3	Оптические материалы	2						
	Практическое занятие №4. Функционально активные диэлектрические материалы и оптические материалы		2					Выполнение практической работы
5.4	Фотонные кристаллы	2						
5.5	Магнитные материалы	2						
	Практическое занятие №5. Функционально активные магнитные материалы		2					Выполнение практической работы
5.6	Материалы с «памятью формы»	2						
6	Методы получения наноматериалов							
6.1	Методы получения порошков	2						
6.2	Методы получения тонких пленок	2						
	Практическое занятие №6. Технологии получения тонких пленок, порошков		2					Выполнение практической работы

7	Наноматериалы для МНСТ						
7.1	Пленки Ленгмюра-Блоджетт	2					
	Практическое занятие №7. Мономолекулярные пленки полимеров, полученные технологией Ленгмюра-Блоджетт		2				Выполнение практической работы
	Лабораторная работа №5. Изучение устройства ванны Ленгмюра-Блоджетт				2		Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа №6. Получение мономолекулярных слоев поливинилпиридина и полиметилметакрилата на кремнии с использованием технологии Ленгмюра-Блоджетт				4		Защита лабораторной работы
7.2	Мицеллы	2					
7.3	Аллотропные формы углерода	2					
	Практическое занятие №8. Нанотрубки, графен, фуллерены		2				Выполнение практической работы
7.4	Биоматериалы	2					
7.5	Перспективные материалы МНСТ	2					
	Итого за семестр	50	16		16		Зачет
	Всего аудиторных часов		82				

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием

(специальность 6-05-0716-08 «Микро- и наносистемная техника»)

Номер раздела, темы	Название раздела, темы, занятия	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
	2	3	4	5	6	7	8	9
	3 семестр							
1	Классификация материалов МНСТ							
1.1	Основные виды микросистем и материалов для них	2						
1.2	Введение в нанотехнологии и наноматериалы*							
2	Методы исследования материалов МНСТ							
2.1	Зондовая микроскопия							
	Практическое занятие №1. Атомно-силовая, зондовая микроскопия.		2					Выполнение практической работы

	Лабораторная работа №1. Изучение принципа работы и устройства атомно-силового микроскопа модели НТ-206				2			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа №2. Изучение программ визуализации изображения «Surface View» и «Surface Explorer»				2			Защита лабораторной работы
	Лабораторная работа №3. Изучение работы управляющей программы «Surface Scan» АСМ модели НТ-206*							
2.2	Электронная микроскопия*							
2.3	Наноиндентирование*							
	Практическое занятие №2. Электронно-зондовая микроскопия, наноиндентирование*							
3	Кремний как основной конструкционный материал МНСТ							
3.1	Монокристаллический кремний	2						
	Практическое занятие №3. Кремний монокристаллический, поликристаллический, пористый		2					Выполнение практической работы
3.2	Различные виды кремния*							
3.3	Пористый кремний*							
4	Роль поверхности в микросистемах и наноматериалах							
4.1	Процессы трения и адгезии на поверхности твердых тел							

	Лабораторная работа №4. Изучение микро- и наношероховатости поверхности твердых тел				2			Защита лабораторной работы
5	Функциональные материалы*							
5.1	Проводниковые материалы							
5.2	Активные диэлектрики							
5.3	Оптические материалы							
	Практическое занятие №4. Функционально активные диэлектрические материалы и оптические материалы							
5.4	Фотонные кристаллы							
5.5	Магнитные материалы							
	Практическое занятие №5. Функционально активные магнитные материалы							
5.6	Материалы с «памятью формы»							
6	Методы получения наноматериалов *							
6.1	Методы получения порошков							
6.2	Методы получения тонких пленок							
	Практическое занятие №6. Технологии получения тонких пленок, порошков							
7	Наноматериалы для МНСТ							

7.1	Пленки Ленгмюра-Блоджетт	2						
	Практическое занятие №7. Мономолекулярные пленки полимеров, полученные технологией Ленгмюра-Блоджетт							
	Лабораторная работа №5. Изучение устройства ванны Ленгмюра-Блоджетт							
	Лабораторная работа №6. Получение мономолекулярных слоев поливинилпиридина и полиметилметакрилата на кремнии с использованием технологии Ленгмюра-Блоджетт							
7.2	Мицеллы							
7.3	Аллотропные формы углерода							
	Практическое занятие №8. Нанотрубки, графен, фуллерены							
7.4	Биоматериалы							
7.5	Перспективные материалы МНСТ							
	Итого за семестр	6	4		6			Зачет
	Всего аудиторных часов		16					

* - тема пройдена на уровне среднего специального образования

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Белоус А.И., Чижик С.А. МЭМС: конструкции, технологии, приложения. - Москва: Техносфера. -2024. - 620 с.
2. Э.Родунер. Размерные эффекты в наноматериалах. - Москва: Техносфера. -2010. - 352 с.
3. Наноструктурные покрытия. Под.ред. А.Кавалейро, Д.де Хоссона. Москва: Техносфера. -2011. - 752 с.
4. Н.Герасименко, Ю.Пархоменко. Кремний – материал нанoeлектроники. Москва: Техносфера. -2007. - 352 с.
5. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам : сборник статей / П.П. Мальцев. — Москва

Дополнительная литература

6. Сертификация микро- и наноматериалов и структур: учебное пособие / [В. В. Рубаник и др.]; Министерство образования Республики Беларусь, Учреждение образования "Витебский государственный технологический университет". – Витебск: ВГТУ, 2018. – 71 с.: ил., табл. ISBN 9789854815633: 5.00
- 7.Эггинс, Б. Химические и биологические сенсоры : пер. с / Б. Эггинс. — Москва : Техносфера, 2005. — 335 с. : ил. — (Мир электроники) . — Режим доступа : http://Libsrv24.library.bntu.bytextinetEggins_Bdoc1.pdf. — ISBN 5-948360-45-8 : 16013.00.
- 8.Петрова, Е. В. Синтез и свойства микро- и наноразмерных предшественников керамики и компонентов полимерных композиционных материалов /Е. В. Петрова, А. Ф. Дресвянников. - Казань : Изд. Казанского университета, 2015. - 227 с.
- 9.Дьячков, П. Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П. Н. Дьячков. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, - 2014. - 488 с.
10. Материалы электронных средств / Гатчин Ю.А [и др.], Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 112 с.
11. Введение в нанотехнологию: методические указания / сост. : А.В. Рухов, Е.Ю. Филатова. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 16 с.
12. Каманина, Н. В. Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы нанoeлектроники. Свойства и области применения. Учебное пособие./ Н. В. Каманина - СПб: СПбГУИТМО, 2008 – 137с.
13. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. Учебное пособие / Б.М. Балоян [и др.].- М.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна» Филиал «Угреша», 2007.– 125с

14. Получение и исследования наноструктур: Лабораторный практикум по нанотехнологиям/ под ред. А.С. Сигова. - М.: ГОУ ВПО «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)», 2008.- 116 с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- выполнение практических работ
- защита лабораторных работ;
- проведение тестов по отдельным блокам;
- выступление студента на конференции;
- сдача зачета по дисциплине.

Критерии оценки результатов учебной деятельности обучающихся при проведении текущей аттестации в форме практической работы

Отметка	Критерии
зачтено	Выполнение и оформление без ошибок практической работы, или с несущественными ошибками, которые исправляются с помощью преподавателя
не зачтено	Воспроизведение по образцу (не в полном объеме и/или с помощью преподавателя) приемов при выполнении практической работы. Отсутствие выполненной практической работы. Практическая работа выполнена не самостоятельно

Критерии оценки результатов учебной деятельности обучающихся при проведении промежуточной аттестации в форме зачета по учебной дисциплине

№ п/п	Отметка	Критерии
1	10 (десять) баллов, зачтено	систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы БНТУ, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы; точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы и обобщения;

		безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации; полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, по изучаемой учебной дисциплине, модулю; умение свободно ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой учебной дисциплине и давать им аналитическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин; творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.
2	9 (девять) баллов, зачтено	систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы; владение инструментарием учебной дисциплины, модуля, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой УВО по учебной дисциплине, модулю; умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им аналитическую оценку; систематическая, активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.
3	8 (восемь) баллов, зачтено	систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю в объеме учебной программы УВО по учебной дисциплине, модулю; использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы и обобщения; владение инструментарием учебной дисциплины, модуля (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине, модулю и давать им аналитическую оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4	7 (семь) баллов, зачтено	систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы и обобщения; владение инструментарием учебной дисциплины, модуля, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине, модулю и давать им аналитическую оценку; самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.
5	6 (шесть) баллов, зачтено	достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; использование необходимой научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы; владение инструментарием учебной дисциплины, модуля, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине, модулю и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.
6	5 (пять) баллов, зачтено	достаточные знания в объеме учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; использование научной терминологии, грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы; владение инструментарием учебной дисциплины, модуля, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой учебной дисциплине, модулю и давать им сравнительную оценку; самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, фрагментарное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.
7	4 (четыре) балла, зачтено	достаточный объем знаний в объеме учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю;

		усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; использование научной терминологии, логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок; владение инструментарием учебной дисциплины, модуля, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач; умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи; умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине, модулю и давать им оценку; работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.
8	3 (три) балла, незачтено	недостаточно полный объем знаний в объеме учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными, логическими ошибками; слабое владение инструментарием учебной дисциплины, модуля некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач; неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины; пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий
9	2 (два) балла, незачтено	фрагментарные знания в объеме учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю; знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой БНТУ по учебной дисциплине, модулю; неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых, логических ошибок; пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий
10	1 (один) балл, незачтено	отсутствие знаний и компетенций в рамках учебной программы БНТУ по учебной дисциплине, модулю, отказ от ответа, неявка на аттестацию без уважительной причины

Тематика рефератов

1. Использование полимерных пленок в МЭМС
2. Композиционные плёнки Ленгмюра-Блоджетт
3. Фотонные кристаллы различной архитектуры как материал компьютеров будущего
4. Магнитные терапевтические наночастицы
5. «Умные» материалы в микроэлектронике
6. Использование нанотрубок, наночастиц и биологических структур для модификации зонда АСМ
7. Получение и применение тонких пленок с пьезоэлектрическими свойствами
8. Трибоэлектрические пленки

9. Электретные пленки
10. Метаматериалы
11. Ауксетики
12. Проводящие полимеры
13. Применение оксида алюминия в микроэлектронике и МЭМС
14. Материалы для постепенного контролируемого высвобождения лекарств
15. Полимерные пьезоэлектрики
16. Материалы для 3 D печати имплантов
17. Гидрогели для 3 D печати
18. Нанолитография
19. Материалы для постепенного контролируемого высвобождения лекарств
20. Аллотропные формы углерода
21. Применение GaN в СВЧ-устройствах
22. Пиролитическое осаждение SiO₂
23. Материалы для полимерной электроники
24. Материал из пьезоэлектрических нитей для наногенераторов
25. Материал солнечных батарей на основе перовскитных нанонитей
26. Методы PVD-осаждения наноструктурированных пленок
27. Методы CVD-осаждения наноструктурированных пленок
28. Методы исследования структурно-фазового состояния нанокластеров
29. Ионно- и лазерно-плазменные методы формирования микро- и наноструктур
30. Радиационно-стойкие материалы на основе наноструктур
31. Оптические свойства наносистем на основе кластеров
32. Магнитные свойства наноструктурированных материалов
33. Наноразмерные устройства на основе углеродных нанотрубок
34. Применение микро- и наносистем в ядерной энергетике и космической технике
35. Перспективные материалы микро- и нанoeлектроники
36. Перспективные материалы оптоэлектроники.
37. Методы синтеза и очистки углеродных нанотрубок
38. Обзор методов получения силицидов металлов
39. Методы получения и оптические свойства дисперсных пленок
40. Лазерно-модифицированные оптически прозрачные материалы
41. Виды литографии. Создание p-n переходов
42. Применение оксидов переходных металлов в микроэлектронике и оптическом приборостроении

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- решение индивидуальных задач;

- подготовка рефератов по индивидуальным темам;
- подготовка сообщений, тематических докладов, презентаций по заданным темам;
- проработка тем (вопросов), вынесенных на самостоятельное изучение.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола) ¹
Согласование не требуется	Кафедра «Микро- и нано-техники»		Содержание данной учебной программы не требует согласования с другими учебными дисциплинами специальности. Протокол № 3 от 25.11.2024 г.)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УО

_____/_____/_____ учебный год

№	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол №_____ от _____ 20__ г.)

Заведующий кафедрой

(подпись)

(И.О. Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета

(ученая степень, ученое звание)

(подпись)

(И.О.Фамилия)

Оформление записи о переутверждении
учебной программы без изменений

Учебная программа рассмотрена и одобрена без изменений на ____/_____
учебный _____ год _____ кафедрой _____
(протокол №_____ от _____ 20__ г.)

Заведующий кафедрой

(ученая степень, ученое звание)

(подпись)

(И.О. Фамилия)