

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения.

Литература

- Ч. Пул, Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. – М.: Технсфера 2005. – 336 с.
- Х.Риссел, И.Руге. Ионная имплантация. - М.: Наука, 1983. - 360 с.
- И.А.Аброян, А.Н.Андронов, А.И.Титов. Физические основы электронной и ионной технологии. - М.: Высшая школа, 1984.-320с.
- Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. – 490 с.
- А.И.Гусев. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.- 416 с.

Интерес к нанотехнологиям

- стремление к миниатюризации изделий,
- уникальными свойствами материалов в наноструктурном состоянии,
- необходимостью разработки и внедрения новых материалов с качественно и количественно новыми свойствами,
- развитие новых технологических приемов и методов, базирующиеся на принципах самосборки и самоорганизации,
- практическое внедрение современных приборов исследования и контроля наноматериалов (зондовая микроскопия, рентгеновские методы, нанотвердость)
- развитие и внедрение новых технологий (ионно-плазменные технологии обработки поверхности и создания тонких слоев и пленок, LIGA-технологии, представляющие собой последовательность процессов литографии, гальваники и формовки, технологий получения и формования нанопорошков и т.п.).

Терминология

Терминологические подходы к понятию наноматериалов

Геометрические размеры

$D \sim 1 \dots 100 \text{ нм}$

Доля границ раздела $\Delta V_{\text{гр}} \geq 50\%$

$\Delta V_{\text{гр}} \sim 3s/D$ при ширине приграничной области $s \sim 1 \text{ нм}$ $D = 6 \text{ нм}$

Критический размер для физического эффекта $D_{\text{кр}} > D$

Возникновение нового качества при уменьшении V вещества или его компоненты по 1, 2 или 3 координатам до нанодиапазона

Комплексный подход

содержание в материалах структурных элементов с $D < 100 \text{ нм}$ хотя бы в одном измерении и обладающие качественно новыми характеристиками

Геометрический подход. Согласно такому подходу материалы с характерным размером микроструктуры от 1 до 100 нм называют наноструктурными (или иначе нанофазными, нанокристаллическими, супрамолекулярными). Выбор диапазона размеров определяется существованием ряда размерных эффектов и совпадением размеров кристаллитов с характерными размерами для различных физических явлений. Нижний предел считается связанным с нижним пределом симметрии нанокристаллического материала.

Доля границ зерен с огромной ролью многочисленных поверхностей раздела в наноматериалах в формирование их свойств. В соответствии с ним размер зерен (D) в наноматериалах определялся в интервале нескольких нанометров, т.е. в интервале, когда объемная доля поверхностей раздела в общем объеме материала составляет примерно $\Delta V \approx 50\%$ и более. Эта доля приблизительно оценивается из соотношения $\Delta V \sim 3s/D$, где s — ширина приграничной области. При разумном значении s около 1 нм 50%-я доля поверхностей раздела достигается при $D = 6$ нм.

Критический размер для физического эффекта размер одного из структурных элементов должен быть равен или быть меньше, размера, характерного для определенного физического явления (для прочностных свойств — размер бездефектного кристалла, для магнитных свойств — размер однодоменного кристалла, для электропроводности — длина свободного пробега электронов).

Возникновение нового качества при уменьшении объема какого-либо вещества по одной, двум или трем координатам до размеров нанометрового масштаба возникает новое качество, то эти образования следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними; к нанотехнологиям.

• **нанотехнология** - совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба;

• **наноматериалы** - материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками;

• **наносистемная техника** - полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям

Основы классификации наноматериалов



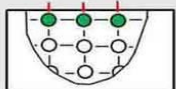
- *Первая категория* включает материалы в виде твердых тел, размеры которых в одном, двух или трех пространственных координатах не превышают 100 нм. нанопорошки, нанопроволоки и нановолокна, очень тонкие пленки (толщиной менее 100 нм), нанотрубки и т.п... Такие материалы могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки). В связи с этим первую категорию можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде наноизделий
- *Вторая категория* включает в себя материалы в виде малоразмерных изделий с характеризующим размером в примерном диапазоне 1 мкм...1 мм. Обычно это проволоки, ленты, фольги. Такие материалы содержат уже значительное число структурных элементов и их можно классифицировать как наноматериалов с большим числом структурных элементов (кристаллитов)
- *Третья категория* представляет собой массивные (объемные) наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких мм). Такие материалы состоят из очень большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и фактически являются поликристаллическими материалами с размером зерна 1...100 нм.
- *К четвертой категории* относятся композиционные материалы, содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов. При этом в качестве компонентов могут выступать наноматериалы, отнесенные к первой категории (и второй категории)

Физические причины специфики наноматериалов

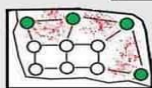
Большая доля приповерхностных атомов



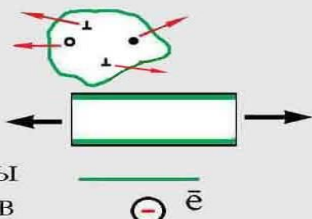
ненасыщенность атомных связей у поверхности



искажения решетки у поверхности



эффективный сток для кристаллических дефектов



поверхностные эффекты механических свойств

тонкие физические эффекты взаимодействия электронов со свободной поверхностью

Увеличение объемной доли границ раздела



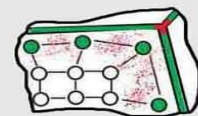
неравновесность границ зерен



упругие дальнодействующие напряжения



искажения кристаллической решетки у границ (вплоть до потери дальнего порядка)



повышение микротвердости



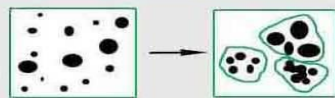
Облегченность миграции атомов



Более выраженные силы притяжения между атомами



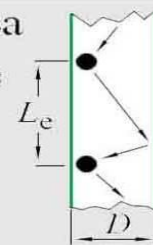
Склонность к самоорганизации кластерных структур



Зависимость процессов переноса от размера и формы при $D < L_e$

L_e - эффективная длина свободного пробега носителей (длина пробега дислокаций, диффузионная длина и т.п.)

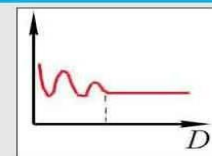
(рассеяние, рекомбинация, отражение на границах)



Возможность проявления квантовых эффектов при D соизмеримым с λ_B

у электрона $\lambda_B \sim (m_e E)^{-1/2}$, где m_e - эффективная масса электрона, E - энергия Ферми,
 λ_B для металлов $\approx 0,1 \dots 1$ нм, для ряда полупроводников и тугоплавких соединений $\approx 10 \dots 100$ нм

Для любой частицы с малой энергией $\lambda_B = h / mv$, где m и v - масса и скорость частицы, а h - постоянная Планка



Основные области применения наноматериалов и нанотехнологий в настоящее время

Конструкционные материалы

Инструментальные материалы

Производственные технологии

Триботехника

Ядерная энергетика

Электро-магнитная и электронная техника

Защита поверхности материалов

Медицина и биотехнологии

Военное дело

Конструкционные материалы:

Наноструктурные объемные материалы отличаются большими прочностью при статическом и усталостном нагружении, а также твердостью по сравнению с материалами с обычной величиной зерна . Поэтому основное направление их использование в настоящее время – это использование в качестве высокопрочных и износостойких материалов.

Инструментальные материалы:

Инструментальные сплавы с нанозерном являются как правило более стойкими по сравнению с обычным структурным состоянием . Нанопорошки металлов с включениями карбидов используют в качестве шлифующего и полирующего материала на конечных стадиях обработке полупроводников и диэлектриков

Производственные технологии:

Добавление нанопорошков (подшихтовка) к обычным порошкам при производстве сталей и сплавов методами порошковой металлургии позволяет снижать пористость изделий, улучшать комплекс механических свойств. Проявление эффекта сверхпластичности в наноструктурных сплавах алюминия и титана делает перспективным их применение для изготовления деталей и изделий сложной формы.

Триботехника:

что металлические материалы с наноструктурой обладая повышенной по сравнению с обычным структурным состоянием твердостью и износостойкостью. Другим направлением в этой области является использование полинанокристаллических алмазов и алмазоподобных покрытий, а также сверхтвердых веществ на базе фуллеренов

Ядерная энергетика

Нanomатериалы используются в системах поглощения ВЧ- и рентгеновского излучений. Таблетки ТВЭЛов изготавливаются из ультрадисперсных порошков UO_2 , а в термоядерной технике используются мишени для лазерно-термоядерного синтеза из ультрадисперсного бериллия. Перчатки, фартуки и другая защитная одежда из резины или искусственных материалов с добавками ультрадисперсного свинцового наполнителя при одинаковой степени защиты в четыре раза легче обычной защитной одежды

Электро-магнитная и электронная техника:

Устройства записи и считывания информации; элементы электроники (транзисторы, диоды, светодиоды, конденсаторы и др.); сверхпроводники и др.

Защита материалов

В ряде случаев для надежного функционирования изделий необходимо обеспечить высокие водо- и маслоотталкивающие свойства их поверхности. В этих целях разработано покрытие на основе наночастиц оксида титана с размерами 20-50 нм и полимерного связующего.

Медицина и биотехнологии:

Наноструктурные материалы, в частности Ti, используются как имплантанты, протезы и в травматологических аппаратах. Причиной является сочетание высоких механических свойств (на уровне сложнoleгированных сплавов) с высокой биологической совместимостью чистого металла.

Военное дело:

Ультрадисперсные порошки используются в составе ряда радиопоглощающих покрытий для самолетов, созданных с применением технологии «Стелс», а также в перспективных видах взрывчатых веществ и зажигательных смесей. Углеродные нановолокна используются в специальных боеприпасах, предназначенных для вывода из строя энергосистем противника (т. н. «графитовая бомба»)

Ограничения в использовании наноматериалов

- Материалы с наноразмерным зерном отличаются хрупкостью.
- Склонность к межкристаллитной коррозии из-за очень большой объемной доли границ зерен.
- Нестабильность структуры наноматериалов, а следовательно, нестабильность их физико-химических и физико-механических свойств.
- При формовании изделий из нанопорошков достаточно остро встает также проблема комкования (слипания наночастиц) в агломераты, что может осложнить получение материалов с заданной структурой и распределением компонентов.

Высокие напряженности электрического поля, которые могут приводить к локальным пробоям

Рассеяние тепла транзисторами ограничивает увеличение плотности элементов

Исчезновение полезных объемных свойств и возрастание роли дефектности полупроводников

Уменьшение размеров приводит к квантово механическому туннелированию электронов от истока к стоку.

Неоднородность окисного слоя приводит к перетеканию электронов из затвора в область канала.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Основные методы получения наноматериалов

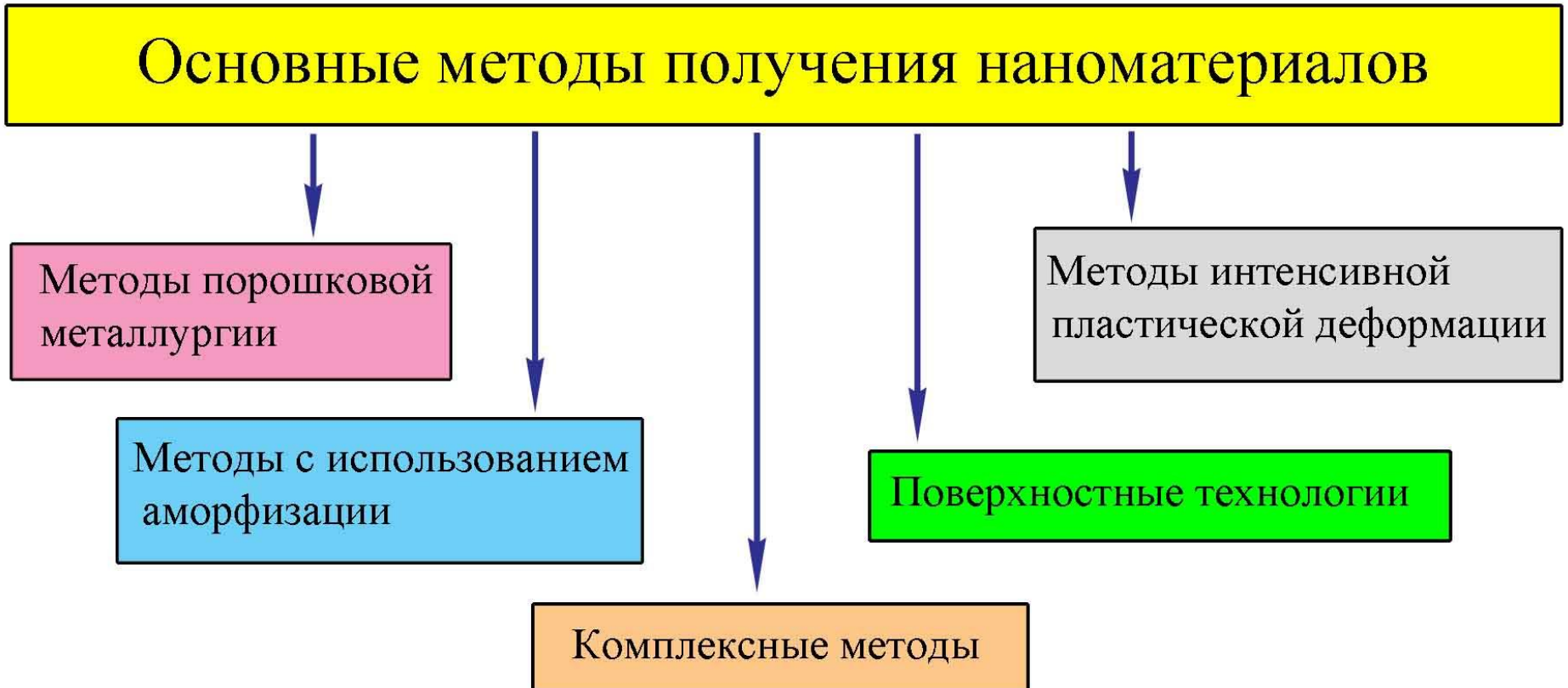
Методы порошковой
металлургии

Методы с использованием
аморфизации

Комплексные методы

Методы интенсивной
пластической деформации

Поверхностные технологии



Методы получения нанопорошков

технологии, основанные на химических процессах

Химическое осаждение из паровой фазы

- перенос через газовую фазу
- восстановление с последующим разложением

Высокоэнергетический синтез

- детонационный
- плазмохимический

Осаждение из растворов

- химическое осаждение
- золь-гель метод
- жидкофазное восстановление
- гидротермальный синтез
- микроэмульсионный метод
- криохимический метод

Разложение нестабильных соединений

- термическое
- радиационное

Восстановительные процессы

- водородное восстановление соединений металлов
- химико-металлургический метод

технологии, основанные на физических процессах

Физическое осаждение из паровой фазы

- термическое испарение (индукционный, электродуговой, электронно-лучевой, лазерный нагрев)
- взрывное испарение (взрыв электропроводника, воздействие лазерного импульса)
- испарение в потоке инертного газа (левитационно-струйный метод)

Распыление расплава

- с помощью водоохлаждаемого диска или барабана
- ударное распыление
- электродинамическое

Механическое измельчение

- размол в мельницах
- противоточный размол в псевдоожиженном слое

Методы с использованием интенсивной пластической деформации

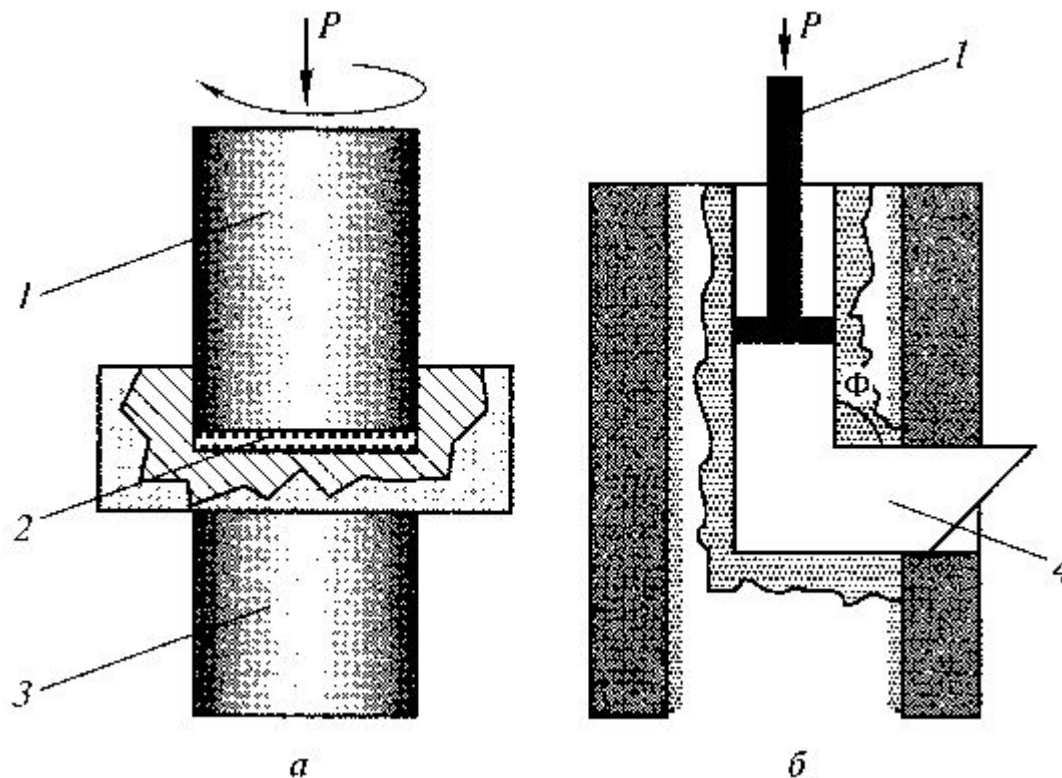


Схема методов интенсивной пластической деформации: а- метод кручения под высоким давлением, б- метод равноканального углового прессования, 1- пуансон, 2- образец, 3- суппорт, 4- заготовка

Наноориентированные технологии обработки поверхности

Технологии, основанные на химических процессах

Химическое осаждение из паровой фазы (CVD-технологии)

- Восстановление
 $2MeG + N_2 \rightarrow 2Me + 2HG$
- Пиролиз карбониллов
 $Me_x(CO)_y \rightarrow xMe + yCO$
- Диспропорционирование хлористый аммоний $\rightarrow Al + AlCl_3$
- Взаимодействие с промежуточными компонентами
 $MeCl + CH_4 \rightarrow MeC + HCl$
- Осаждение при разложении металлоорганических соединений (MOCVD-технология)

Осаждение с использованием плазмы тлеющего разряда
 $Ti^+ + N^+ \rightarrow TiN$

Световая и электронная литография

Осаждение из растворов металлоорганических соединений

Химическое и электрохимическое окисление, например анодирование

Технологии, основанные на физических процессах

Физическое осаждение из паровой фазы (PVD-технологии)

- Термическое испарение (электродуговое, лазерное, электронно-лучевое, индукционное и т.п.)
- Катодное и магнетронное распыление
- Ионное осаждение (энергия до 1 кэВ)
- Ионное плакирование или перемешивание
- Ионная имплантация
 - низкоэнергетическая 2-5 кэВ
 - высокоэнергетическая 2-30 кэВ

Газотермическое напыление

- Высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF)
- Плазменное напыление на воздухе (APS) и в контролируемой атмосфере (VPS)

Лазерные методы

- Лазерное легирование или имплантация
- Лазерная аморфизация поверхности

Интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя, ультразвуковое воздействие

- **Тонкие пленки** – это особый вид состояния конденсированных веществ. Это обусловлено спецификой процесса их формирования: тонкие пленки получаются конденсацией молекулярных или атомных потоков вещества на поверхности, путем внедрения атомных частиц (ионов) в тонкий приповерхностный слой.
- Формирование тонких пленок путем осаждения на поверхности включает несколько процессов, а именно: **переход вещества из конденсированной фазы**, которая может быть твердой или жидкой, **в газообразную**; **перенос паров вещества в пространстве от испарителя к подложке** (обычно при пониженном давлении); **конденсация паров вещества** при достижении подложки.

Кинетика процессов конденсации включает процессы **адсорбции**, зародышеобразования, **роста и коалесценции новой фазы**.

Сорбция – (от лат. sorbeo - поглощаю) - поглощение твёрдым телом или жидкостью (сорбентом) жидкости или газа (сорбата) из окружающей среды.

Абсорбция - поглощение вещества из газовой фазы всем объёмом жидкого сорбента.

Адсорбция - поглощение вещества **поверхностью сорбента**. В зависимости от силы связи между адсорбатом и подложкой различают **физисорбцию** (слабая связь ~ 10 - 100 мэВ) и **хемосорбцию** (сильная связь ~ 1 - 10 эВ).

Покрытие адсорбата – поверхностная концентрация атомов адсорбата выраженная в единицах монослоев (МС).

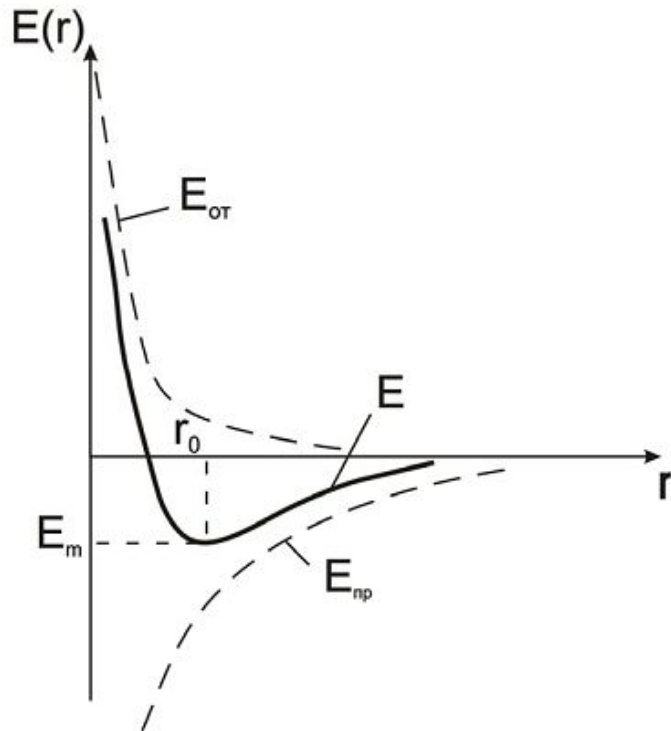
Десорбция – (от лат. de- – приставка, означающая удаление, и sorbeo - поглощаю) - процесс, обратный адсорбции и абсорбции, при котором поглощённое вещество покидает поверхность или объём адсорбента.

Адатом – атом находящийся в физически адсорбированном состоянии, но не успевший прийти в состояние термодинамического равновесия с поверхностью.

Адсорбция

Налетающий на поверхность подложки атом (или молекула) испытывает воздействие двух сил: силы притяжения Ван-дер-Ваальса и силы отталкивания. Потенциальная энергия взаимодействия падающего атома с атомами на поверхности в этом случае может быть записана в виде суммы:

$$E(r) = E_{\text{пр}}(r) + E_{\text{от}}(r)$$



Зависимость энергии притяжения $E_{\text{пр}}$ и отталкивания $E_{\text{от}}$, а также полной потенциальной энергии E падающих атомов (сплошная линия) от расстояния до поверхности. Здесь E_m — энергия адсорбции, r_0 — расстояние минимума полной потенциальной энергии.

Расстояние r_0 , соответствующее минимуму потенциальной энергии, является квазистабильным состоянием адсорбированного атома (адатома)

- Вероятность того, что попавший на поверхность атом будет захвачен ею, характеризуется **коэффициентом конденсации**. Величину этого коэффициента определяют по отношению числа атомов, сконденсировавшихся на поверхности, к общему числу атомов, достигших поверхности из пучка.
- Наряду с коэффициентом конденсации важным параметром, характеризующим свойства поверхности адсорбировать атомы из атмосферы, является **коэффициент аккомодации**. Который характеризует среднюю долю энергии, которой обмениваются при одном столкновении между собой атомы набегающего пучка и подложки (степень термического равновесия).

$$\alpha_T = (T_I - T_R)/(T_I - T_S) = (E_I - E_R)/(E_I - E_S),$$

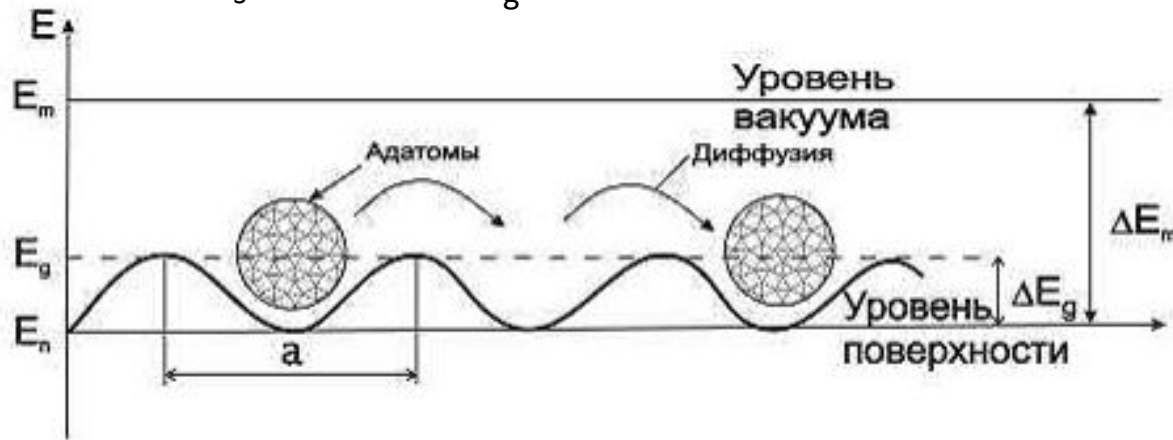
- где T и E соответственно эквивалентные среднеквадратичные температуры и кинетические энергии падающих (I) и отраженных, вновь испарившихся, атомов пучка (R) и подложки (S).

Миграция атомов по поверхности

Тепловые флуктуации приводят к тому, что адатомы диффундируют по поверхности из одной потенциальной ямы в другую со средней длиной диффузионного пробега $\bar{A}$, определяемой броуновским движением по формуле Эйнштейна:

$$\bar{A} = (2D_s \tau_a)^{1/2} = (2v \tau_a)^{1/2} a \exp(-E_m/2kT) = 2^{1/2} a \exp[(E_m - E_g)/2kT],$$

Где a – расстояние перескока между адсорбционными узлами поверхности, E_g – энергия активации перескока при поверхностной диффузии, а коэффициент поверхностной диффузии равен : $D_s = a^2 v \exp(-E_g/kT)$



Потенциальный рельеф поверхности (сплошная линия) и возможные положения адатомов. E_n – уровень энергии атомов на поверхности; $\Delta E_g = E_g - E_n$ – энергия активации диффузии адатома на поверхности; ΔE_m – энергия адсорбции; E_m – уровень энергии в вакууме; a – расстояние между атомами

Десорбция

В результате тепловых флуктуаций существует вероятность отрыва адатома от поверхности и его испарения. В этом случае среднее время жизни адатома может быть описано выражением:

$$\tau_a = 1 / \nu_o \exp(\Delta E_m / kT)$$

Где ν_o – частота тепловых колебаний адатома в узле кристаллической решетки, характеризует частоту попыток десорбции ($\nu_o = 10^{12} \dots 10^{14}$ Гц), ΔE_m – энергия адсорбции.

Среднее время релаксации τ_e , необходимое для того чтобы атом пришел в термическое равновесие с подложкой, должно быть меньше $2/\nu$, где ν – частота колебаний адатома на поверхности. Следовательно:

$$\tau_e \sim 2\tau_a \exp(-\Delta E_m / kT).$$

- В начальный период времени концентрация адатомов при осаждении возрастает, достигая значения N_a , пропорционального скорости осаждения (плотности потока атомов на поверхности) R :

$$N_a = R\tau_a = R/v_0 \exp \Delta E_m / kT$$

- Как видно из выражения, величина n_a для выбранной подложки и заданной скорости осаждения определяется главным образом температурой, и концентрация адатомов не должна увеличиваться!!!
- Такое несоответствие объясняется тем, что адсорбированные атомы, мигрируя по поверхности, за время жизни успевают столкнуться друг с другом, образуя устойчивые скопления из адсорбированных атомов или зародыши. При этом энергия десорбции такого зародыша возрастает на величину энергии химической связи адатомов в зародыше. Поэтому такие зародыши имеют большее время жизни и с большей вероятностью успевают присоединить к себе другие адатомы.

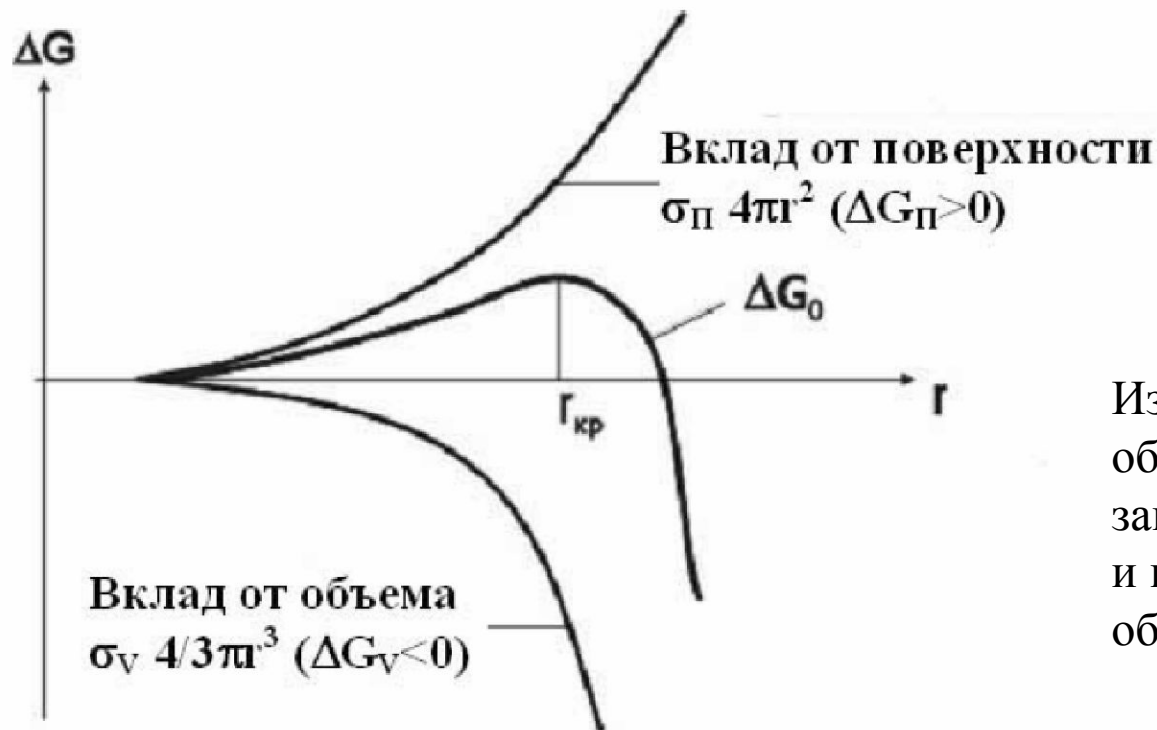
Зародышеобразование

При образовании зародышей из отдельных атомов свободная энергия G_0 всей системы с одной стороны уменьшается за счет образования химической связи между атомами ($\Delta G_v < 0$), т.е. пропорционально объему частицы, с другой – увеличивается за счет образования поверхности раздела зародыша ($\Delta G_{\pi} > 0$). Существует два возможных механизма образования зародышей:

- а) гомогенный механизм, характерный для зарождения в газовой фазе;
- б) гетерогенный механизм, который обычно реализуется при зарождении на поверхности подложки.

При гомогенном механизме для образования частиц с размером, меньшим, чем $r_{кр}$, изменение свободной энергии ΔG_0 возрастает с увеличением r . Поэтому рост частиц энергетически не выгоден. Если же частица выросла до размера $r > r_{кр}$, то дальнейший рост сопровождается уменьшением полной свободной энергии. Значение $r_{кр}$ может быть найдено из условия: $\partial \Delta G_0 / \partial r = 0$ учитывая, что изменение свободной энергии для зарождения сферической частицы радиусом r : $\Delta G_0 = \sigma_v 4/3 \pi r^3 + \sigma_{\pi} 4 \pi r^2$ где σ_v и σ_{π} - свободная удельная энергия (объемная и поверхностная, соответственно) получим:

$$r_{кр} = -2 \sigma_v / \sigma_{\pi}$$



Изменение энергии образования зародышей в зависимости от их радиуса и вкладов от поверхности и объема

При гетерогенном зарождении необходимо учитывать взаимодействие частицы с атомами подложки. Наличие контакта с подложкой значительно снижает энергию образования зародышей и ускоряет зарождение. В этом случае изменение поверхностной энергии зародыша по сравнению со свободной энергией его диссоциации может быть записано

$$\Delta G_{\Pi} = \sigma_{cv} S_{cv} + \sigma_{cs} S_{cs} - \sigma_{sv} S_{cs}$$

Здесь σ_{cv} , σ_{cs} , σ_{sv} - свободные энергии поверхностей раздела: конденсат-пар, конденсат-подложка, подложка-пар, соответственно; S_{cv} , S_{cs} - площади поверхностей зародыша с паром и с подложкой, соответственно. Последний член в уравнении соответствует уменьшению свободной энергии вследствие исчезновения площади контакта поверхности S_{cs} с паром.

Поскольку $\sigma_{cv} < \sigma_{sv}$, а на поверхности обычно имеются дефекты в виде ямок или выступов, что увеличивает площадь поверхности под зародышем S_{cs} , то на таких дефектах энергия зародышеобразования уменьшается.

Размер критического зародыша сильно зависит как от природы пленки и материала подложки, так и от условий осаждения, и в первую очередь, от температуры, поверхностной диффузии адатомов и скорости осаждения.

Рассмотрим подробнее эти зависимости.

- Известно, что теплота испарения (или теплота сублимации) пропорциональна температуре кипения. Поэтому для материалов с высокой температурой кипения величина ΔG_v также велика, и даже очень маленькие зародыши являются устойчивыми в отличие от металлов с низкой температурой кипения, для небольших зародышей которых процесс переиспарения становится весьма вероятным.
- Критические зародыши должны иметь большие размеры, если поверхностная энергия конденсируемого материала σ_{cv} велика, а материала подложки σ_{sv} - мала.
- Если энергия активации поверхностной диффузии очень велика, то диффузионная длина будет малой, и зародыш сможет расти только за счет материала, непосредственно попадающего на него из газовой фазы.
- Увеличение температуры подложки при постоянной скорости осаждения приводит к увеличению размера критического зародыша.
- Увеличение скорости осаждения приводит к увеличению скорости зародышеобразования и, следовательно, к образованию более мелких островков.

Таким образом, тенденция к образованию островковой структуры усиливается:

- ☐ при высокой температуре подложки;
- ☐ в материале с низкой температурой кипения;
- ☐ при низкой скорости осаждения;
- ☐ при слабой связи между пленкой и подложкой;
- ☐ при высокой поверхностной энергии в материале пленки;
- ☐ при низкой поверхностной энергии подложки.

Стадии процесса роста пленки

- *Образование островковой пленки*
- *Коалесценция островков*
- *Образование сетчатой структуры*
- *Формирование сплошной пленки*

Образование островковой пленки

- Зародыши, обычно возникающие в результате флуктуационных процессов, растут в трех измерениях, однако рост в направлениях, параллельных подложке, происходит быстрее, чем по нормали. Это объясняется тем, что рост происходит, в основном, за счет поверхностной диффузии адатомов по подложке, а не за счет прямого соударения с атомами в паровой фазе.

Коалесценция островков

- Коалесценция (срастание) зародышей характеризуется уменьшением полной площади проекции зародышей на подложку и увеличением их по высоте.
- Основным механизмом переноса массы при коалесценции является поверхностная диффузия, которая проявляется тем сильнее, чем меньше частицы.

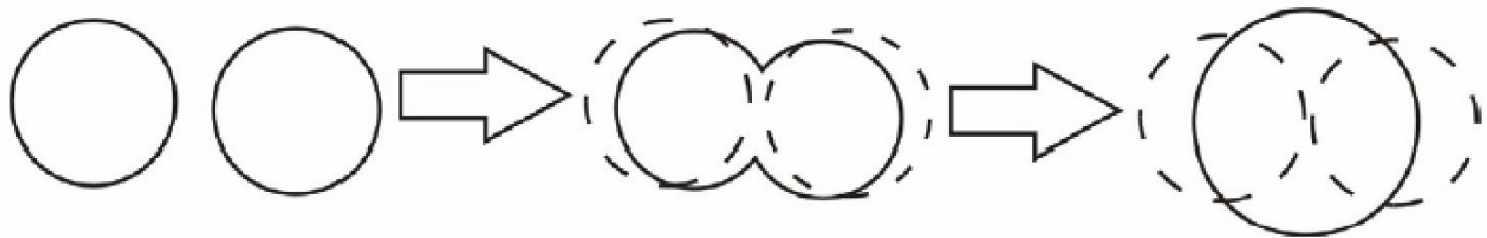
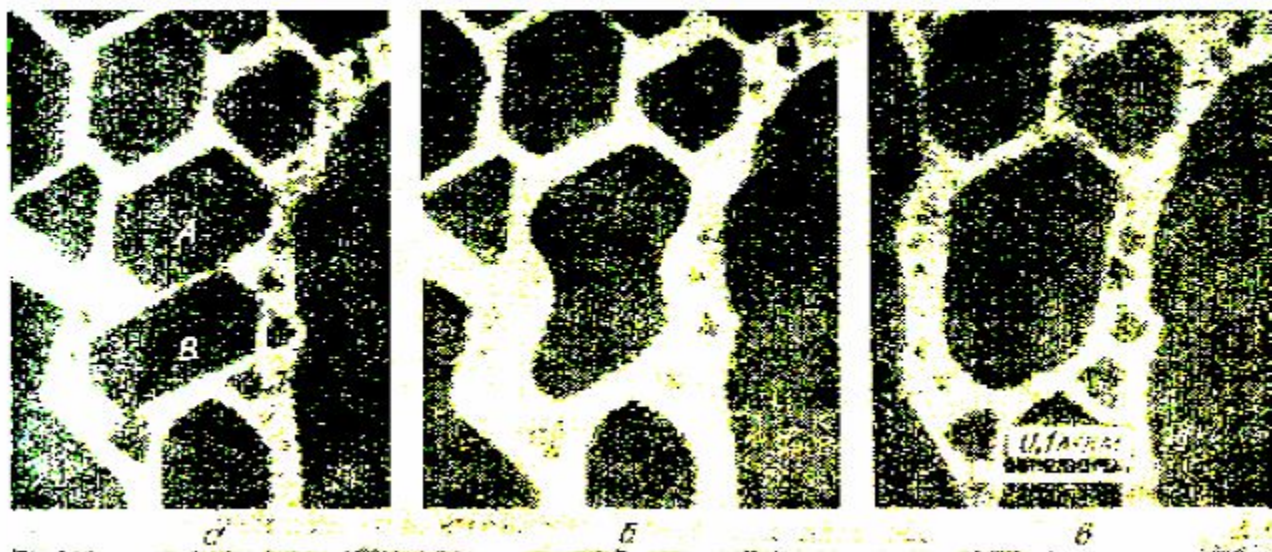


Схема изменения формы сферических островков в процессе коалесценции



Электронные микрофотографии последовательного роста пленки золота во время коалесценции и после нее

Образование сетчатой структуры

- По мере роста островков тенденция к тому, что после срастания они становятся совершенно круглыми, уменьшается. Островки вытягиваются и стремятся образовать непрерывную сетчатую структуру, в которой конденсированный материал разделен длинными узкими каналами неправильной формы шириной от 5 до 20 нм. Затем в каналах образуются мостики, с которых начинается быстрое заполнение канала. Процессы быстрого исчезновения каналов аналогичны процессам, происходящим в жидкости, и являются проявлением одного и того же физического эффекта, а именно, минимизации полной поверхностной энергии нарастающего материала путем ликвидации областей с высокой кривизной поверхности

Формирование сплошной пленки

- В процессе роста пленки, особенно при коалесценции, происходят заметные изменения ориентации островков. Это особенно важно для эпитаксиального роста пленок. Общий механизм роста поликристаллических слоев похож на механизм роста эпитаксиальных пленок, за исключением того, что срастающиеся островки в этом случае имеют произвольную относительную ориентацию, подчиняющуюся случайному закону распределения. Основным фактором, определяющим размер зерен в готовой пленке, является не первоначальная концентрация зародышей, а процесс рекристаллизации, происходящий при коалесценции зародышей или островков.