



*В. Б. Пикулев*

# НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Лекция 2. Технологии получения наноструктур

*scilink.ru, 2021*

# Два подхода

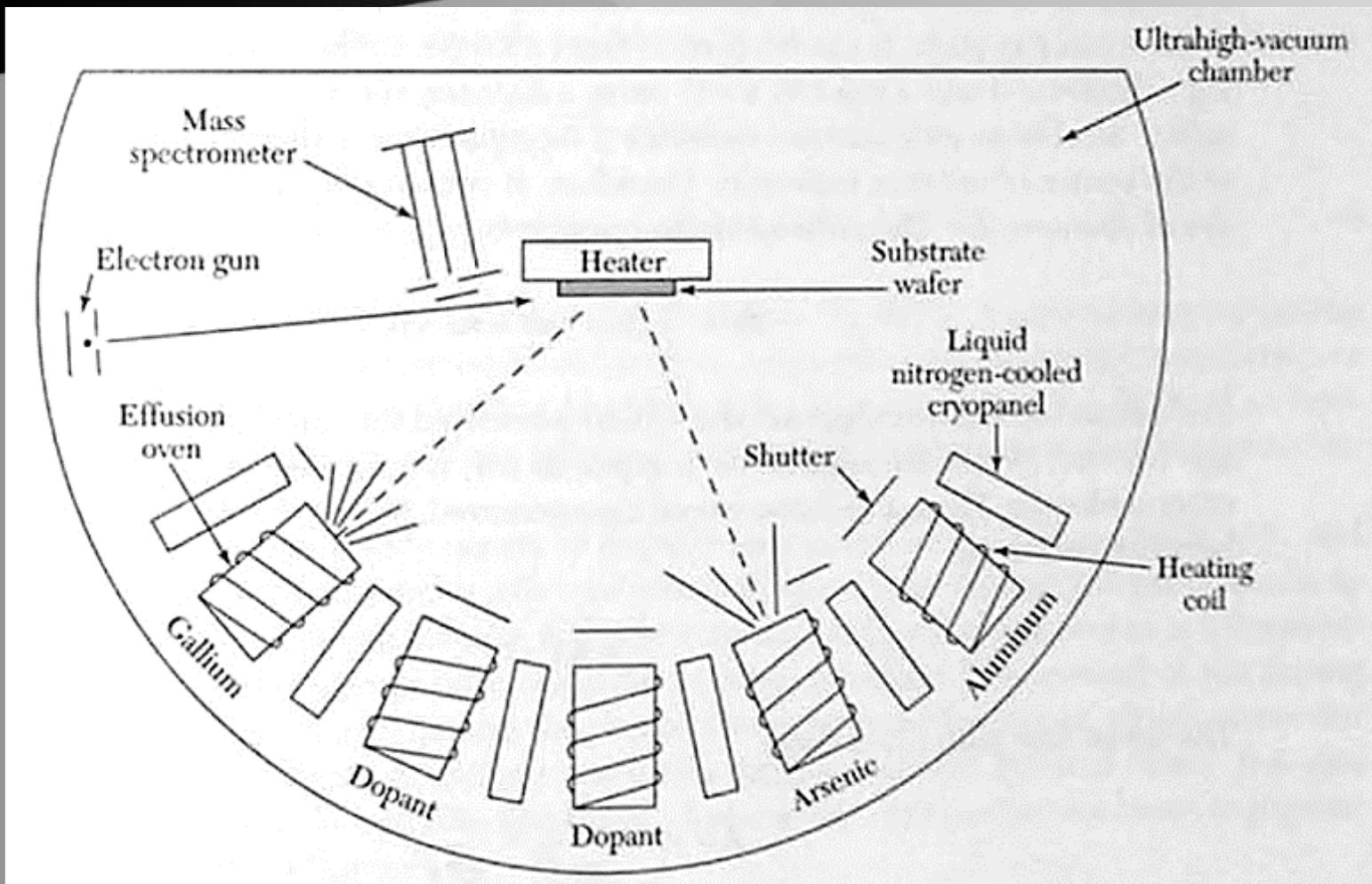
В индустрии нанотехнологий оба этих пути нередко пересекаются при формировании наноструктур определённой формы и состава

Различают два основных подхода, позволяющих формировать наноструктуры:

- "**сверху-вниз**" (top-down approach) предполагает создание структур с требуемыми размерами и конфигурацией путём избирательного удаления объёмного слоя материала
- "**снизу-вверх**" (bottom-up approach) предполагает способы формирования требуемых структур путём селективного осаждения атомов и молекул на заданные позиции или путём самосборки (в т.ч. в результате химических реакций).

# MBE

## 1. Молекулярно-лучевая эпитаксия



Реагенты вводятся в СВВ-камеру в виде молекулярных или атомных потоков из эффузионных ячеек. Наряду с испарением осаждаемого материала внутри эффузионных ячеек, молекулярные потоки могут формироваться из паров или газообразных соединений, подаваемых через сопла.

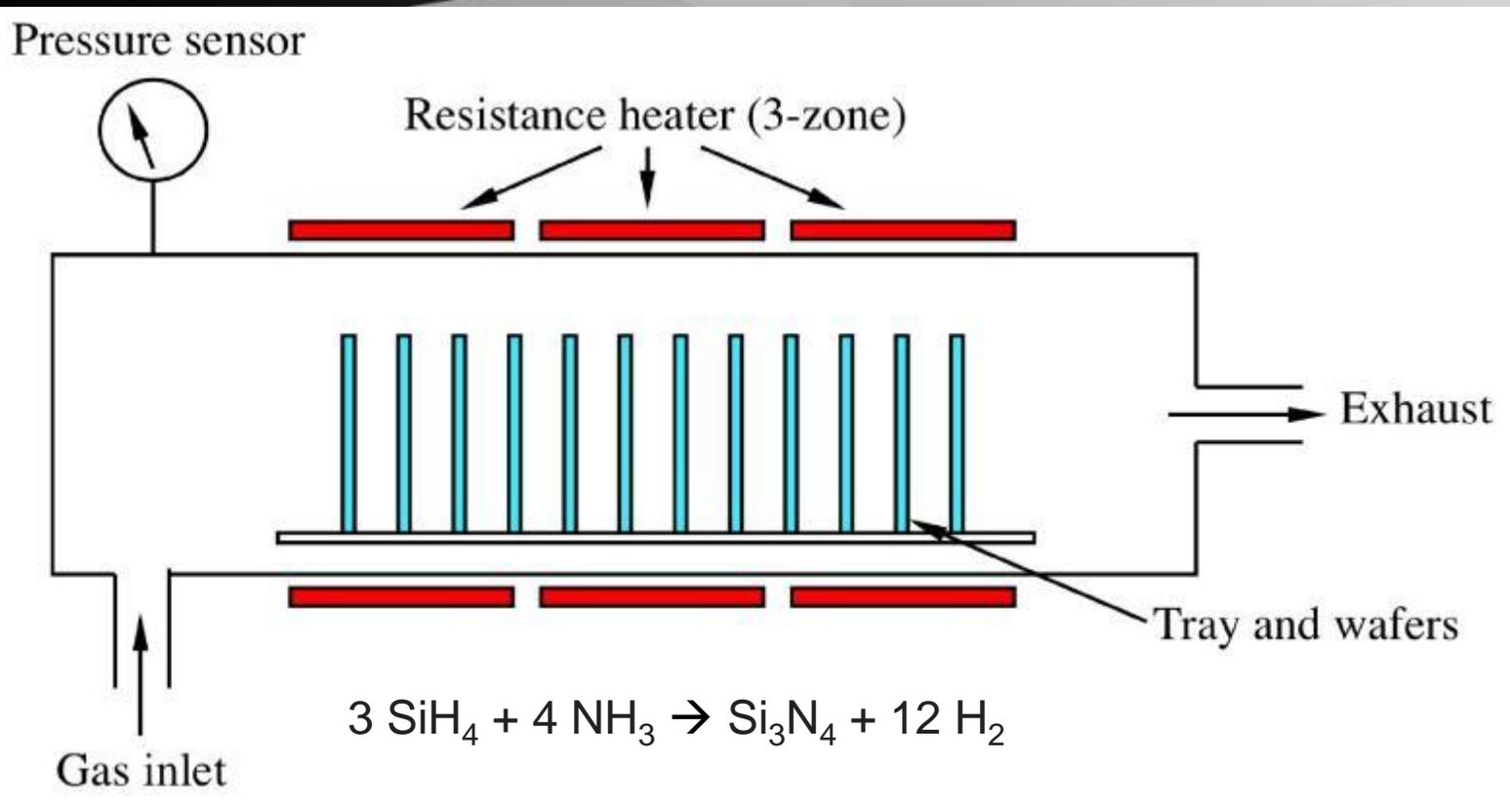
По малым значениям степени дефектности, концентрации неконтролируемых примесей и резкости межфазных границ этот метод вне конкуренции.

## 1. Молекулярно-лучевая эпитаксия обеспечивает:

- получение монокристаллических слоёв высокой чистоты, так как их рост осуществляется в сверхвысоком вакууме при высокой чистоте потоков веществ
- выращивание многослойных структур с резкими изменениями состава на границах слоёв благодаря относительно низкой температуре роста, препятствующей взаимной диффузии
- получение гладких бездефектных поверхностей при гетероэпитаксии
- получение нанослоёв с контролируемой толщиной за счёт точного управления потоками и малых скоростей роста
- создание структур со сложными профилями состава и легирования, а также одномерных и нульмерных наноструктур (в зависимости от особенностей агрегации атомов на поверхности подложки и условий осаждения)

# CVD

## 2. Осаждение из газовой фазы



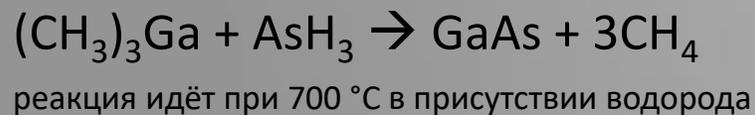
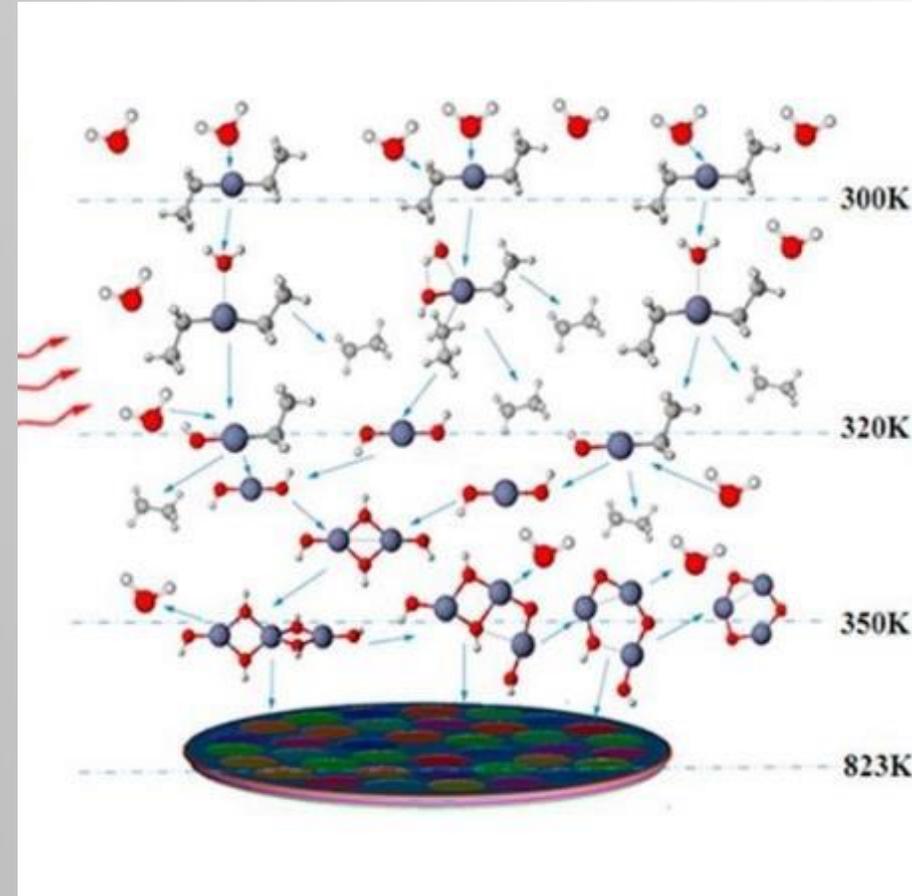
Группа технологических методов, в которых получение наноструктур осуществляют с помощью химических реакций с участием газообразных реагентов. При этом возможны следующие физико-химические процессы:

- Химическая реакция между газообразными реагентами и/или между реагентами и подложкой
- Термическое разложение газообразных химических соединений
- Пиролиз газообразных углеводородов (термическое разложение при недостатке кислорода)

Данная группа методов широко применяется для выращивания тонких эпитаксиальных плёнок на монокристаллических подложках.

# MO CVD

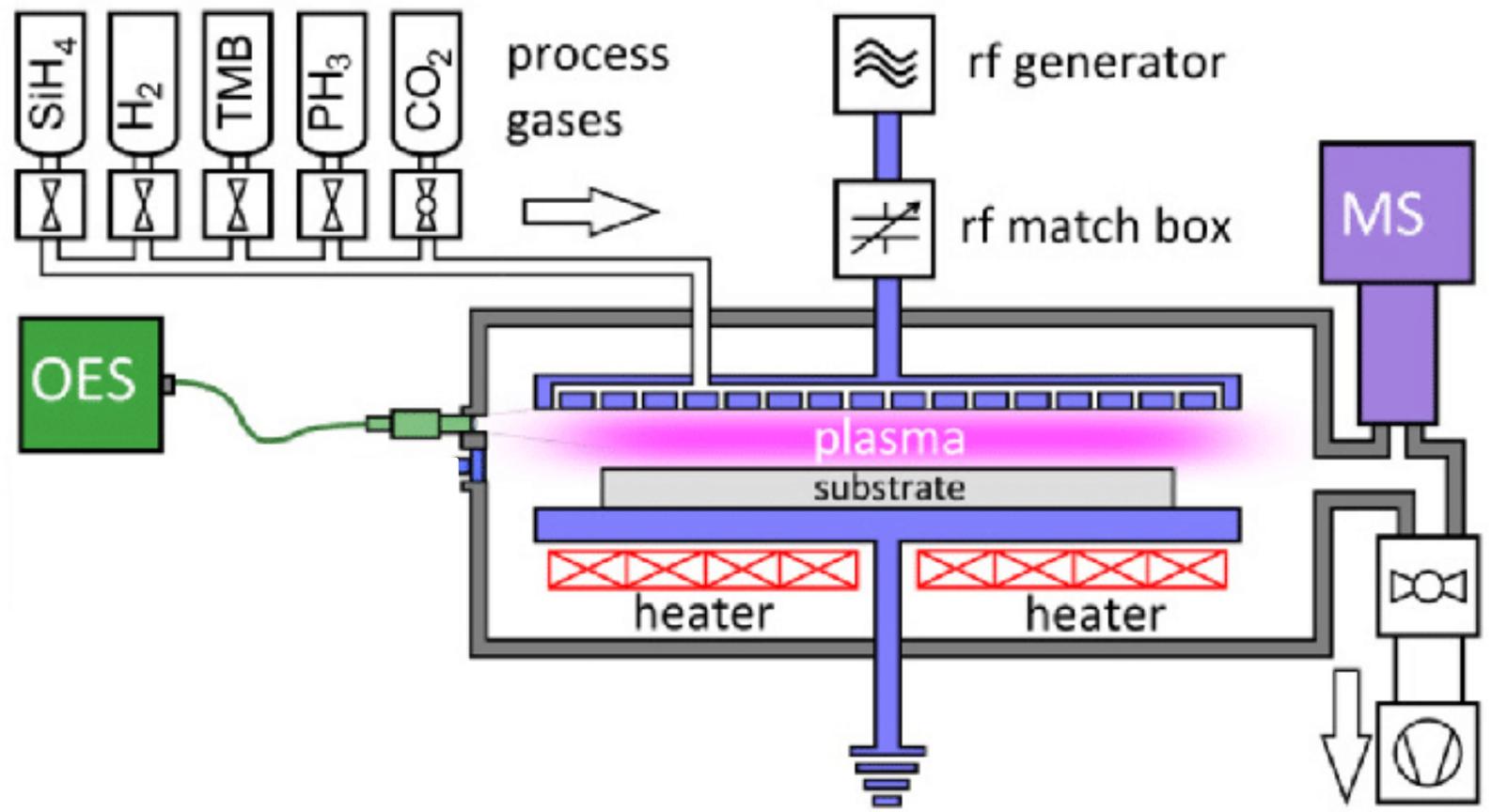
## 2.1 Осаждение из газовой фазы: металл-органические реагенты



Термин «металлоорганика» относится к обширной группе соединений, имеющих химические связи металл-углерод и металл-кислород-углерод, а также координационные связи между металлами и органическими молекулами.

# PE CVD

## 2.2 Химическое осаждение из газовой фазы, стимулированное газоразрядной плазмой

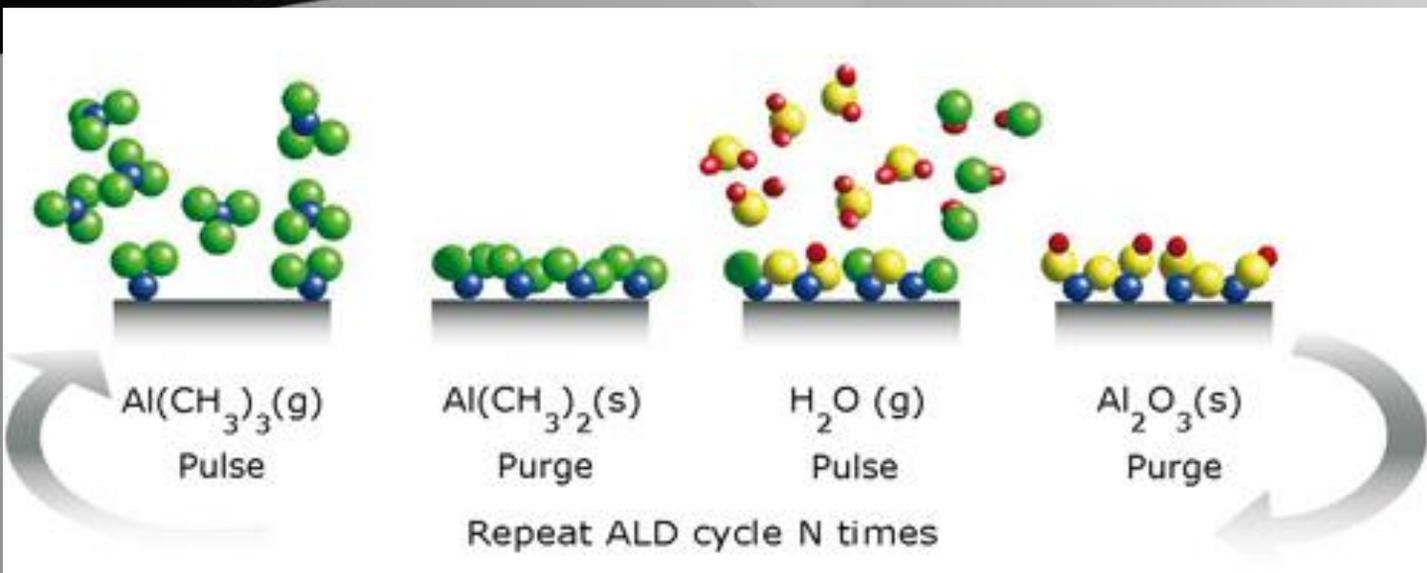


Газоразрядная плазма, возбуждаемая подачей ВЧ-напряжения на электроды, служит источником дополнительной энергии для диссоциации молекул газов-реактивов.

Важной характерной особенностью газоразрядной плазмы является присутствие в ней атомов и ионов водорода, являющихся продуктами диссоциации реагентов. Они инициируют травление уже осажденного на подложку материала путем удаления радикалов, слабо связанных с подложкой.

# ALD

## 2.3 Метод осаждения атомных слоёв



Типичные условия процесса:

триметилалюминий и пары воды

Диапазон давлений: 0.1–10 mbar (Torr, hPa) либо атмосферное

Диапазон температур: 50 - 500 °C

Метод позволяет создавать наноплёнки и синтезировать наноструктуры на поверхности твёрдых тел путём многократного чередования химических реакций между адсорбатом и твёрдым телом. При этом толщина образующегося слоя определяется не временем процесса или интенсивностью потока вещества, а количеством повторяющихся циклов химических реакций. Реакции протекают при низких температурах (от 25 до 400 °C), что резко снижает вклад диффузионных процессов и позволяет создавать многослойные структуры с резкими границами.

## 2.3 Метод осаждения атомных слоёв

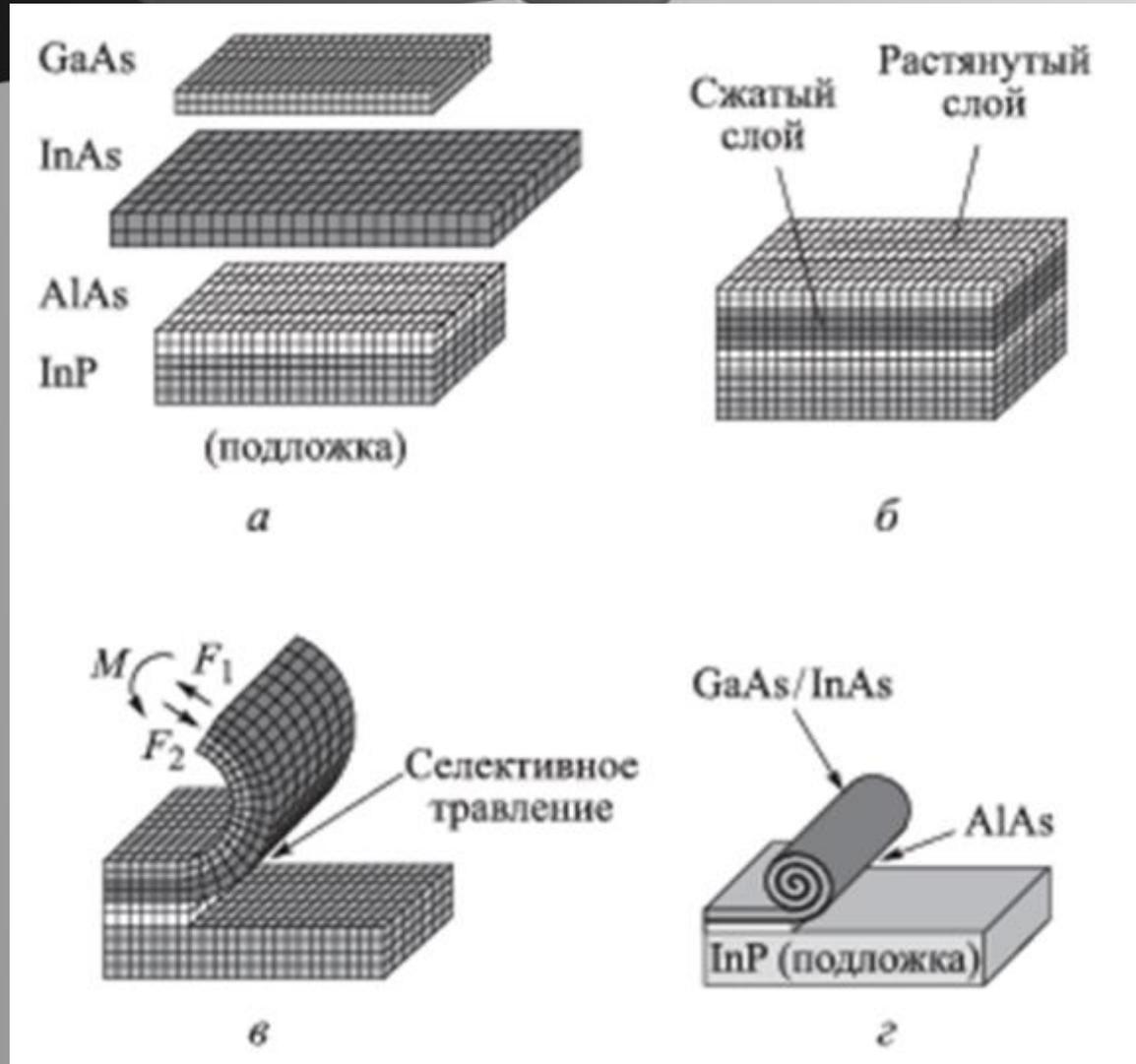


*Метод предполагает следующие основные операции:*

1. Подготовительная обработка поверхности подложки с целью придания ей необходимых хемосорбционных свойств
2. Термообработка подложки в среде первого реакционного газа для формирования моноатомного слоя первого компонента осаждаемого соединения
3. Очистка камеры от остатков первого реакционного газа и продуктов реакций
4. Термообработка подложки в среде второго реакционного газа для формирования моноатомного слоя второго компонента осаждаемого соединения и придания его поверхности хемосорбционных свойств, необходимых для повторного осаждения атомов первого компонента
5. Очистка камеры от остатков второго реакционного газа и продуктов реакций.

Операции 2-5 повторяют до тех пор, пока не будет получена пленка необходимой толщины. Это определяет сравнительно низкую производительность данного метода.

# Напряжённые полупроводниковые плёнки



Процесс формирования нанотрубки методом сворачивания напряжённой гетероплёнки GaAs / InAs

# Квантовые точки на поверхности

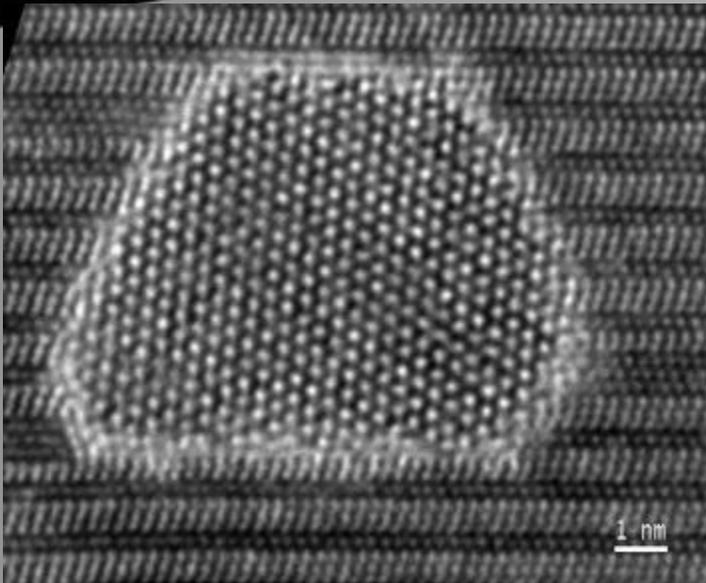
Методом получения обычно является газофазная гетероэпитаксия. При гетероэпитаксии материалов, согласованных по постоянной решётки, когда сумма поверхностной энергии эпитаксиальной плёнки и энергии границы больше поверхностной энергии подложки, реализуются условия для возникновения островков на поверхности.

Островковый рост по механизму **Вольмера-Вебера** соответствует ситуации, когда атомы плёнки сильнее связаны между собой, чем с подложкой. В этом случае трёхмерные островки зарождаются и растут прямо на поверхности подложки. Иначе – реализуется механизм образования монослоя **Франка — Ван дер Мерве**.

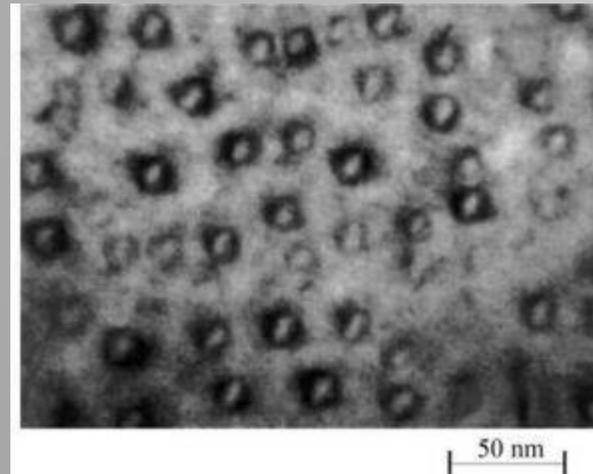
Доля несоответствия между постоянными решётки островков и подложки:

$$f = \frac{|a_i - a_s|}{a_s}$$

~ 3% благоприятствует росту трёхмерных островков (механизм **Странски-Кростанова**). В этом случае сначала вырастает однородный монослой (смачивающий) на котором далее формируются трёхмерные островки.



Кристаллик Ge в матрице 4H-SiC

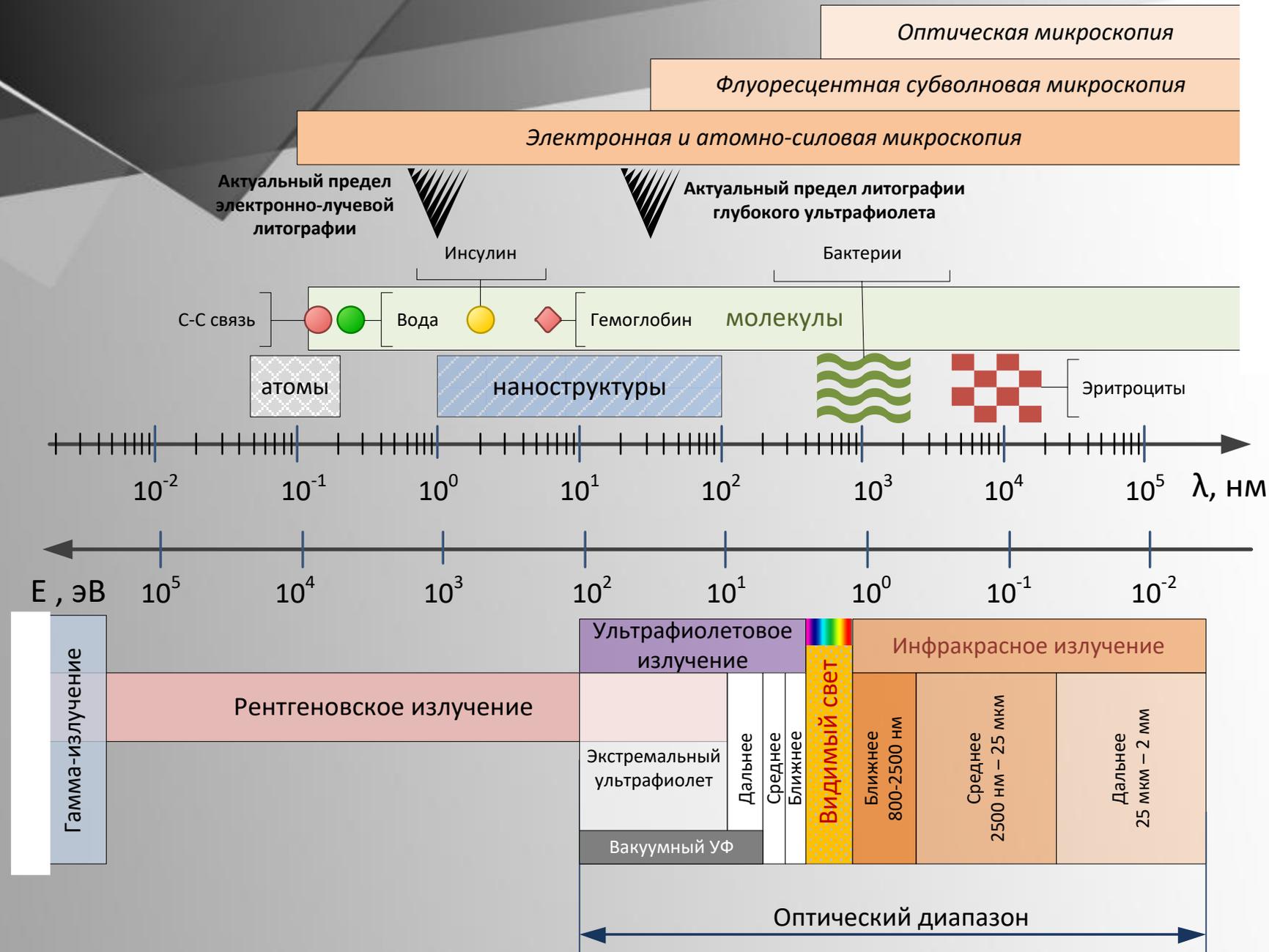


Квантовые точки InAs в матрице GaAs

InAs на GaAs, InAs на InP, InP на GaAs,  
Ge на Si, CdSe на Si, CdSe на ZnS,...

# Нанолитография

Шкала характерных размеров для неорганических и органических веществ в сравнении с характеристиками электромагнитных волн

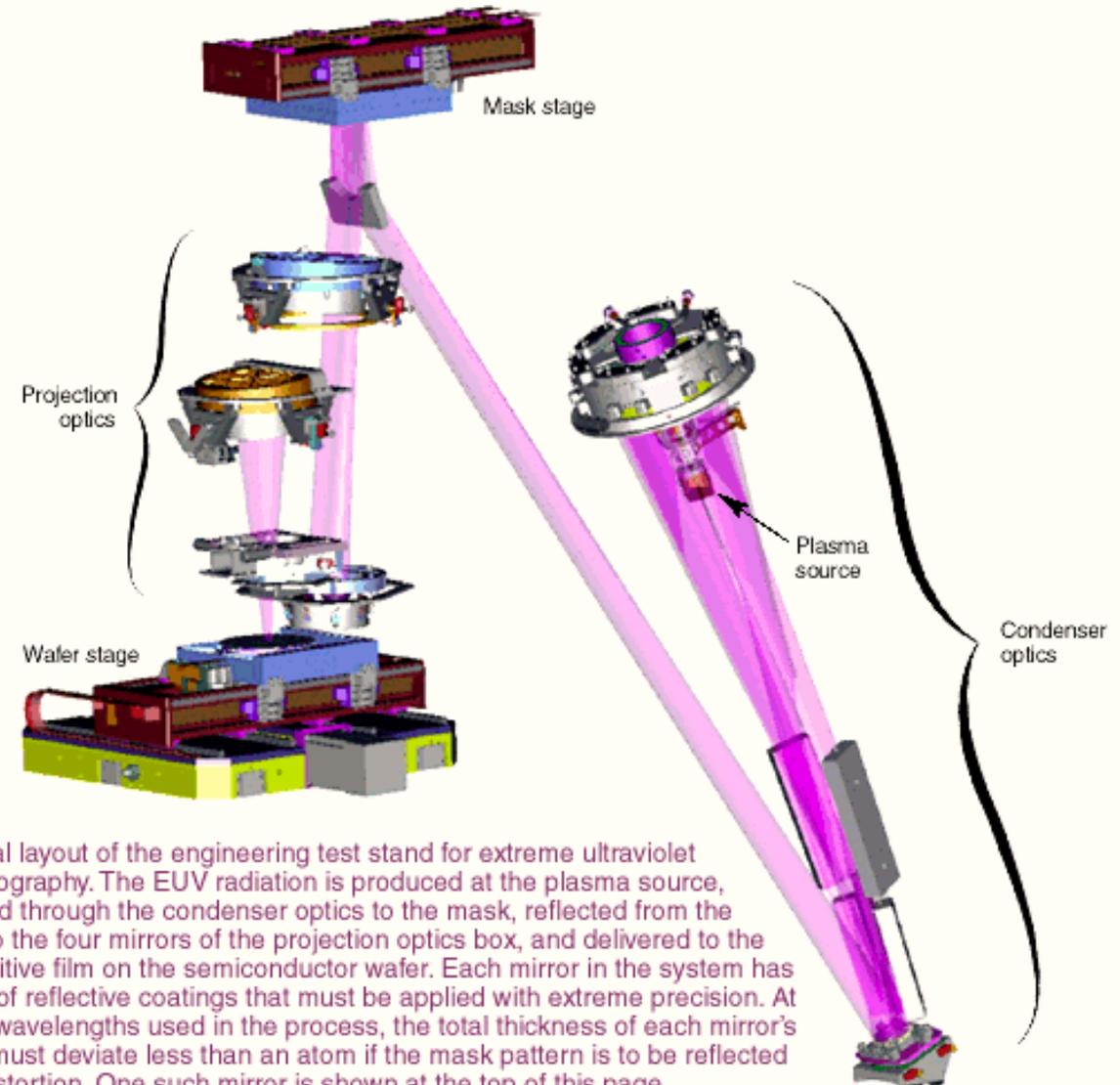


# Нанолитография



Данный вид литографии имеет максимальную производительность и удовлетворяет требованиям массового производства. Однако минимальные размеры элементов ограничены длиной волны используемого излучения и соответствующей оптикой.

# Фотолитография



The optical layout of the engineering test stand for extreme ultraviolet (EUV) lithography. The EUV radiation is produced at the plasma source, transmitted through the condenser optics to the mask, reflected from the mask onto the four mirrors of the projection optics box, and delivered to the EUV-sensitive film on the semiconductor wafer. Each mirror in the system has 81 layers of reflective coatings that must be applied with extreme precision. At the short wavelengths used in the process, the total thickness of each mirror's coatings must deviate less than an atom if the mask pattern is to be reflected without distortion. One such mirror is shown at the top of this page.

# Нанолитография

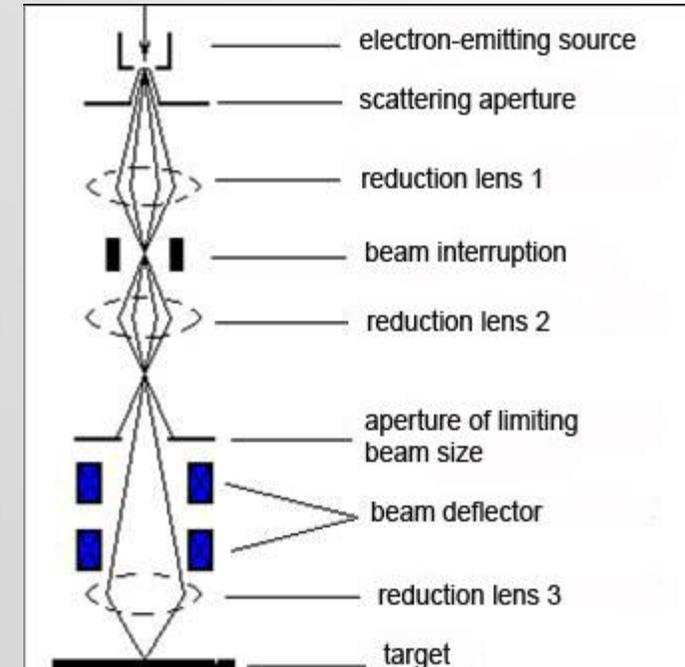
## Электронно-лучевая литография (EBL)

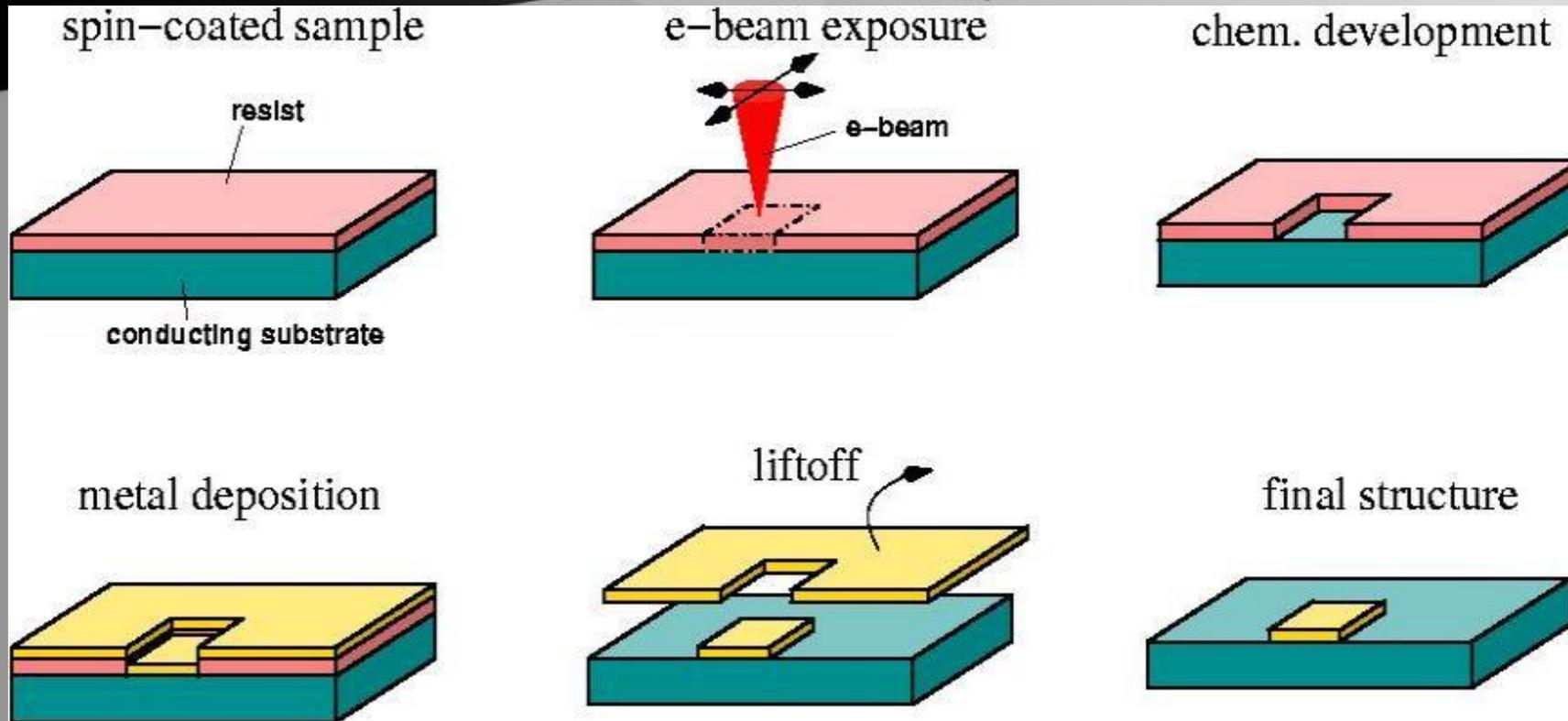
8-нм литограф  
JBX-6300FS  
(диаметр  
электронного  
пучка 2 нм)



Установка для электронно-лучевой литографии включает вакуумируемую колонну с источником электронов, системой ускоряющих электродов, магнитными линзами и системой сканирования электронного луча по поверхности экспонируемой подложки.

Электронный луч сканируют по поверхности подложки, покрытой чувствительным к облучению резистом. С помощью электростатической системы записывания луча, управляемой компьютерным генератором изображения, экспонирование поверхности резиста производится выборочно, в соответствии с требуемой геометрией элементов.

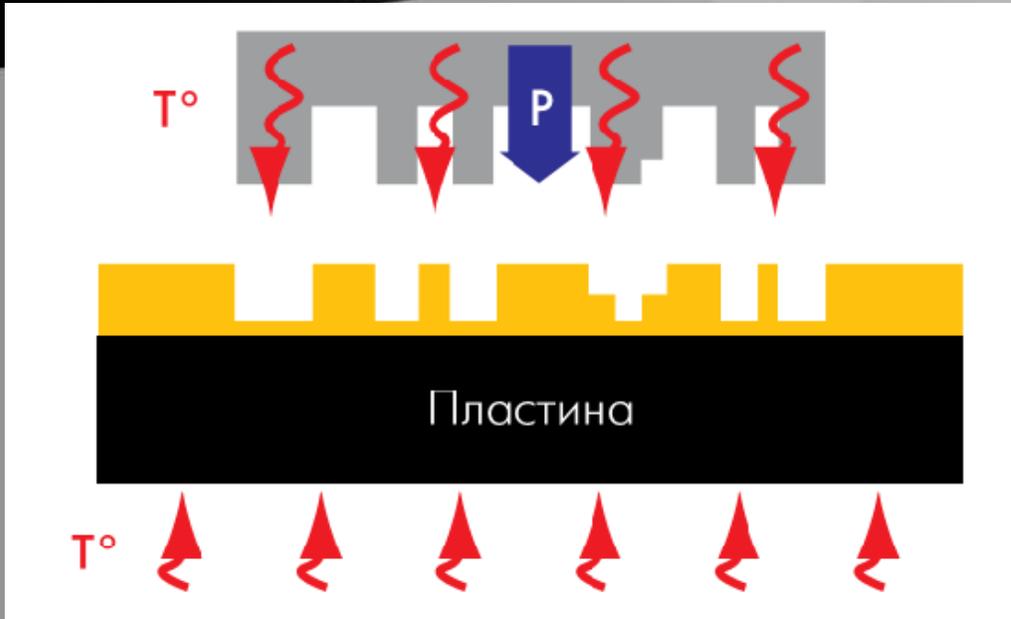




**взрывная  
литография**

Особенность технологии в том, что после нанесения металлической плёнки на окна и в целом на резист полученные структуры подвергают химической обработке в активном органическом растворителе, например в ацетоне, для быстрого удаления неэкспонированных участков резиста и находящейся на них пленки металла.

# Нанолитография

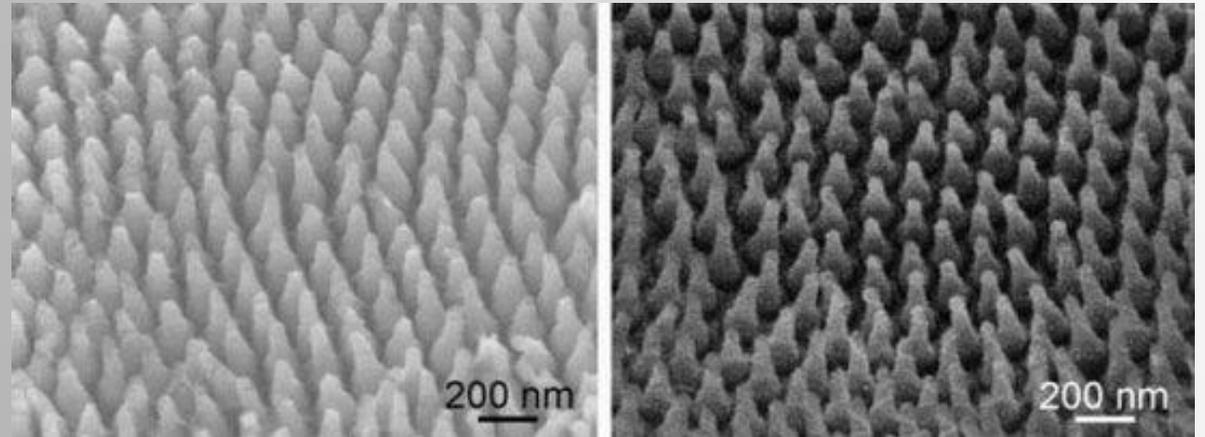


Особенности:

- технологическая простота метода
- сложность изготовления стемпера
- нет ограничений на разрешающую способность литографа

# Наноимпринтинг

**Нанопечатная литография** (NIL – *Nano Imprint Lithography*) основывается на принципе механического модифицирования полимерной плёнки (резиста) при помощи шаблона при термообработке или обработке ультрафиолетом. Размеры элементов от единиц нм до единиц микрон. Для удаления слоя резиста в сжатых областях используют анизотропное реактивное ионное травление (распыление ионным пучком при протекании химических реакций).



Крылья цикады как шаблон для нанопечати

- В методе "**чернильной печати**" (inking) материал резиста в виде чернил наносится на эластичный штамп с требуемым рисунком и затем механически отпечатывается на подложке, создавая мономолекулярную плёнку. Эта пленка, нанесенная в соответствии с поверхностным рисунком штампа, используется затем в качестве маски при проведении операций травления.
- Метод, основанный на механическом вдавливании жесткого штампа в полимерную пленку резиста при повышенной температуре, получил название "**тиснение**" (embossing). В качестве материала резистивной пленки выбирают термопластичный полимер. Подложку, покрытую пленкой такого полимера, нагревают до температуры размягчения, после чего в него вдавливают штамп.
- При **нанопечати с фотополимеризацией мономера** (step and flash imprint lithography) в качестве резиста используется мономер, имеющий низкую вязкость при комнатной температуре, который в виде капель наносят на поверхность подложки. Затем формируют рисунок, подвергая резист мягкому механическому прессованию твердым штампом, изготовленным из прозрачного для ультрафиолета материала (кварц). Через штамп происходит неоднородное облучение резиста, приводящее к избирательной полимеризации мономера. После отделения штампа остаточный слой полимера между элементами рисунка удаляют травлением.



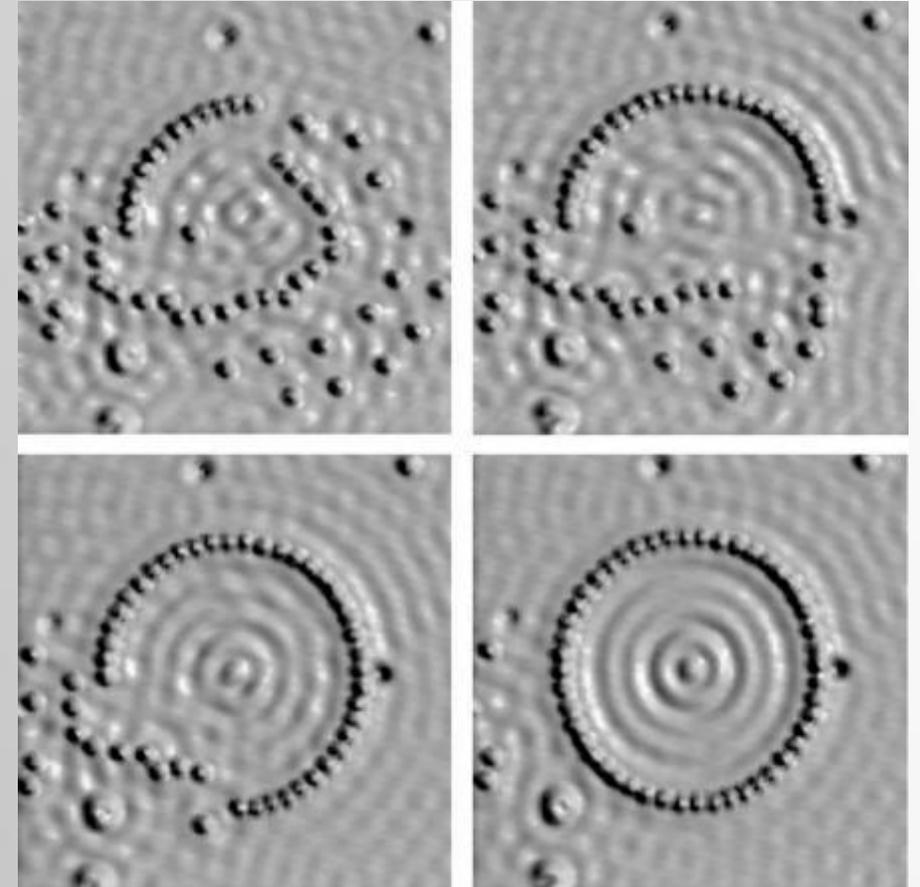
# Нанолитография

## Зондовая нанолитография

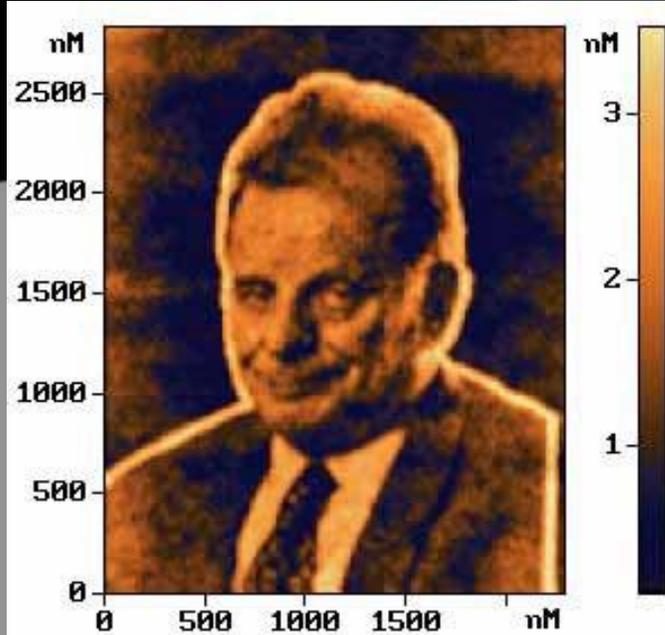
### Методы зондовой нанолитографии:

Формирование нанорельефа зондом СТМ:

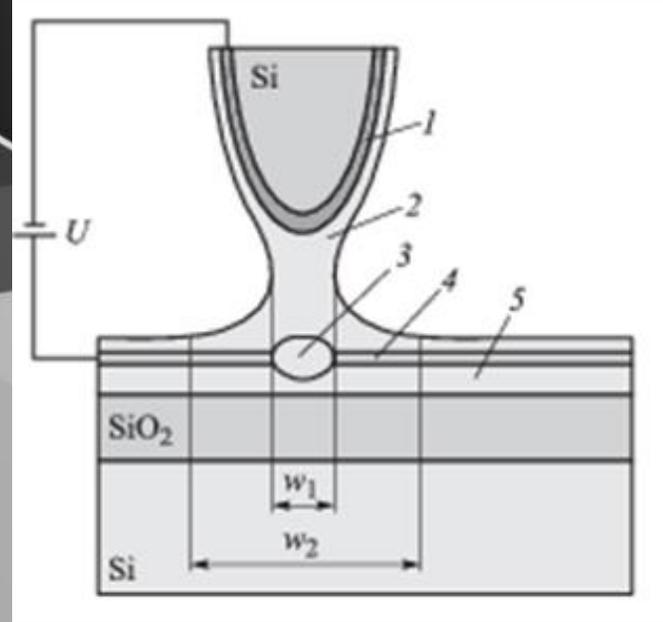
- Контактное (механическое воздействие зонда – наногравировка)
- Массоперенос
  - манипуляции отдельными атомами
  - осаждение атомов из газовой фазы (локальное химическое осаждение из газовой фазы \*)
  - осаждение атомов из электролита (локальное анодное окисление \*)
- Бесконтактное (выделение тепла либо воздействие электрического поля при прохождении туннельного тока)
  - Локальная глубинная модификация поверхности (на глубине > 100 нм) без эмиссии электронов



# Нанолитография



В режиме анодного окисления на зонд подается отрицательное относительно подложки смещение. Влага из окружающей среды служит электролитом. Вследствие капиллярного эффекта и под действием сильного электрического поля вода конденсируется на острие зонда и обволакивает его. Там молекулы воды диссоциируют. Электрическое поле разделяет эти ионы, направляя OH-группы к аноду, где они приводят к окислению материала подложки.

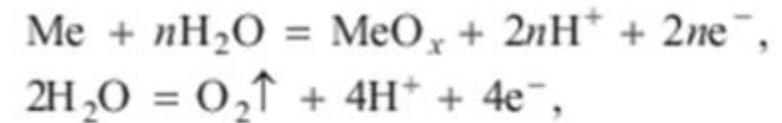


- 1 – кантилевер, 2 – вода,
- 3 – анодный оксид титана,
- 4 – собственный оксид титана,
- 5 – плёнка титана

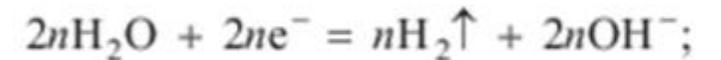
## Зондовая наноитография локальное анодное окисление

Процесс во многом аналогичен обычному электрохимическому анодному окислению.

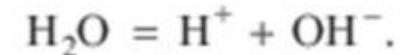
на аноде:



на катоде:



в зазоре устанавливается равновесие



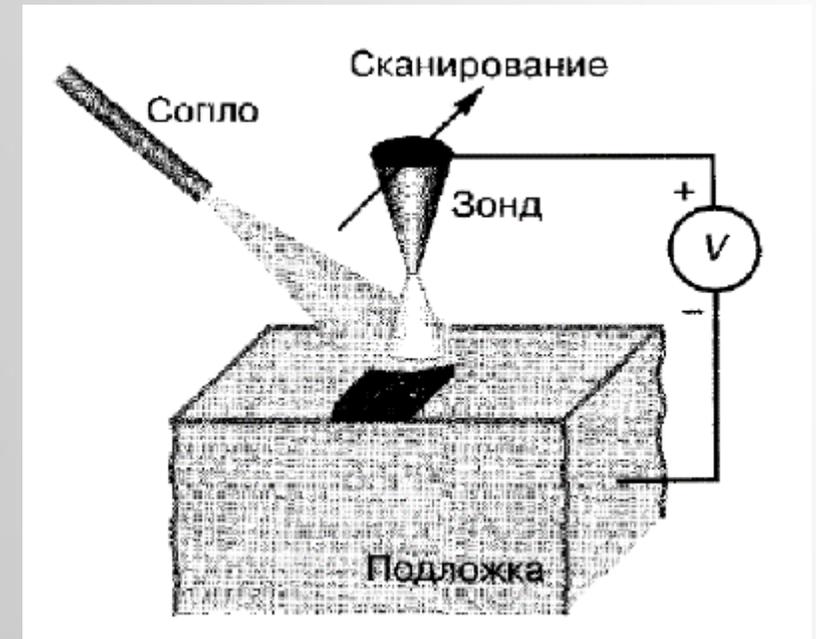
# Нанолитография

Зондовое локальное химическое осаждение материалов из газовой фазы обычно проводят при комнатной температуре в сканирующем туннельном микроскопе, оснащённом газовым инжектором, сопло которого располагают в непосредственной близости от острия зонда.

В сильном электрическом поле или за счёт электронной бомбардировки происходит диссоциация исходных реагентов. Продукты диссоциации дрейфуют в электрическом поле, создаваемом зондом, и адсорбируются только на расположенной непосредственно под острием зонда области поверхности подложки, поскольку напряженность неоднородного электрического поля в этой области максимальна и ионы мигрируют в нее.

Методы нанолитографии обычно обеспечивают формирование твердотельных квантовых шнуров и квантовых точек с размерами порядка 10 нм и менее.

## Зондовая нанолитография локальное химическое осаждение из газовой фазы

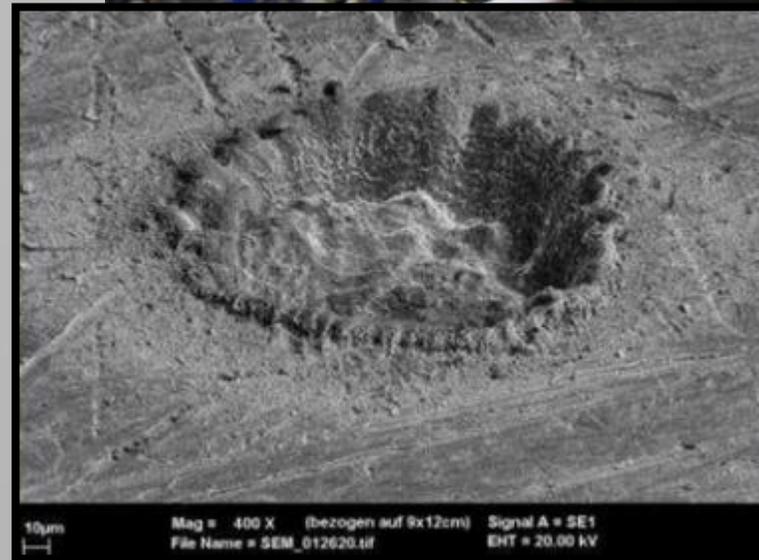
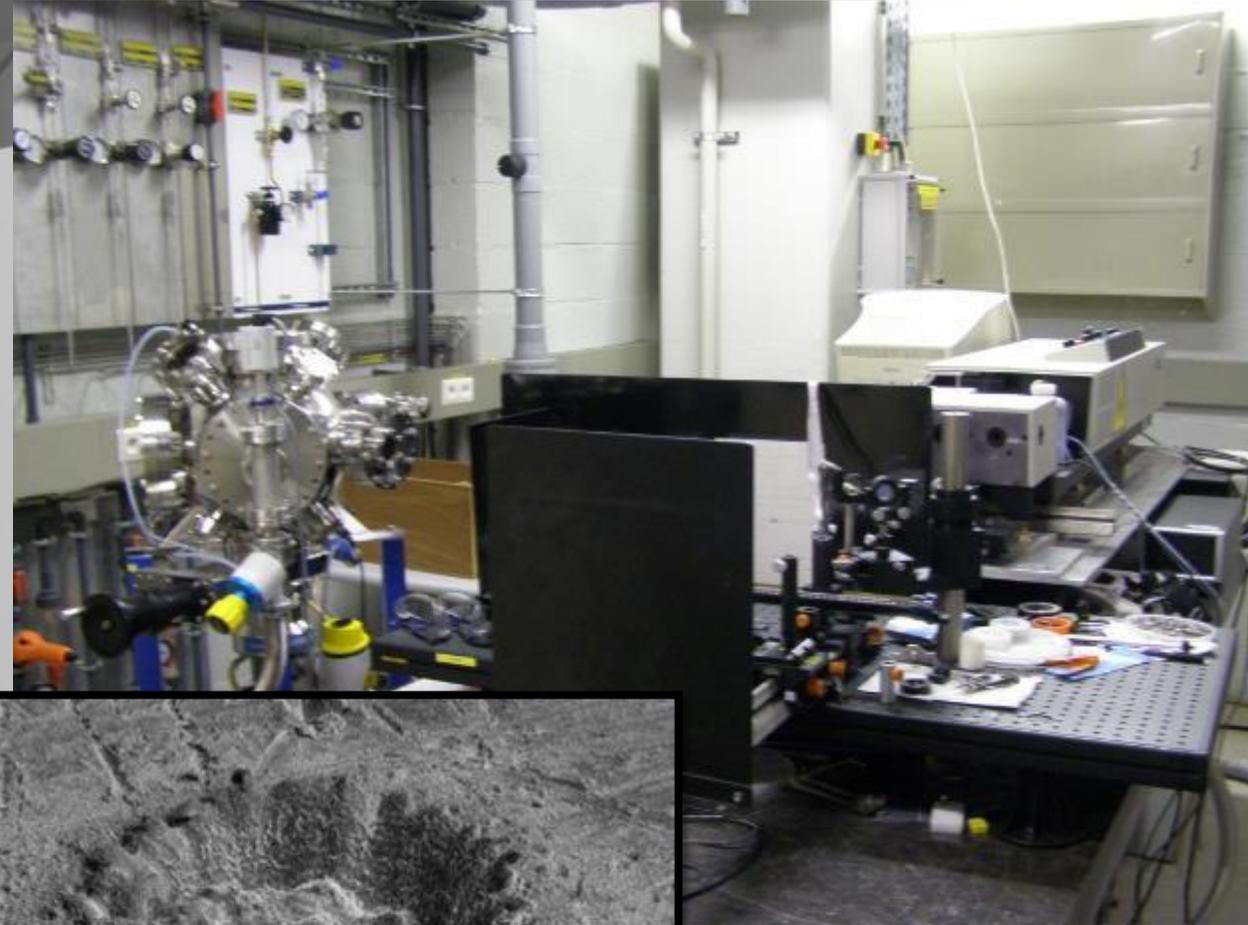


# Лазерная абляция

В отличие от лазерной десорбции, когда под действием лазера происходит десорбция атомов и молекул с поверхности вещества, при **лазерной абляции** происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и с разлетающимися из кратера наночастицами вещества всевозможных размеров.

Характерными особенностями лазерной абляции являются следующие:

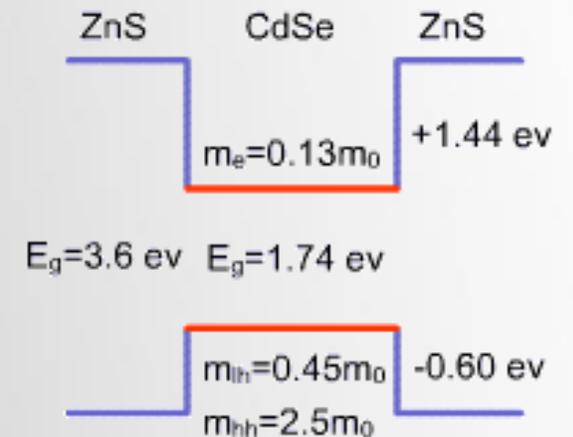
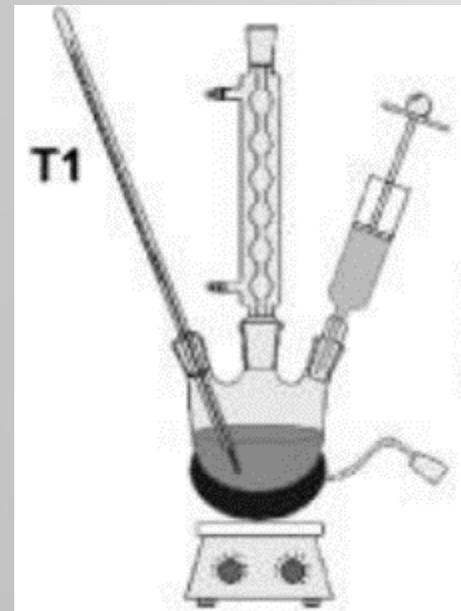
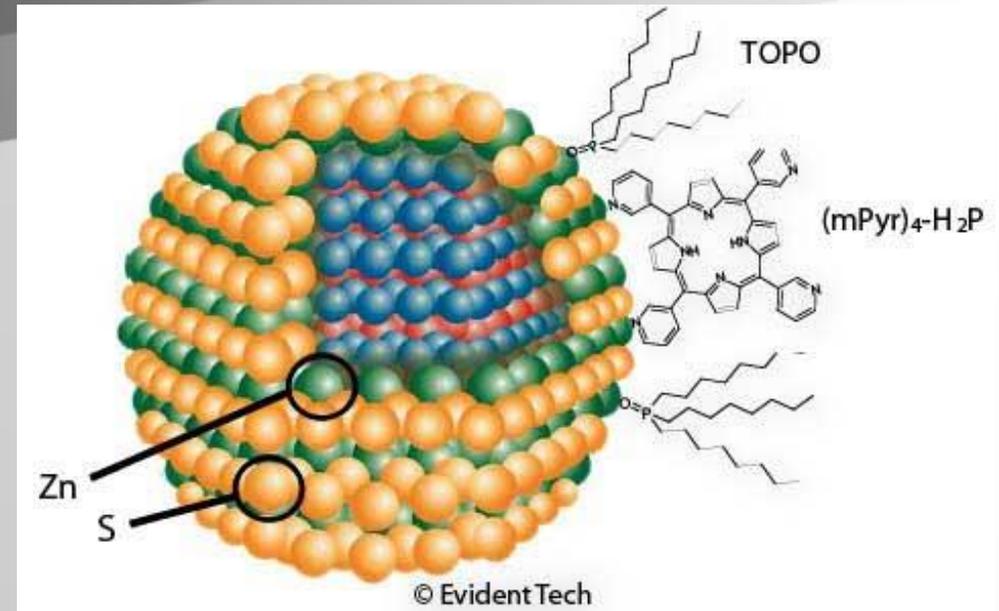
- лазерная абляция связана с непосредственным поглощением энергии лазерного импульса в веществе
- результатом лазерной абляции является формирование плазменного облака
- лазерная абляция имеет пороговый характер.



# Химический синтез

## Частицы CdSe в оболочке ZnS

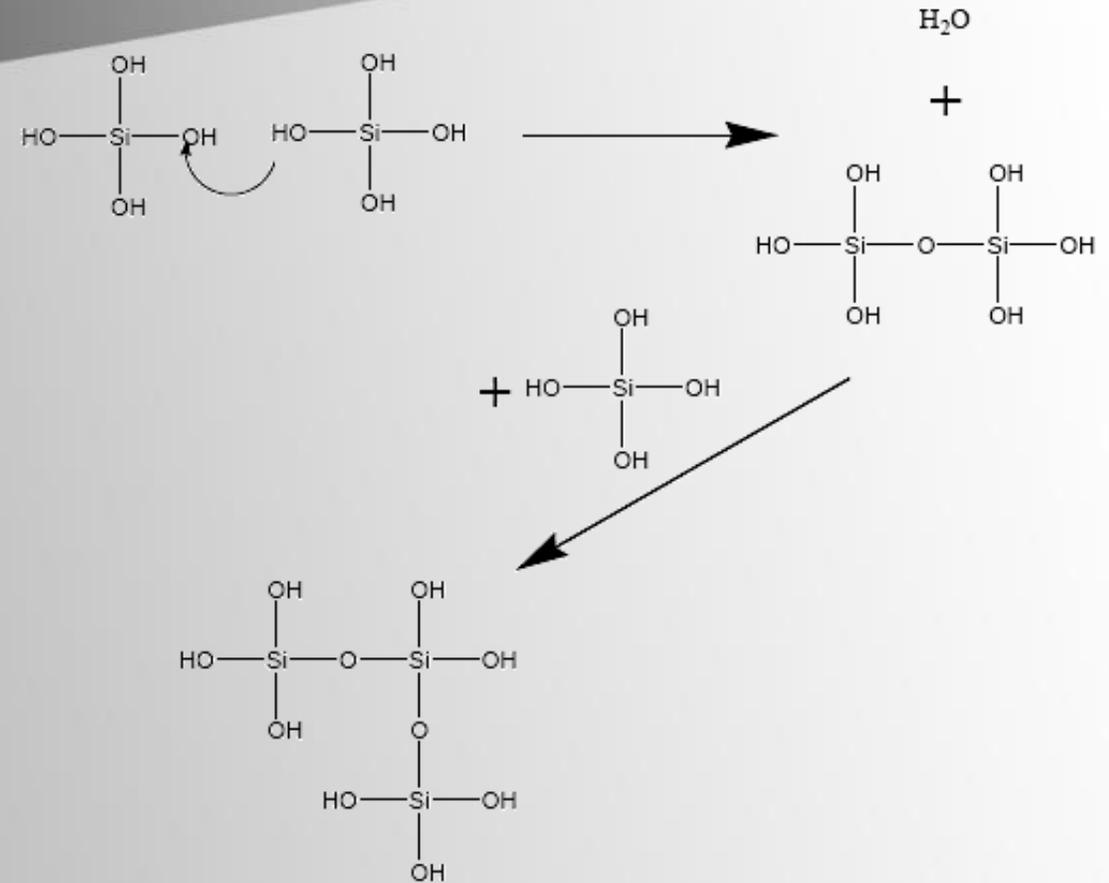
Методом высокотемпературного химического синтеза из прекурсоров Cd и Se получают ядра квантовых точек в виде коллоидных наночастиц с размером от  $\sim 2$  до  $\sim 6$  нм. На поверхности наночастиц сорбируется слой поверхностно-активных молекул *TOPO* (три-октил-фосфин-оксид), что позволяет получать растворы наночастиц в неполярных органических соединениях. Затем в раствор нанокристаллов, очищенных от оболочки, добавляют металлоорганические соединения, содержащие Zn и S. В результате последующей реакции пиролиза образуется сульфид цинка на поверхности селенида кадмия. Готовые наночастицы также образуют коллоидный раствор, в котором оболочка из молекул *TOPO* на их поверхности препятствует слипанию наночастиц.



# Золь-гель технологии

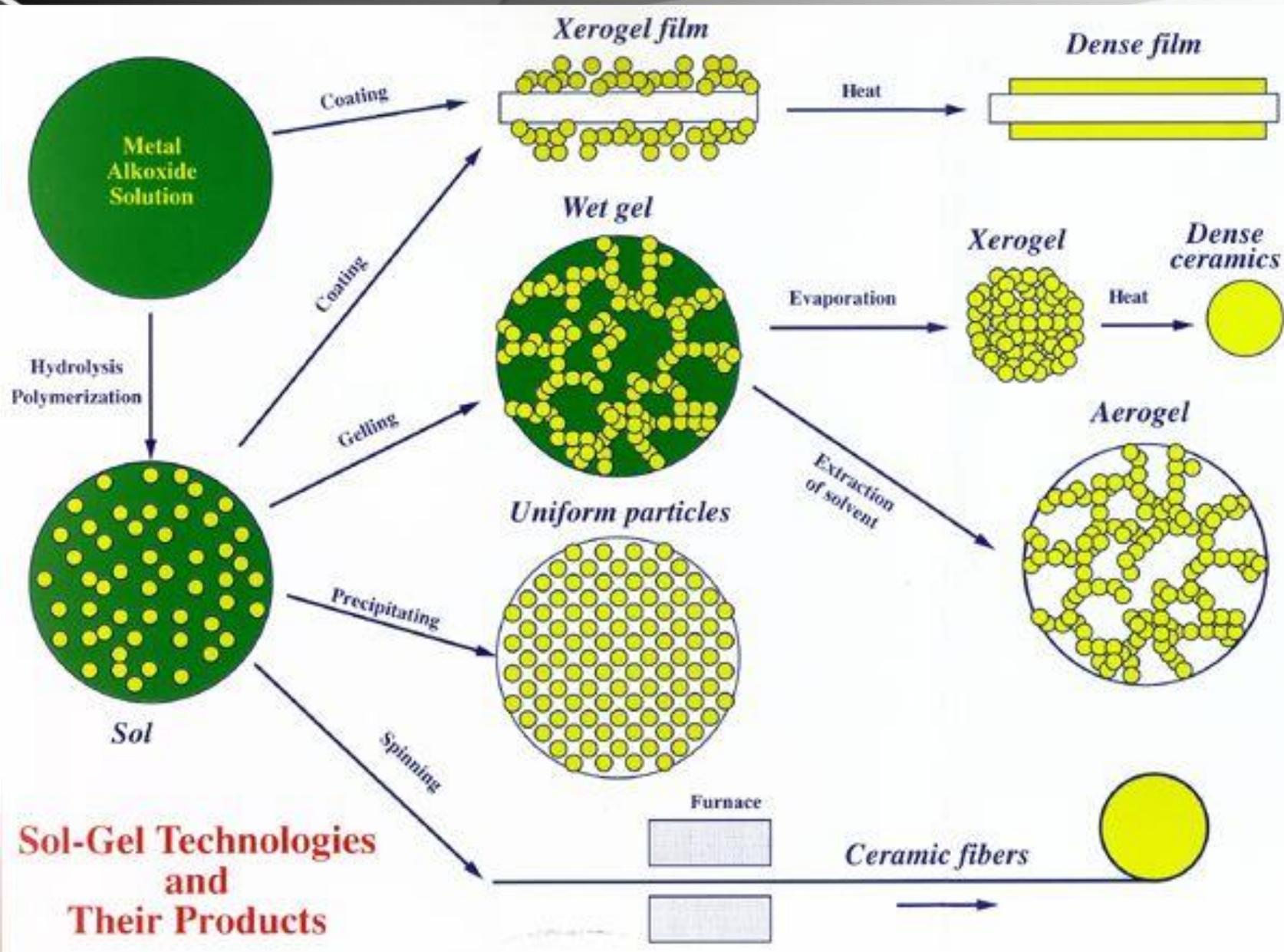
**Золь** (коллоидный раствор) — высокодисперсная коллоидная система с жидкой (лиоозоль) или газообразной (аэрозоль) дисперсионной средой, в объеме которой распределена другая (дисперсная) фаза в виде капелек жидкости, пузырьков газа или мелких твердых частиц, размер которых лежит в пределе от 1 до 100 нм.

**Гель** — структурированная система, представляющая собой пространственную сетку макромолекул, выступающую в роли каркаса, пустоты в которой заполнены дисперсионным веществом. Наличие трёхмерного полимерного каркаса (сетки) сообщает гелям механические свойства твёрдых тел (отсутствие текучести, способность сохранять форму, прочность и способность к деформации (пластичность и упругость)).



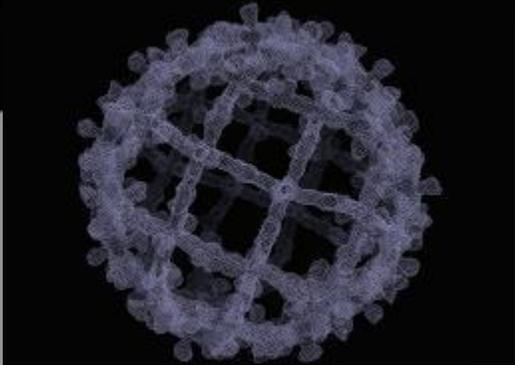
**Процесс золь-гель** (sol-gel process) — технология получения наноматериалов, включающая получение золя с последующим переводом его в гель.

# Золь-гель технологии



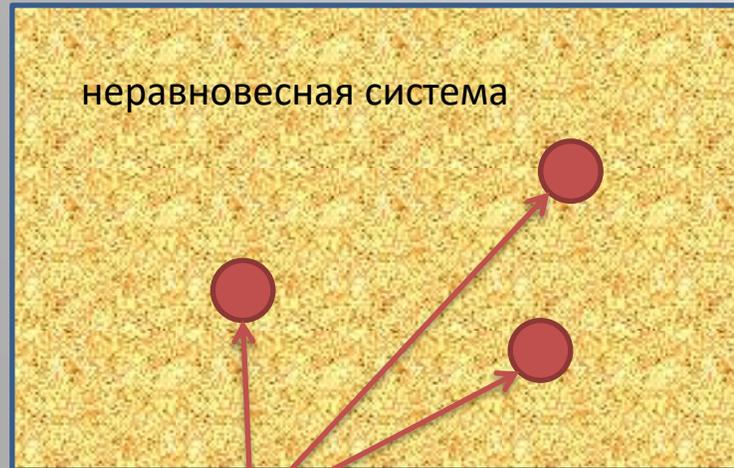
Алкоксилы –  $\text{CH}_3\text{O}$  или  $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ .  
Прекурсоры:  
тетраметилорисилан (ТМОС),  
тетраэторисилан (ТЭОС)

# Самосборка и самоупорядочение

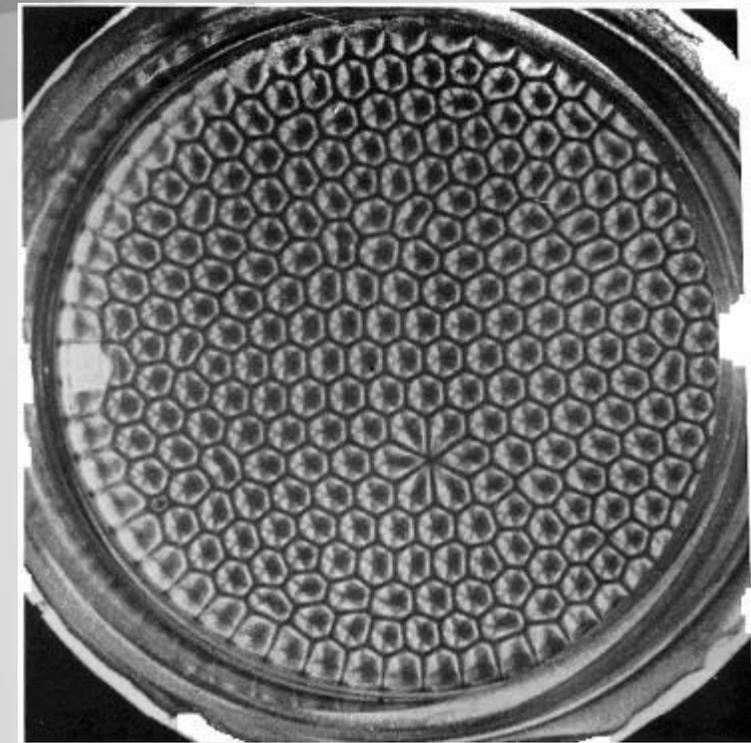


В нелинейной системе перестают быть справедливыми соотношения взаимности Онзагера, появляется анизотропия свойств, даже если в равновесном состоянии система была изотропна. Вдали от равновесия сами флуктуации определяют средние значения физических величин.

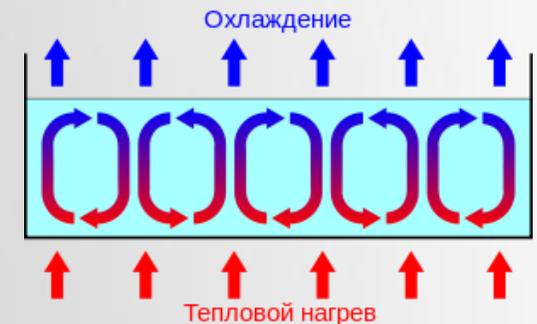
Спонтанная самоорганизация в объеме и на поверхности твердого тела – достаточно распространённое явление, приводящее к созданию регулярных массивов квантовых шнуров и квантовых точек. Наиболее часто встречается процесс спонтанной кристаллизации. Кристаллическое состояние вещества более устойчиво, чем аморфное, поэтому любая аморфная фаза имеет тенденцию к кристаллизации.



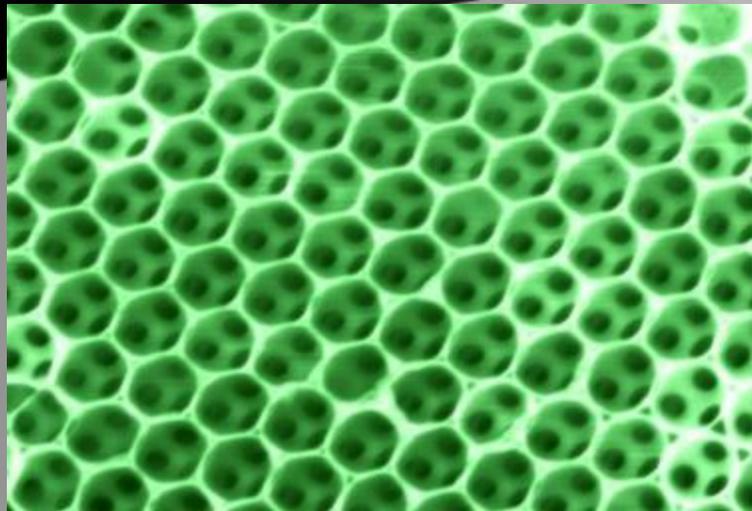
локальное равновесие



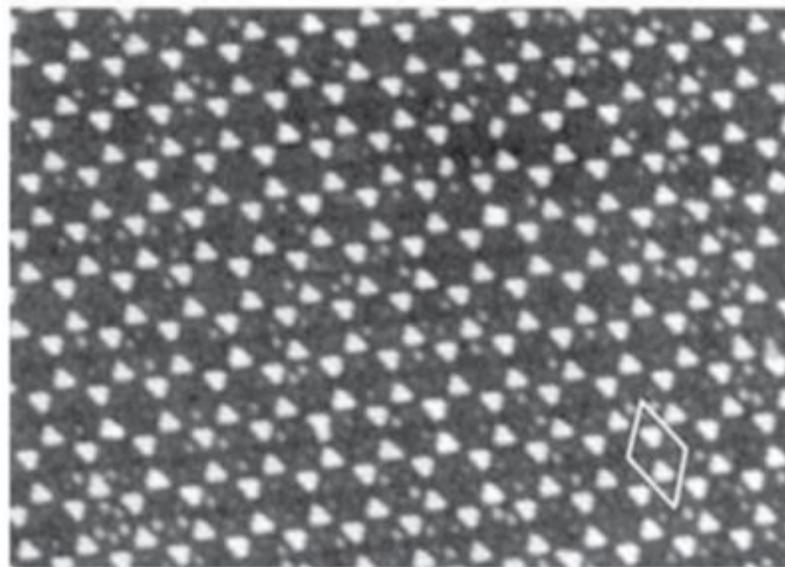
ячейки Бенара – максимальная скорость потока тепла



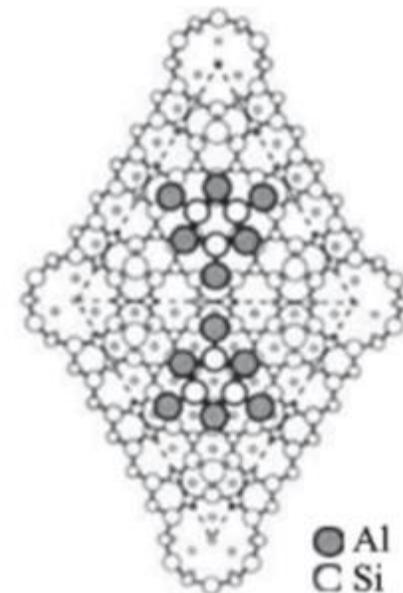
# Самосборка и самоупорядочение



инвертированный фотонный кристалл

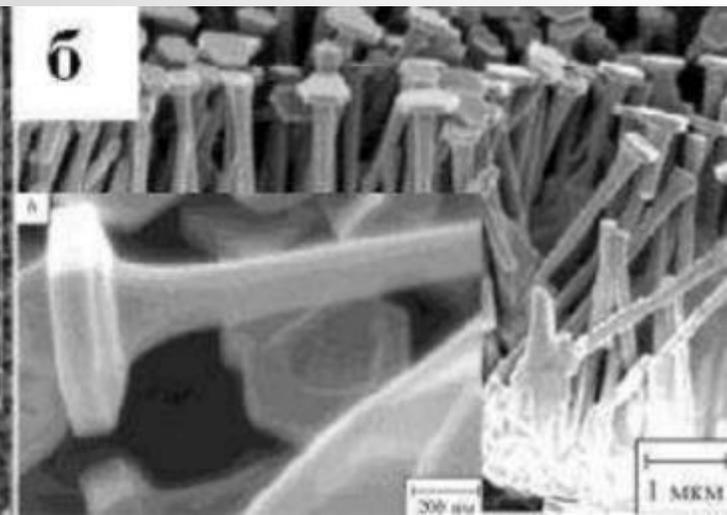
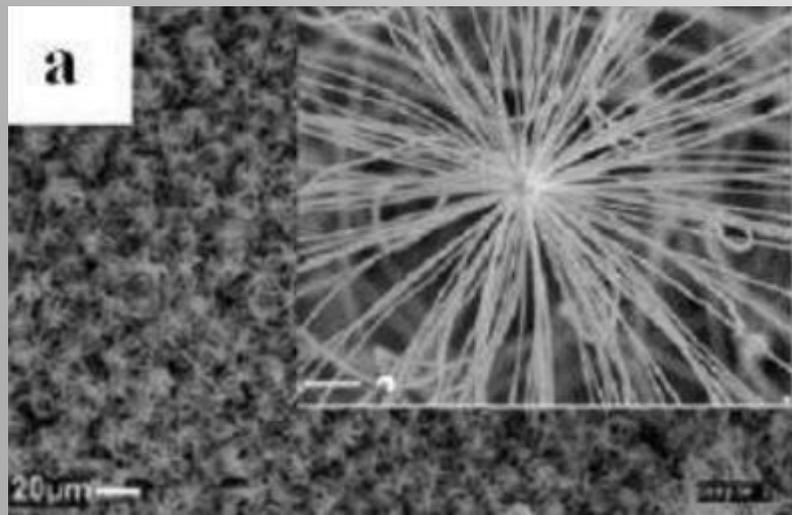
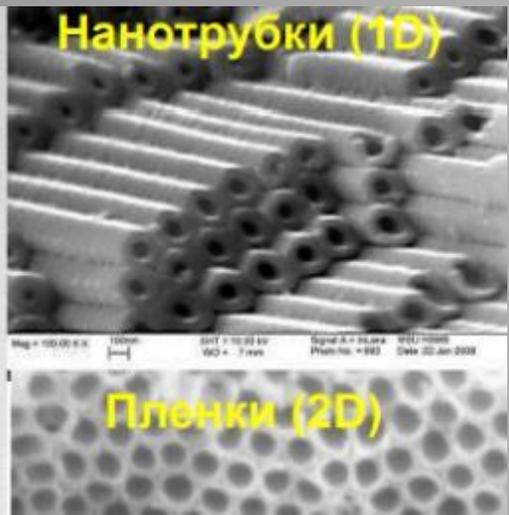
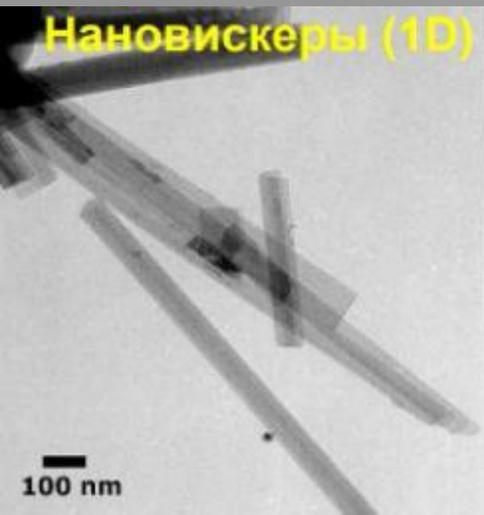


*a*



*б*

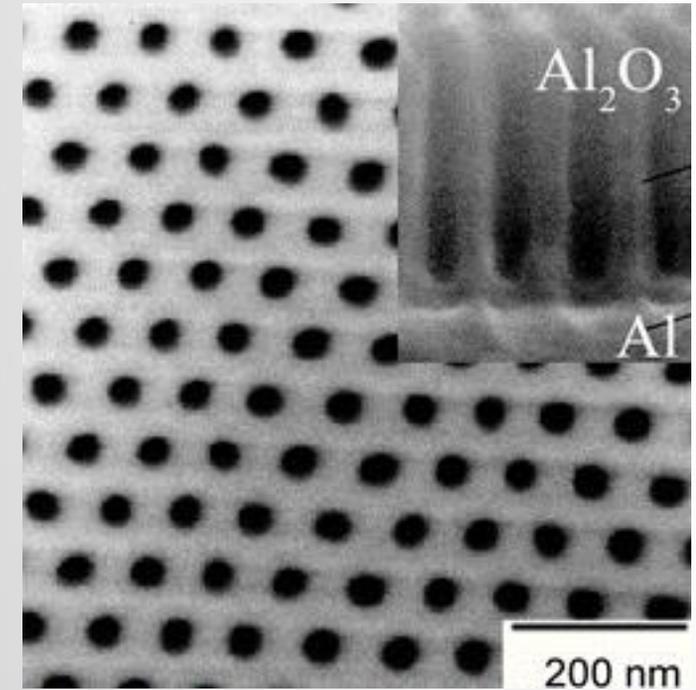
Массив нанокластеров алюминия на поверхности кремния (111) (а) и структура элементарной ячейки на поверхности кремния (б). Размер СТМ изображения 46.5 на 35 нм.



# Самосборка и самоупорядочение

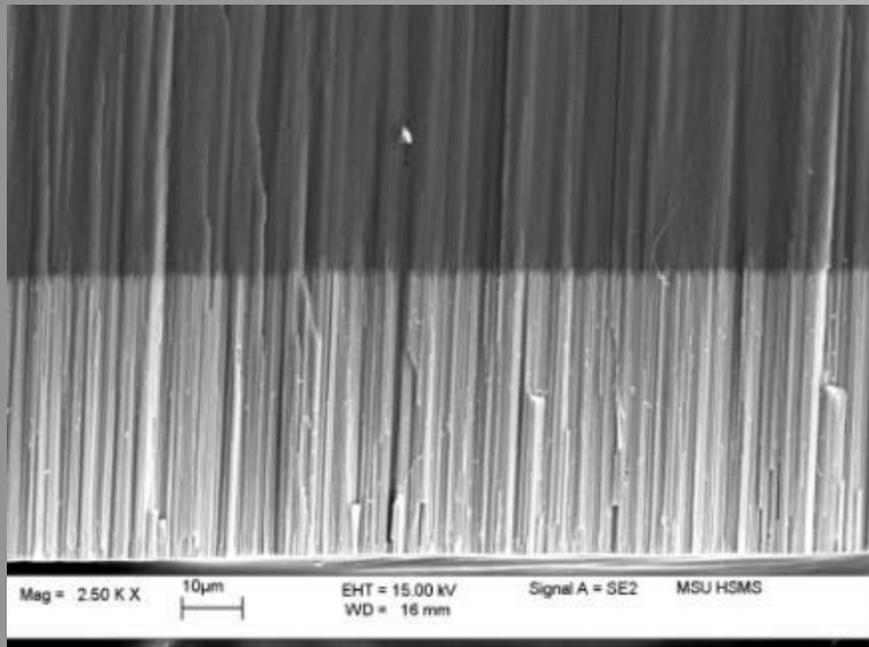
## Пористый оксид алюминия

Пористый анодный оксид алюминия (porous anodic alumina) обладает уникальной собственной структурой, позволяющей изготавливать из него столбиковые, нитевидные, точечные, конусообразные и другие элементы с нанометровыми размерами, которые невозможно получить и воспроизвести известными методами микрообработки (в частности, путем литографии).



Особенностями этой структуры являются:

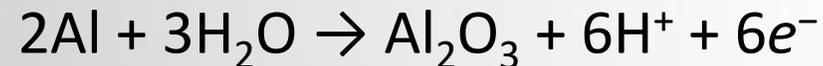
- упорядоченное по поверхности расположение гексагональных ячеек с цилиндрическими каналами пор внутри
- возможность управления размерами пор и ячеек в диапазоне от единиц до сотен нанометров
- ориентирование пор перпендикулярно поверхности
- значительная протяжённость пор (до 100 мкм)
- высокая воспроизводимость пористой матрицы в образцах с большой площадью поверхности и от образца к образцу.



# Самосборка и самоупорядочение

# Пористый оксид алюминия

Анодное окисление алюминия в общем виде описывается реакцией:



представляющей собой совокупность нескольких процессов, наиболее вероятным из которых является анодная ионизация алюминия на границе раздела металл / барьерная оксидная пленка:



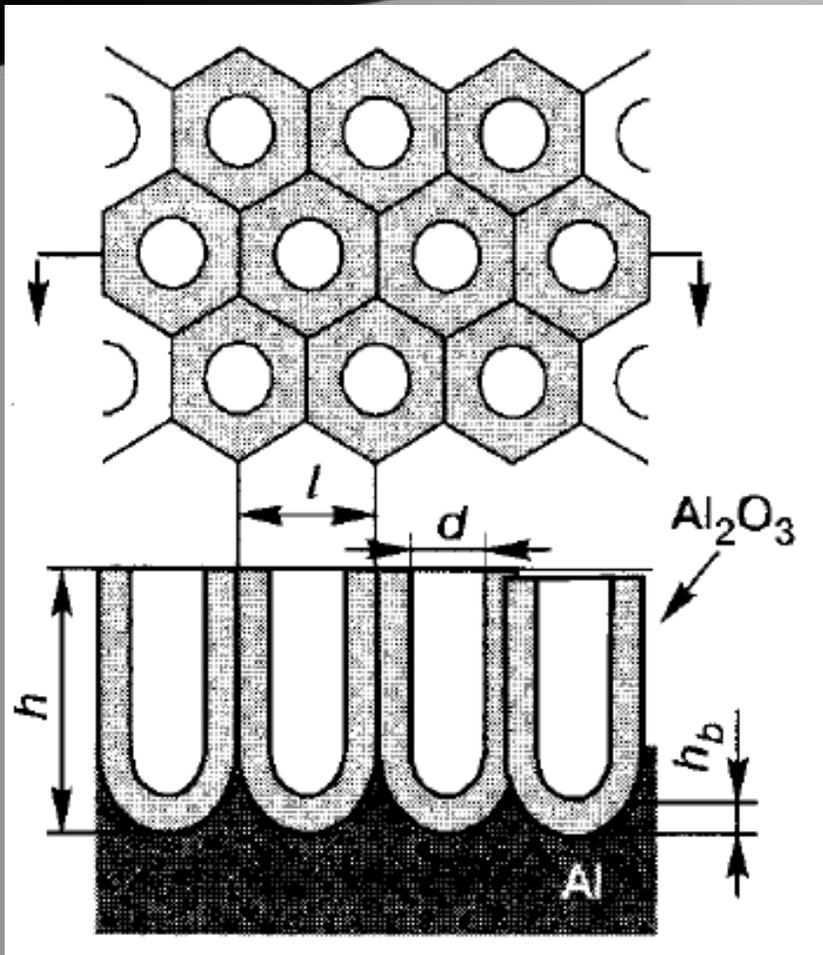
Образующиеся в процессе этой реакции электроны под действием приложенного напряжения уходят во внешнюю цепь. Ионы Al мигрируют в электрическом поле ионной решетки оксида к внешней поверхности барьерного слоя. На аноде:



$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{d}{l} \right)^2$$

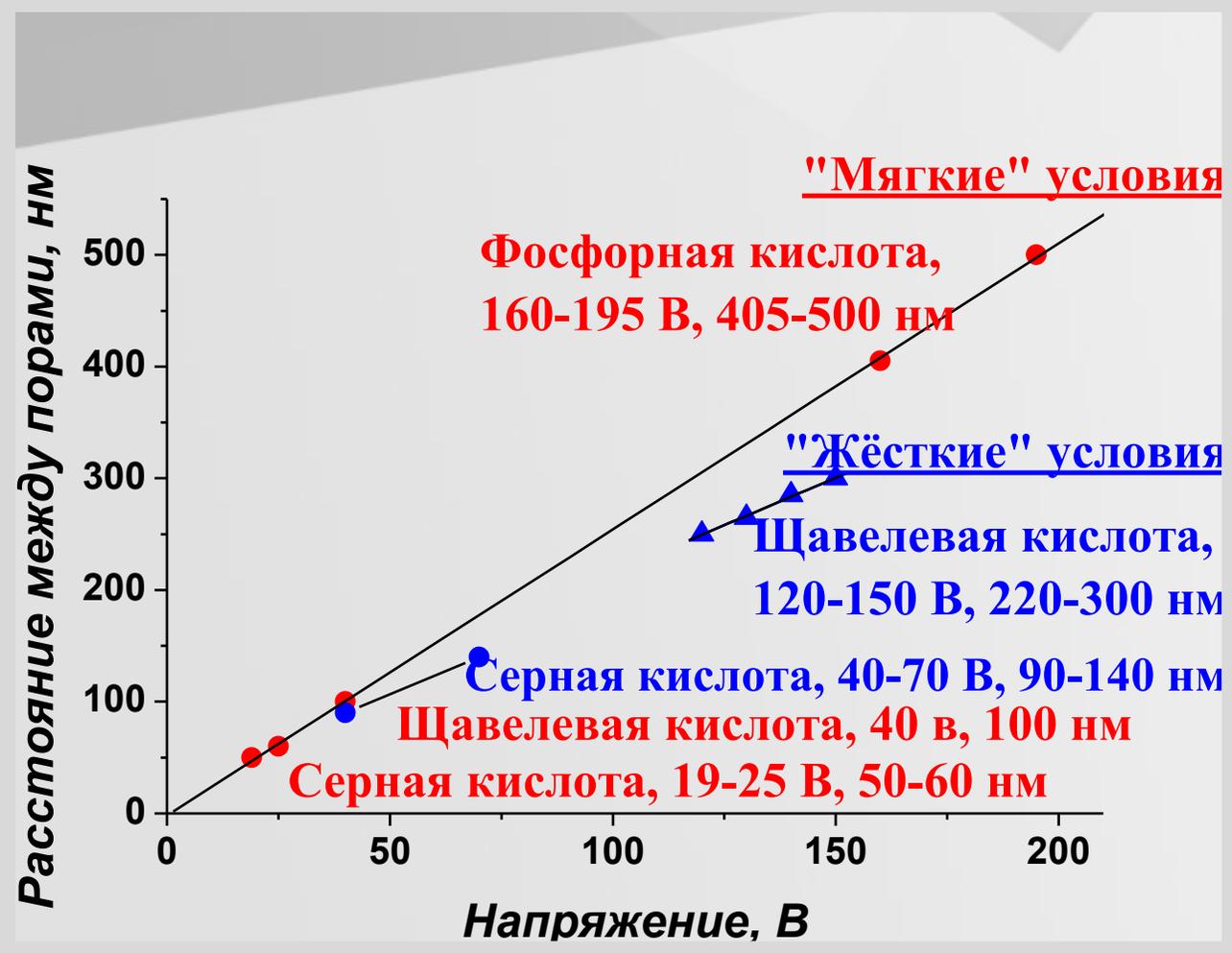
$P$  – пористость,  
 $d$  – диаметр пор,  
 $l$  – размер ячейки

В электролитах, слабо растворяющих оксид алюминия (рН 5.5), коэффициент формовки находится в пределах 1,0-1,5 нм/В.



# Самосборка и самоупорядочение

## Пористый оксид алюминия

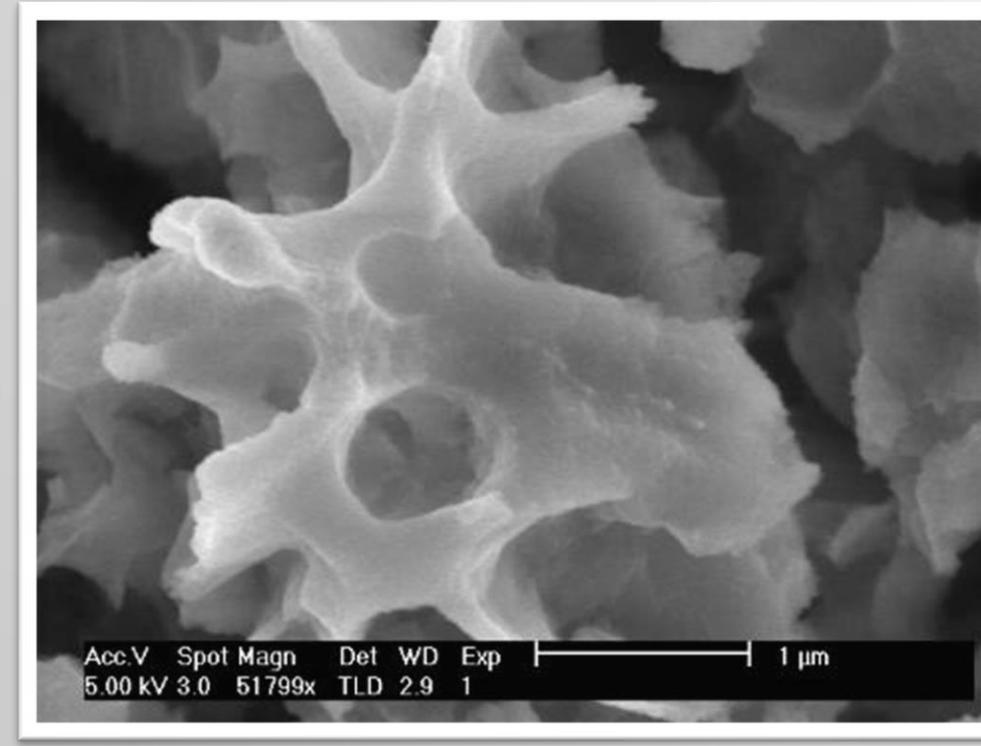
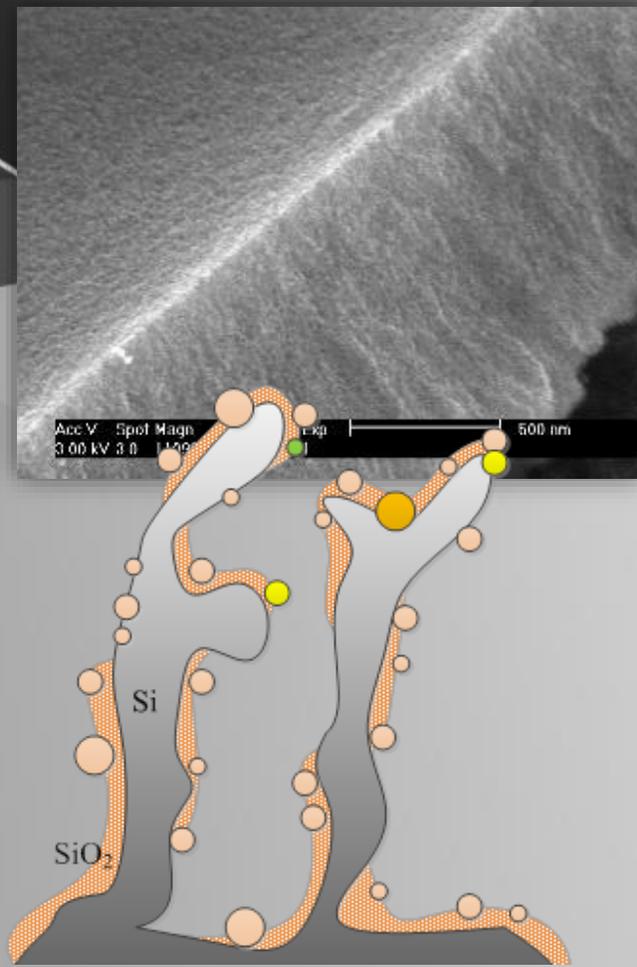
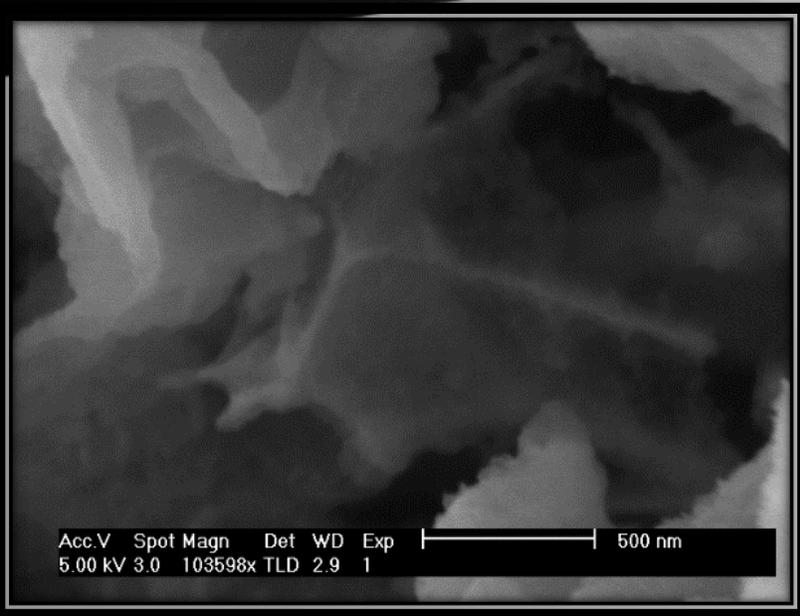


Преимущественный рост и растворение оксидного слоя на дне поры приводит к образованию на поверхности металла специфического рельефа из ячеек в виде полусфер. По мере протекания анодного окисления алюминия между уже имеющимися ячейками начинают образовываться новые, постепенно покрывая собой всю поверхность металла. Образование строго упорядоченной ячеистой структуры происходит путем перестройки самих ячеек в процессе их роста. При этом ячейки оксида алюминия самоорганизуются в правильную гексагональную структуру.

Выбор состава электролита и условий анодирования позволяет формировать пленки анодного оксида алюминия с упорядоченной пористой структурой толщиной до 100 мкм с размером ячеек в диапазоне 50-500 нм и диаметром пор 13-20 нм (серная кислота), 25-80 нм (щавелевая кислота), 100-250 нм (ортофосфорная кислота).

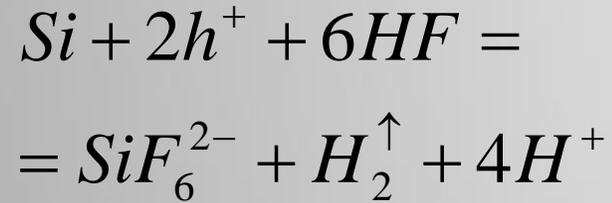
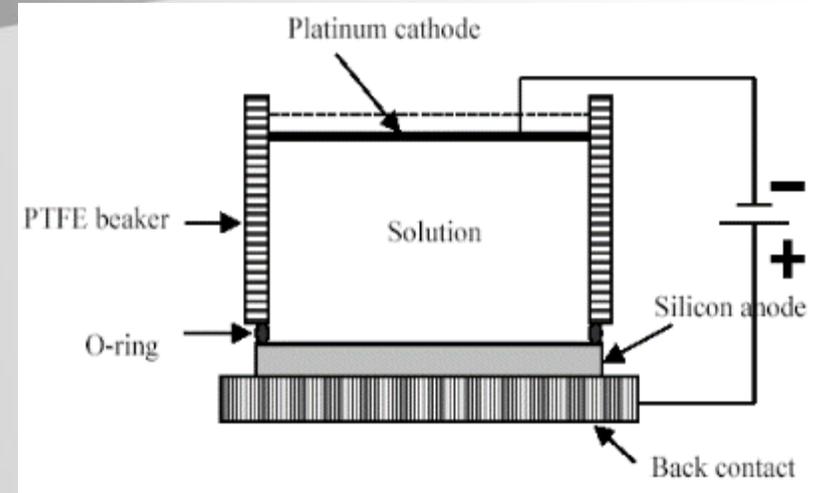
# Самосборка и самоупорядочение

## Пористый кремний



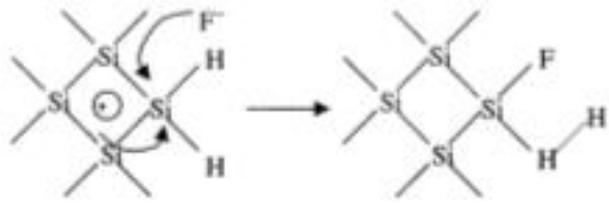
Свойства пористого слоя (его пористость, толщина, размер и структура пор) зависят как от характеристик собственно кремния, так и от условий анодирования. Наиболее важными факторами при этом являются: тип проводимости, удельное сопротивление и кристаллографическая ориентация кремния, а также концентрация HF в электролите, pH электролита, наличие в нем других соединений, температура, плотность анодного тока, освещенность анодируемой поверхности, перемешивание электролита и продолжительность обработки.

# Пористый кремний

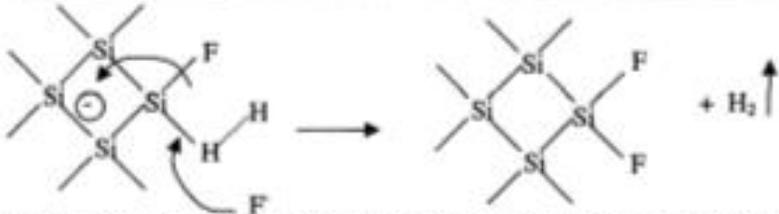


Кремний представляет собой один из немногих материалов полупроводниковой электроники, в котором возможно формирование наноразмерных пор.

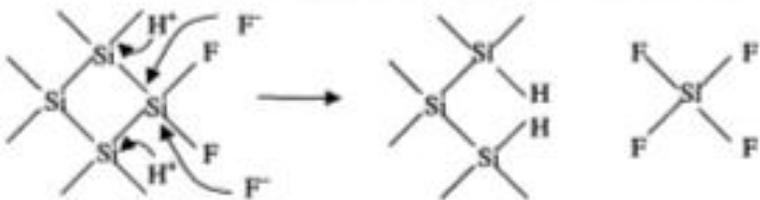
Локальное электрохимическое растворение кремния в электролитах на основе HF предполагает дырочно-электронный обмен.



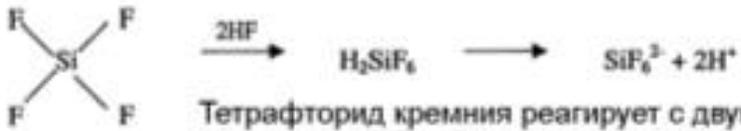
Инжекция дырки и атака связи H-Si ионом фтора



Атака второго иона фтора с восстановлением водорода и переходом электрона в подложку



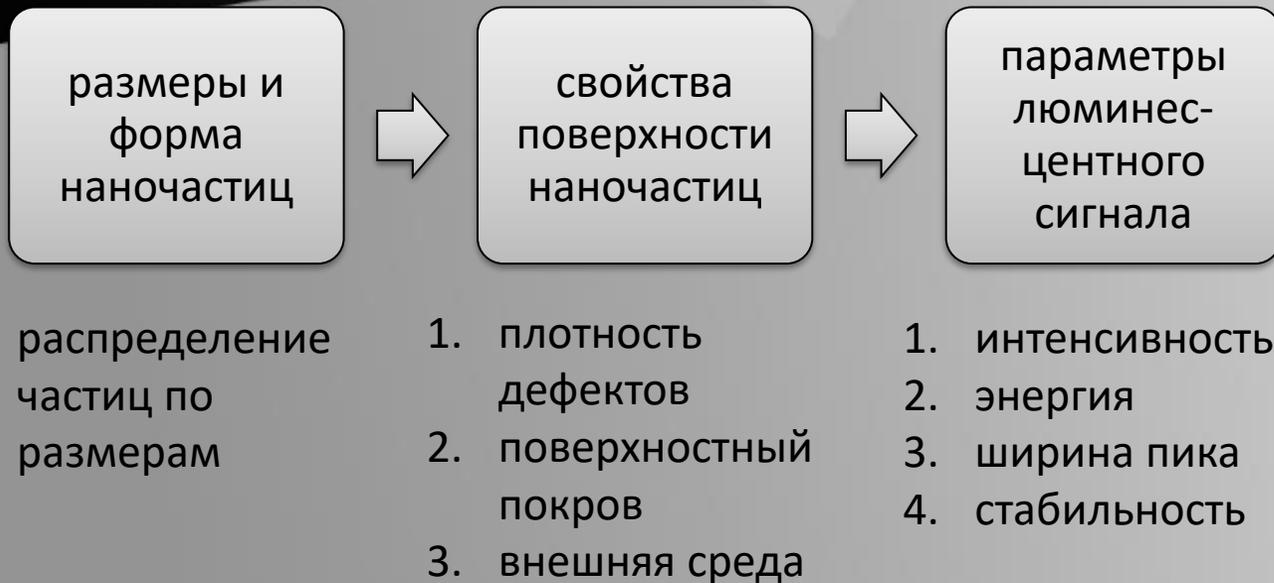
HF разрывает связь Si-Si. Атомы подложки соединяются с атомами водорода. Образуется молекула тетрафторида кремния.



Тетрафторид кремния реагирует с двумя молекулами HF, образуется растворимая в воде кислота  $H_2SiF_6$

# Кремниевые наночастицы

## Свойства поверхности



Методом ИК-спектроскопии в наноструктурах кремния детектируется наличие различных  $\text{Si-H}_x$  и  $\text{Si-OH}$  групп, т. е. обычно имеется *водородная пассивация* поверхности нанокристаллитов.

Изначально водородная или частично водородная пассивация поверхности нанокластеров при воздействии высоких температур, влажности или присутствия окислителей (например, озона или активных форм кислорода) приводит к окислению кремния и смене пассивации поверхности. В свою очередь, окисленная поверхность кристаллитов приводит к уменьшению их среднего размера, что влечёт за собой изменение их физических свойств.

Удаление водорода с поверхности нанокластеров приводит к росту вероятности безызлучательной рекомбинации и, соответственно, к уменьшению интенсивности люминесценции. Наблюдается «красный сдвиг» полосы фотолюминесценции и уменьшение её интенсивности.

# Нанокластеры



*структурные:*

**ГЦК решётка:** правильный 12-вершинный многогранник:

$$N = \frac{1}{3}(10n^3 + 15n^2 + 11n + 3)$$

$$N_s = 10n^2 + 20n + 12$$

минимальное плотноупакованное ядро ( $n=1$ ) содержит 13 атомов

$N = 13, 55, 147, 309, 561, 923, 1415, 2057, 2869$ , и т. д.

**ГПУ решётка:** гексагональная плотноупакованная

$N = 1, 13, 57, 153, 321, 581$ , и т. д.

*электронные:*

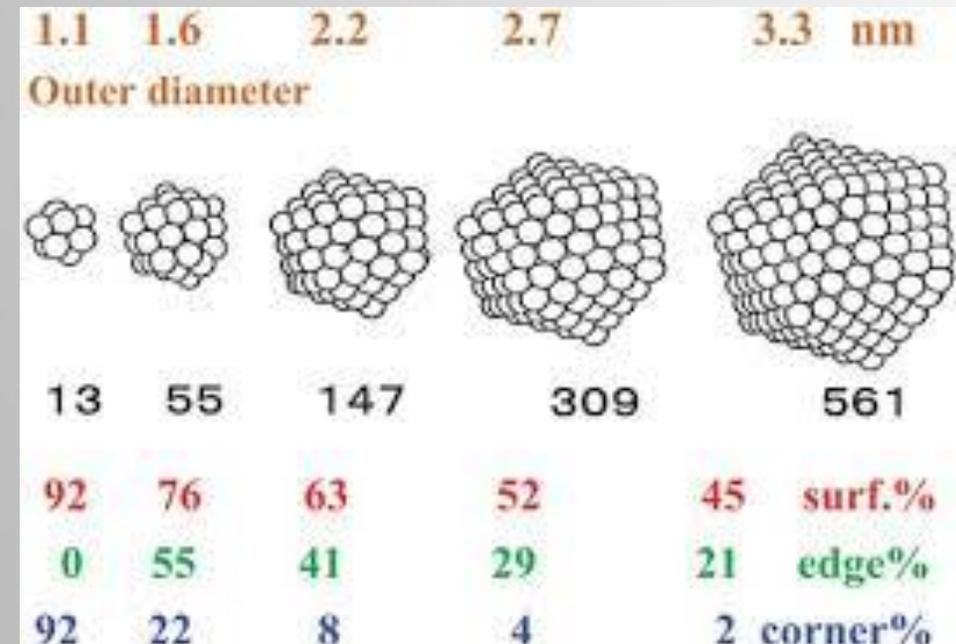
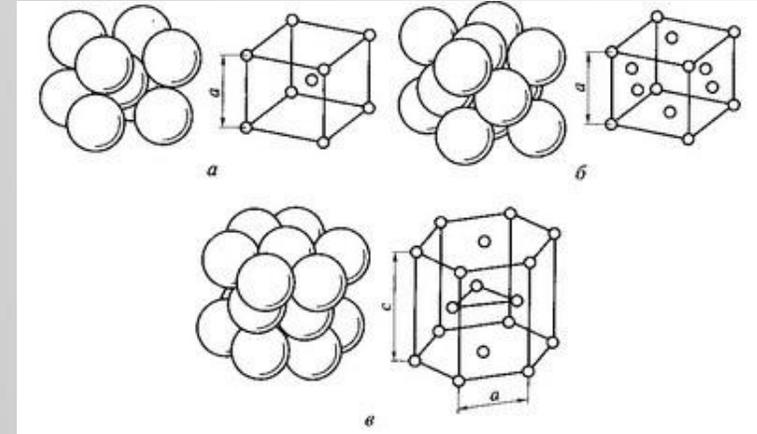
**кластеры натрия:**

$N = 2, 8, 20, 40, 58, \dots, 1220$  электронные, далее – структурные.

**расчётные (jellium model):**

$N = 8, 18, 20, 34, 40, 58, 68, 90$

## Магические числа

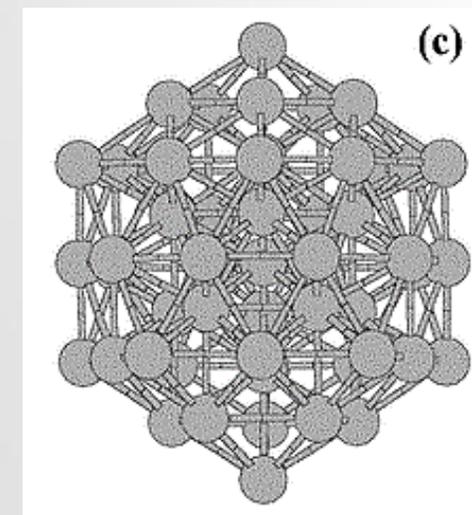
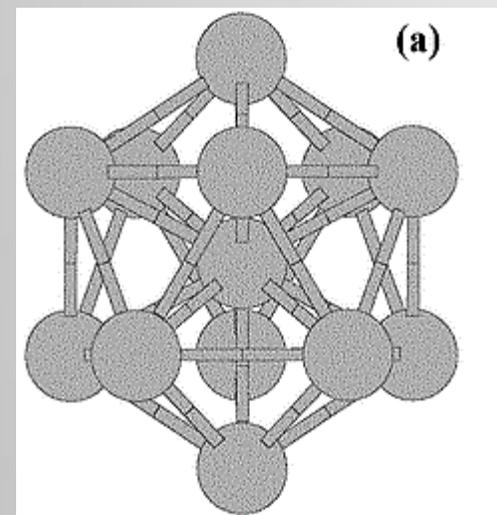
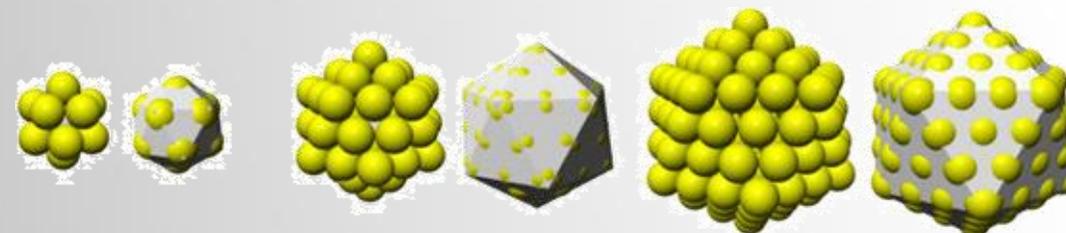


**Table 2.1. Number of atoms (structural magic numbers) in rare gas or metallic nanoparticles with face-centered cubic close-packed structure<sup>a</sup>**

Shell Number	Diameter	Number of FCC Nanoparticle Atoms		
		Total	On Surface	% Surface
1	$1d$	1	1	100
2	$3d$	13	12	92.3
3	$5d$	55	42	76.4
4	$7d$	147	92	62.6
5	$9d$	309	162	52.4
6	$11d$	561	252	44.9
7	$13d$	923	362	39.2
8	$15d$	1415	492	34.8
9	$17d$	2057	642	31.2
10	$19d$	2869	812	28.3
11	$21d$	3871	1002	25.9
12	$23d$	5083	1212	23.8
25	$49d$	$4.90 \times 10^4$	$5.76 \times 10^3$	11.7
50	$99d$	$4.04 \times 10^5$	$2.40 \times 10^4$	5.9
75	$149d$	$1.38 \times 10^6$	$5.48 \times 10^4$	4.0
100	$199d$	$3.28 \times 10^6$	$9.80 \times 10^4$	3.0

<sup>a</sup>The diameters  $d$  in nanometers for some representative FCC atoms are Al 0.286, Ar 0.376, Au 0.288, Cu 0.256, Fe 0.248, Kr 0.400, Pb 0.350, and Pd 0.275.

## Магические числа



# Нанокластеры

## Капиллярная модель формирования

Теория капиллярного приближения:

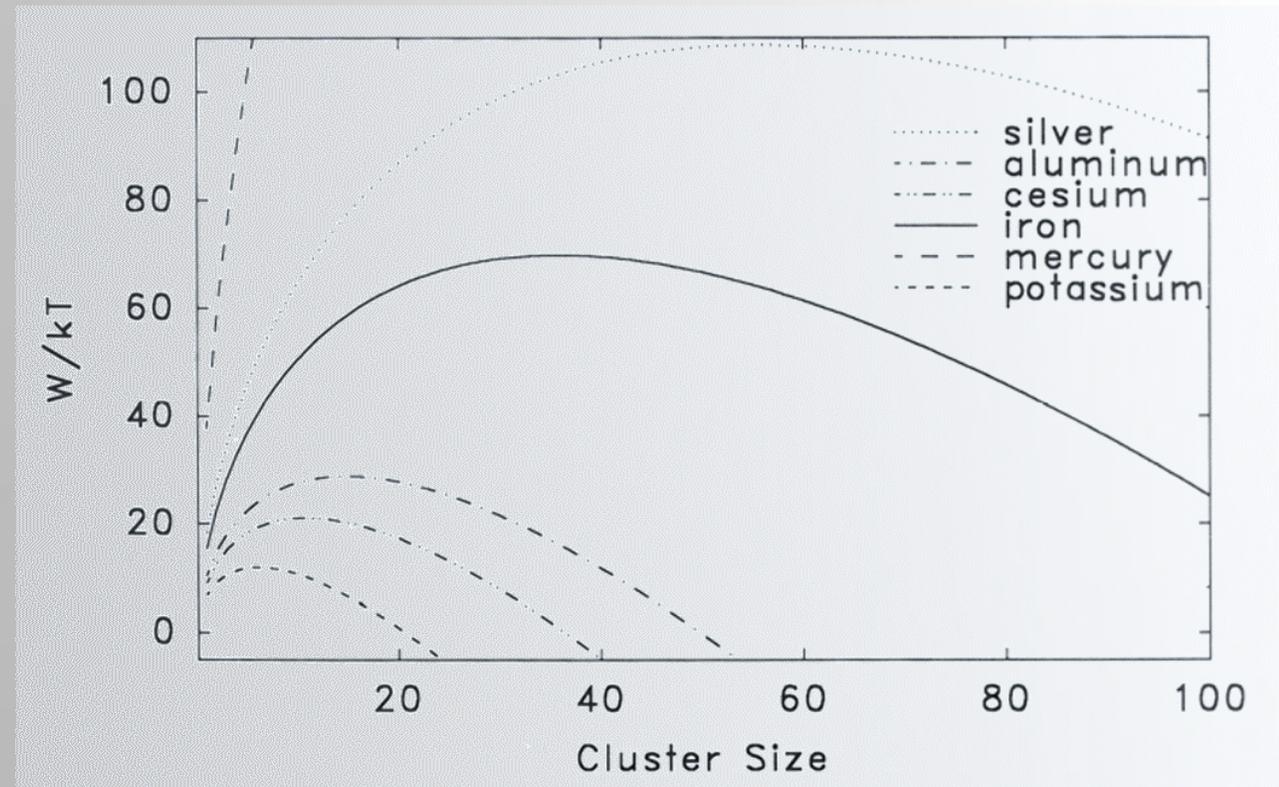
Зарождающиеся кластеры ведут себя как сферические жидкие капли, находящиеся в атмосфере пересыщенного пара.

Свободная энергия формируемого кластера

$$E(n) = 4\pi\sigma \left(\frac{3v}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}} n^{2/3} - nkT \cdot \ln S; \quad S = \frac{P}{P_e}$$

Свободная поверхностная энергия (первое слагаемое) является результатом формирования поверхности раздела фаз между каплями жидкости и газом.

Свободная объёмная энергия (второе слагаемое) определяется разностью энергии пересыщенного пара и жидкости ( $S$  – степень пересыщения).



Зависимость свободной энергии от размера частиц для различных металлических кластеров ( $P = 0,5$  Torr)

# Нанокластеры

Условия равновесия:  $\frac{dE}{dn} = 0$

Число атомов в кластере минимального размера:

$$n^* = \frac{32\pi\sigma^3 v^2}{3(kT \cdot \ln S)^3}$$

Радиус кластера минимального размера:

$$r^* = \frac{2\sigma v}{kT \cdot \ln S}$$

$r^*$  носит название критического размера кластера или зародыша, причем кластеры с меньшим размером термодинамически неустойчивы.

## Капиллярная модель формирования

Образование поверхности зародышей требует совершения над системой работы, в то время как формирование кристаллического объема зародышей высвобождает энергию в системе. Зарождение кристаллических кластеров с радиусом меньше и больше критического требует меньшего изменения свободной энергии, чем для кластера критического размера – кластер в таких условиях оказывается нестабильным и распадается.

Данная классическая теория зародышеобразования, разработанная в 40-х годах XX века, с успехом используется и сейчас для описания процессов формирования нанокластеров из газовой атмосферы. С некоторыми допущениями она может быть использована и используется для описания процессов кристаллизации из растворов.

Спасибо за внимание!

