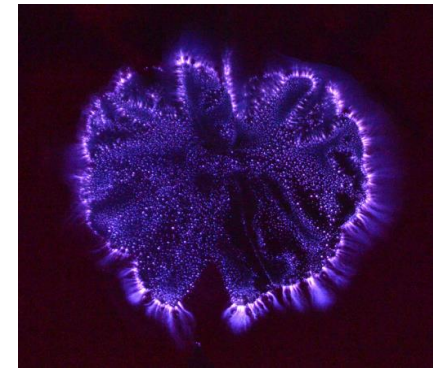


# Лекция 3

## Создание тонких плёнок



# Основные технологические процессы

- **Подготовка подложек**

Стандартный метод: очистка ультразвуком в изопропиловом спирте (сушка от спирта – в потоке азота).

- **Создание вакуума**

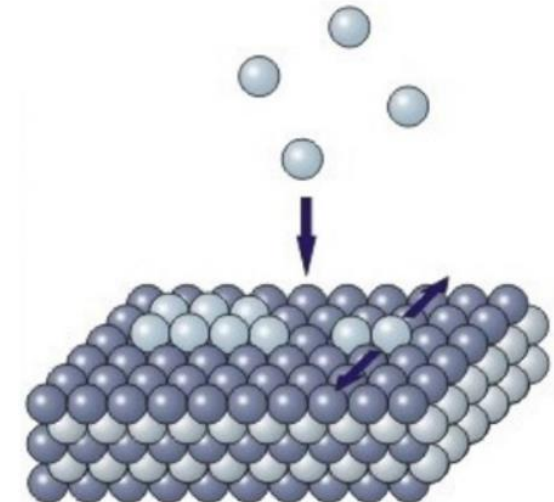
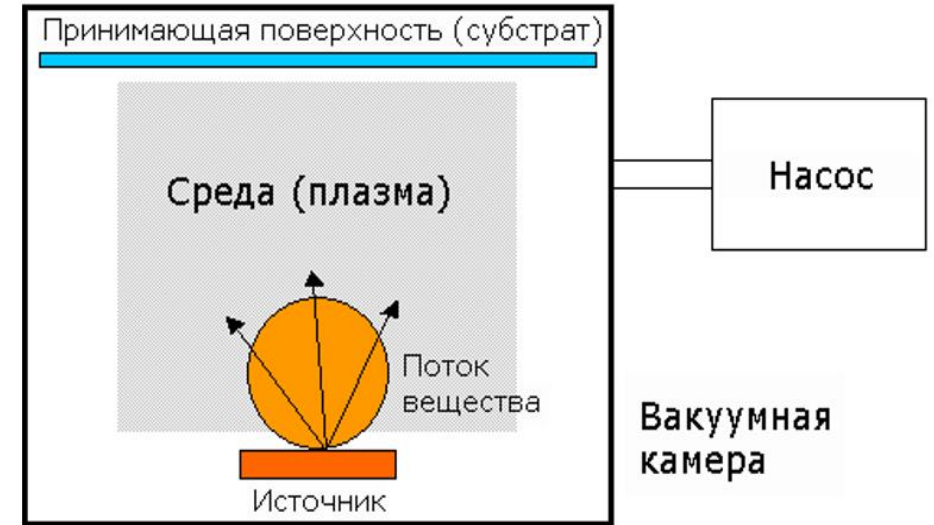
Многие процессы напыления плёнок проходят в вакууме или же используют предварительную откачку для очистки от частиц воздуха.

- **Создание плазмы**

Плазма представляет собой слабо ионизированный газ, состоящий из смеси стабильных и возбуждённых атомов и молекул, а также продуктов диссоциации молекул, электронов и ионов.

- **Эпитаксия** – процесс наращивания монокристаллического материала на монокристалл-подложку.

В результате образуется новая фаза, которая закономерно продолжает кристаллическую решётку подложки.



# Типы эпитаксиальных процессов

- **Автоэпитаксия** (гомозэпитаксия) – процесс ориентированного наращивания кристаллического вещества, **одинакового по структуре и не отличающегося химически от вещества подложки**
- **Гетерозэпитаксия** – процесс ориентированного наращивания вещества, **которое отличается по химическому составу от вещества подложки, но подобного ему по структуре.**
- **Хемозэпитаксия** – процесс ориентированного нарастания вещества, в результате которого образование новой кристаллической фазы – **хемозэпитаксиального слоя** - происходит за счёт **химического взаимодействия вещества подложки с веществом, поступающим из исходной фазы.**
- **Реотаксия** – ориентированное наращивание кристаллического слоя в условиях, близких к равновесным, *на подложке как на механическом носителе*

# Основное правило, определяющее возможность эпитаксии

- Эпитаксия может происходить только при наличии у срастающихся веществ двух *параллельных плоских решёток*, имеющих ячейки одинаковой или почти одинаковой формы с близкими периодами.

предельное отклонение периодов решёток обычно не превышает 15%, иначе невозможно ориентированное наращивание

**Мерой несоответствия периодов** считается величина, которая определяется формулой:

$$\Delta a = [(a_c - a_p) / a_c] \cdot 100\%$$

где  $a_c$  и  $a_p$  – величины периодов плоских решёток слоя и подложки

# Эпитаксиальные процессы

- *Эпитаксиальные процессы* можно разделить также по химическому состоянию вещества в период переноса от внешнего источника к подложке.



- **Прямые процессы** – вещество переносится к подложке без промежуточных реакций.
- **Непрямые процессы** – при переносе вещества от источника к подложке происходят химические превращения.
- **Реактивное распыление** – введение в среду реакционноспособного газа, который меняет свойства плёнок.

# Механизм испарения

- Схема испарения «твёрдая фаза – парообразная фаза» называется **возгонка** или **сублимация**.
- Существует так же вторая схема испарения: «твёрдая фаза – жидкая фаза – парообразная фаза.»

**Состояние динамического равновесия** достигается, когда число молекул, покидающих испаряемое вещество за некоторое время, равно числу молекул, возвращающихся обратно.

Пар в состоянии динамического равновесия называется **насыщенным**.

**Термодинамическое равновесие** – состояние системы в условиях изолированности от окружающей среды, при котором остаются неизменными во времени макроскопические величины: температура, давление, объём, энтропия.

**Плазмотрон** – устройство, генерирующее плазму.

**Тлеющий разряд** – один из видов стационарного самостоятельного электрического разряда в газах.

## Диаграмма методов получения пленок

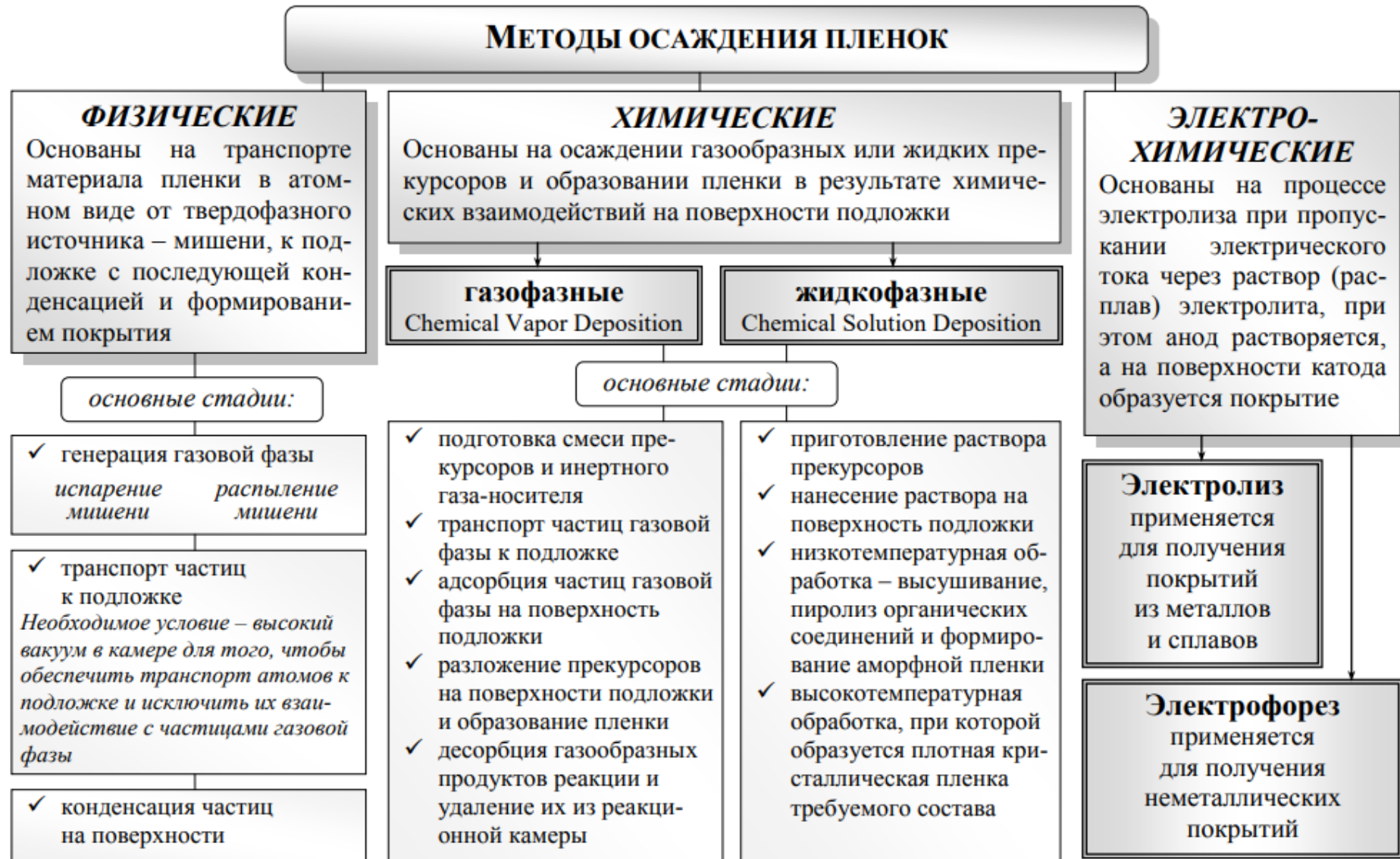
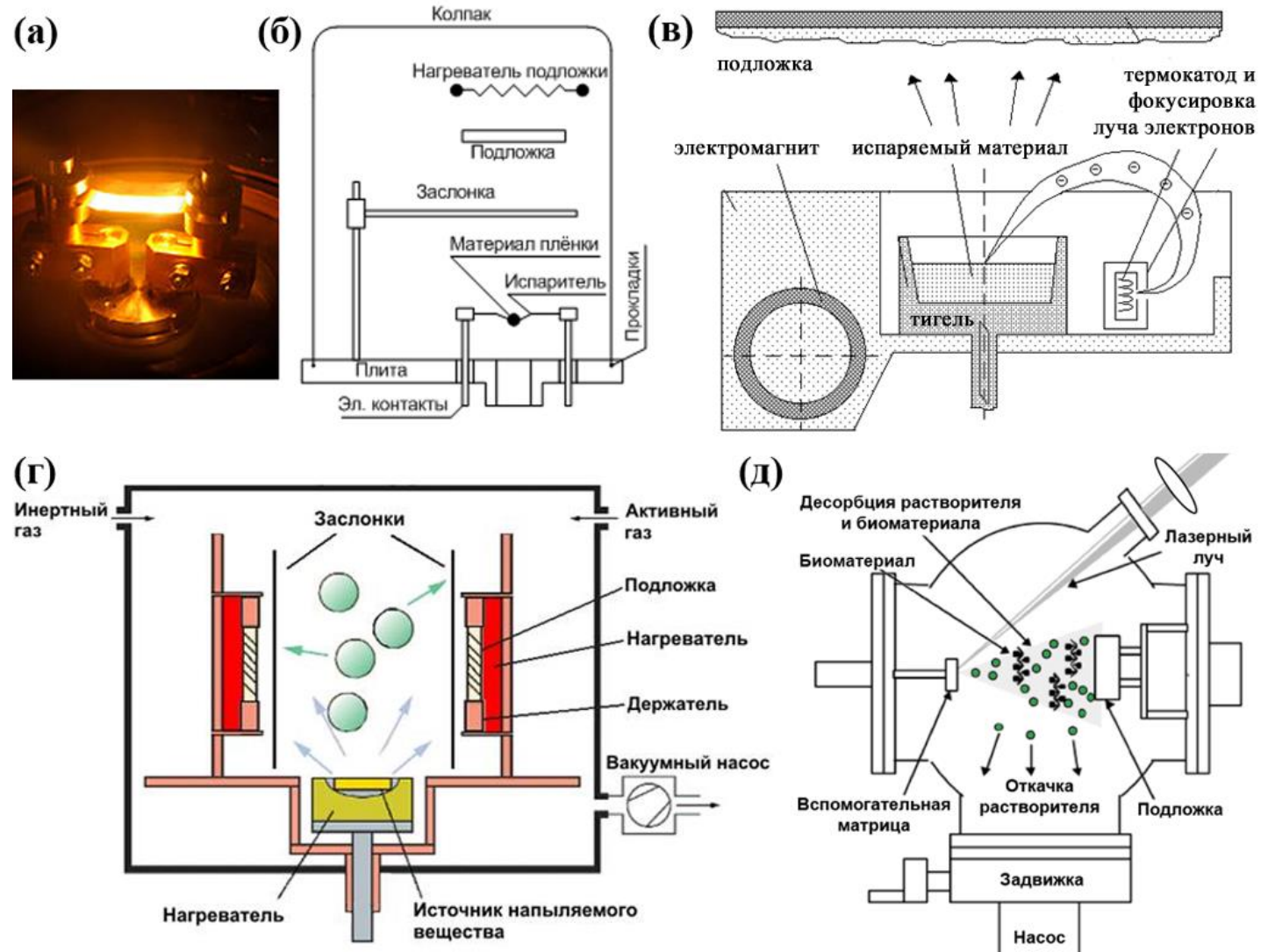


Рис.5.1.

# 1. Термовакuumное испарение

- Резистивный нагрев
- Электронно-лучевой нагрев
- Индукционный нагрев
- Лазерная абляция
- Нагрев горением

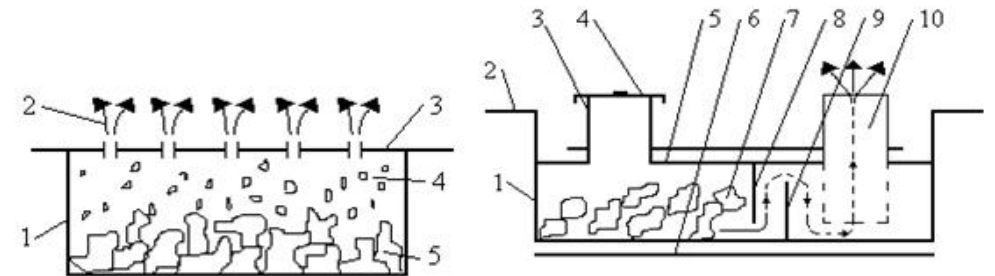
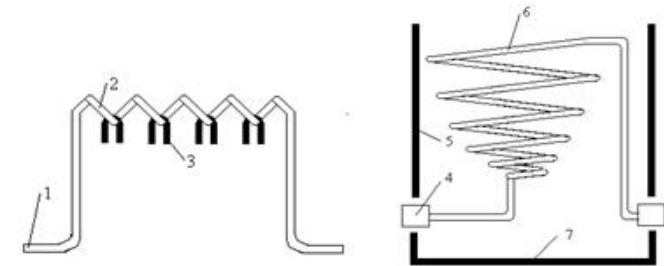
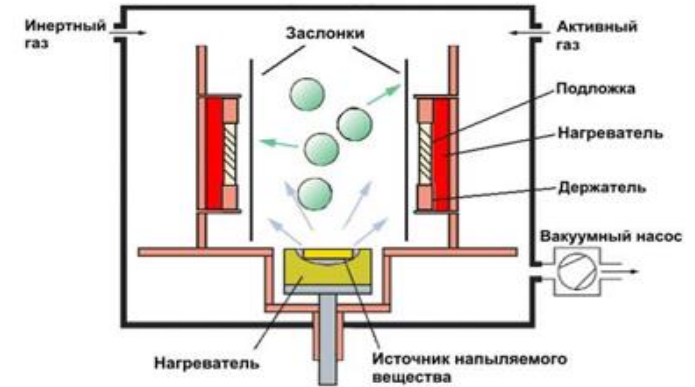


испарители  
с непосредственным нагревом  
с косвенным нагревом



# Испарители с косвенным нагревом

- **Проволочные испарители** – испарение веществ, которые смачивают материал нагревателя-проволоки
- **Ленточные испарители** – испарение веществ, которые плохо удерживаются на проволочных испарителях.
- **Лабиринтные испарители** обеспечивают эффективную защиту от разбрызгивания капель, которым сопровождается процесс испарения некоторых веществ – т.н. взрывное испарение, выпускают только пар
- **Тигельные испарители** используют для испарения больших количеств сыпучих диэлектрических материалов.

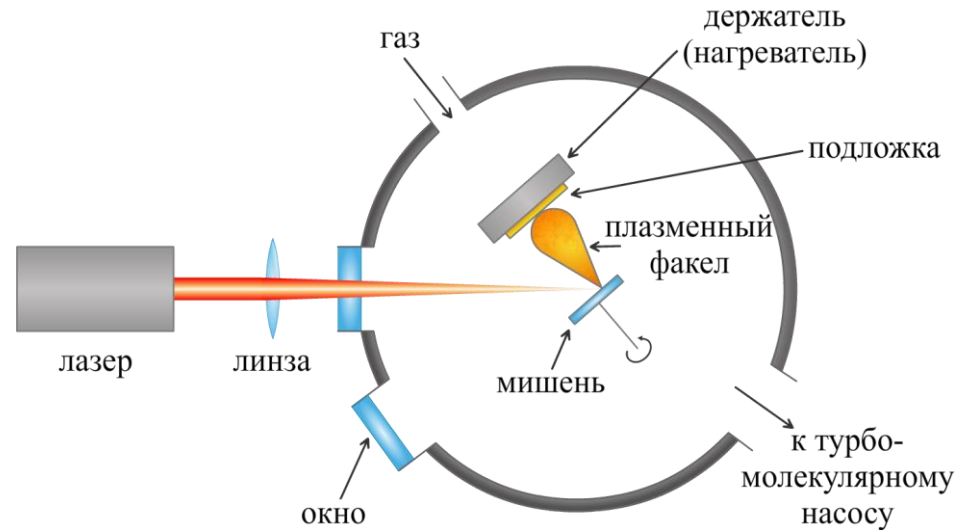


## 2. Взрывные методы

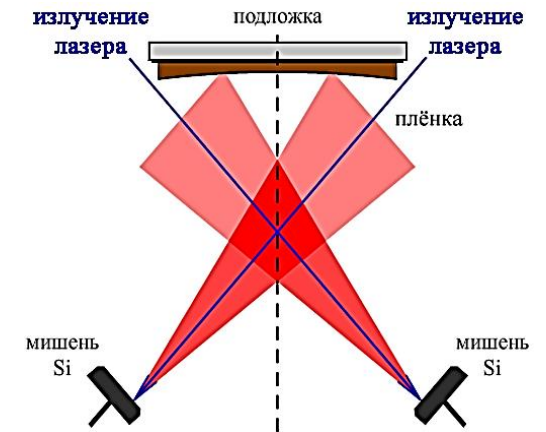
Катодно-дуговое осаждение (Arc-PVD)  
или плазмодуговое распыление



Лазерно-взрывная эпитаксия (ЛВЭ)



Метод встречных пучков



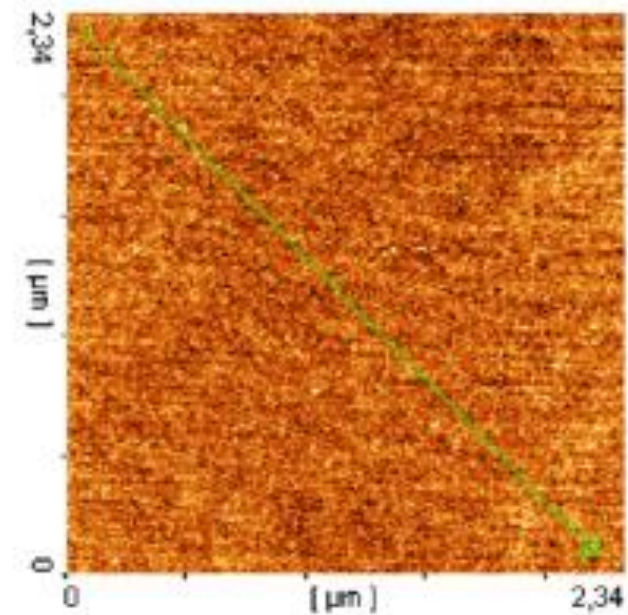
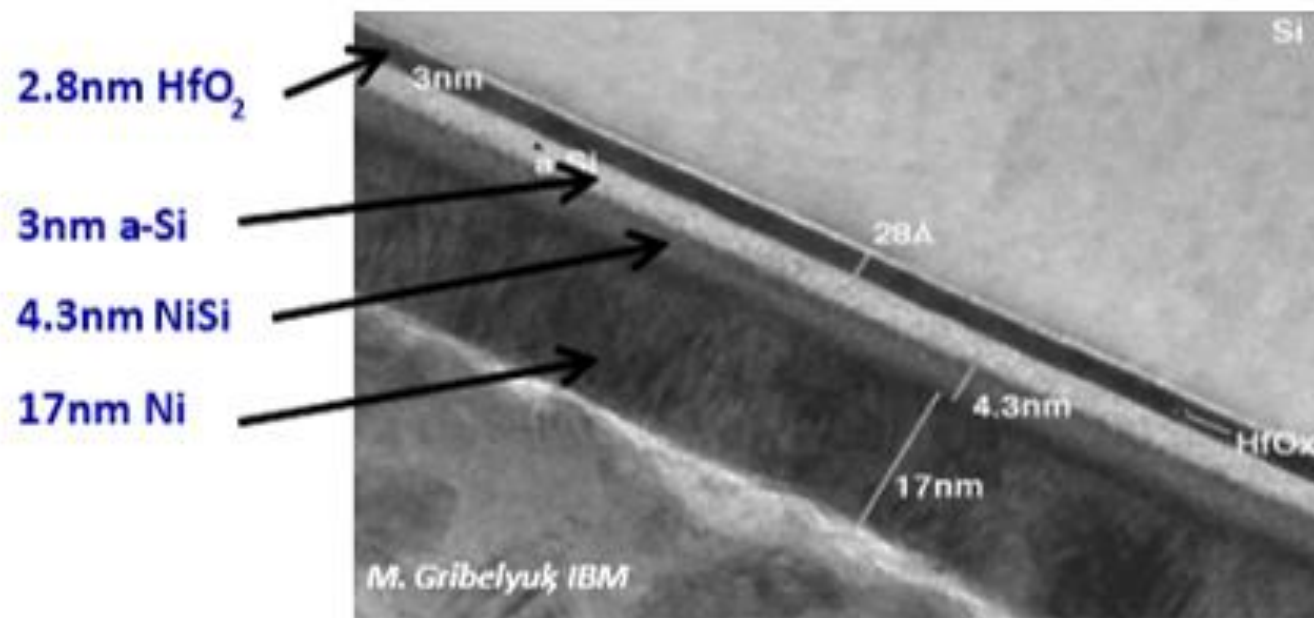
Преимущества ЛВЭ:

возможность испарять любые материалы,

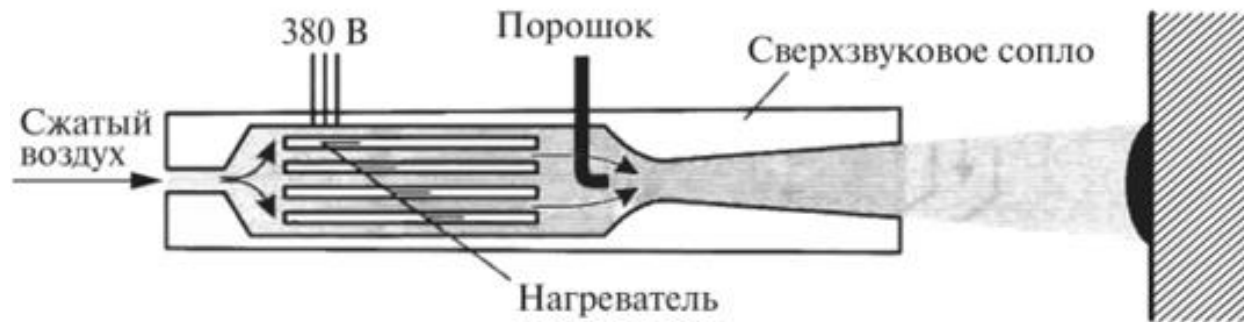
высокая мгновенная скорость роста плёнки до 10 нм/с,

резкая гетерограница между частицами и подложкой из-за быстрого охлаждения.

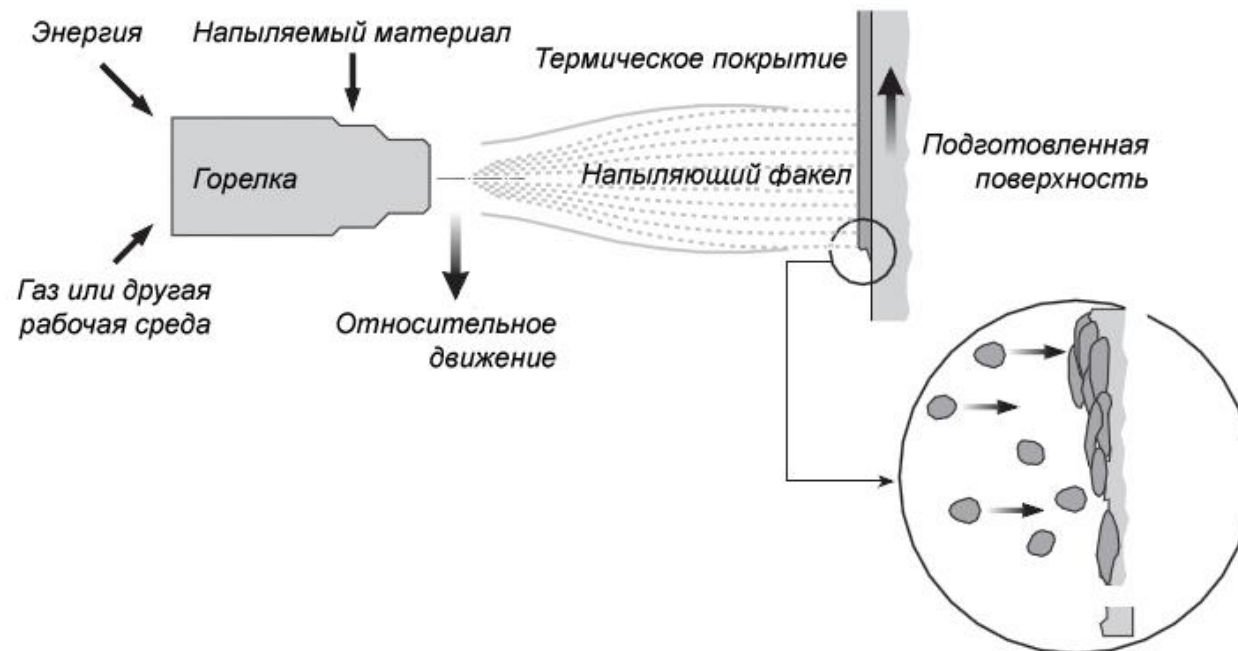
АСМ изображение плёнки кремния без капель, толщиной 150 нм, с шероховатостью 0,5 нм.

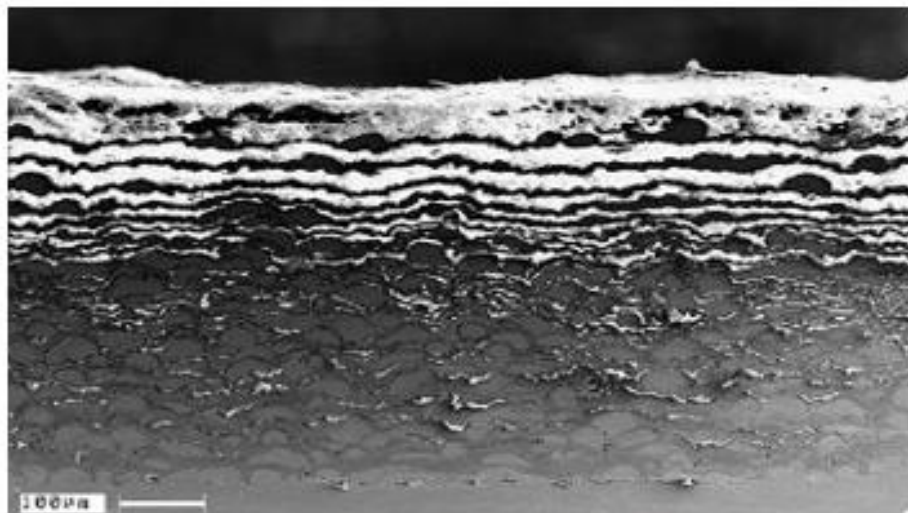


## Газодинамическое напыление

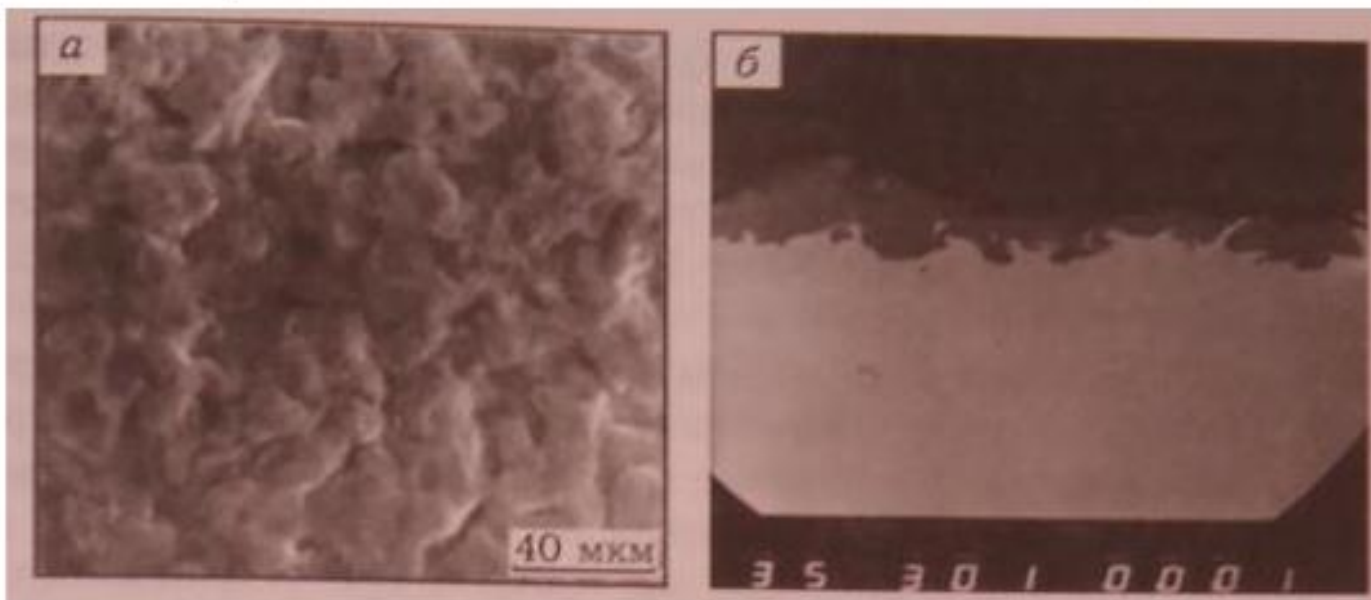


## Газотермическое или газопламенное напыление



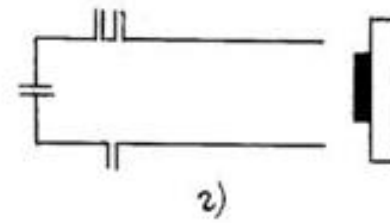
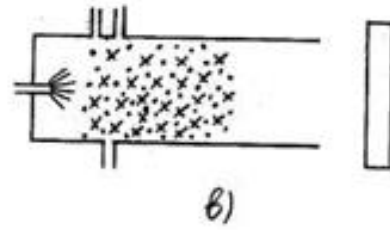
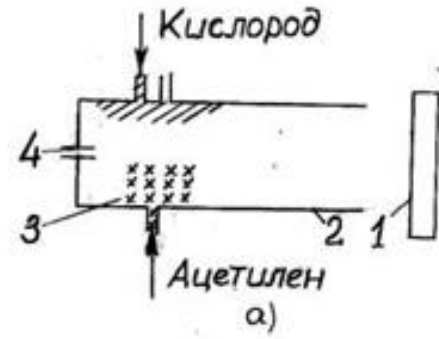


Послойно-градиентное  
металлокерамическое покрытие



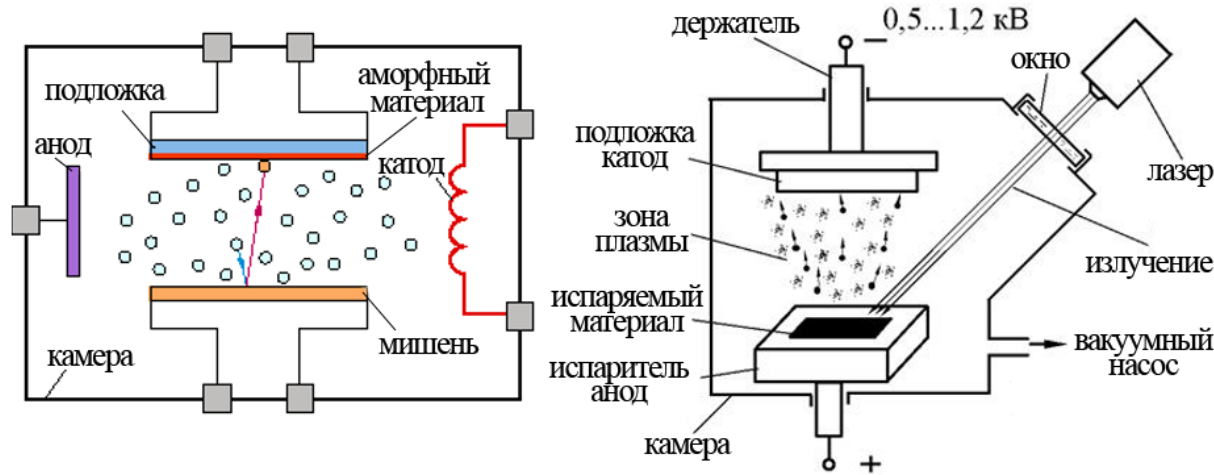
Микрофотографии внешнего слоя  
и поперечного шлифа покрытия  
из частиц алюминия

## Детонационное напыление



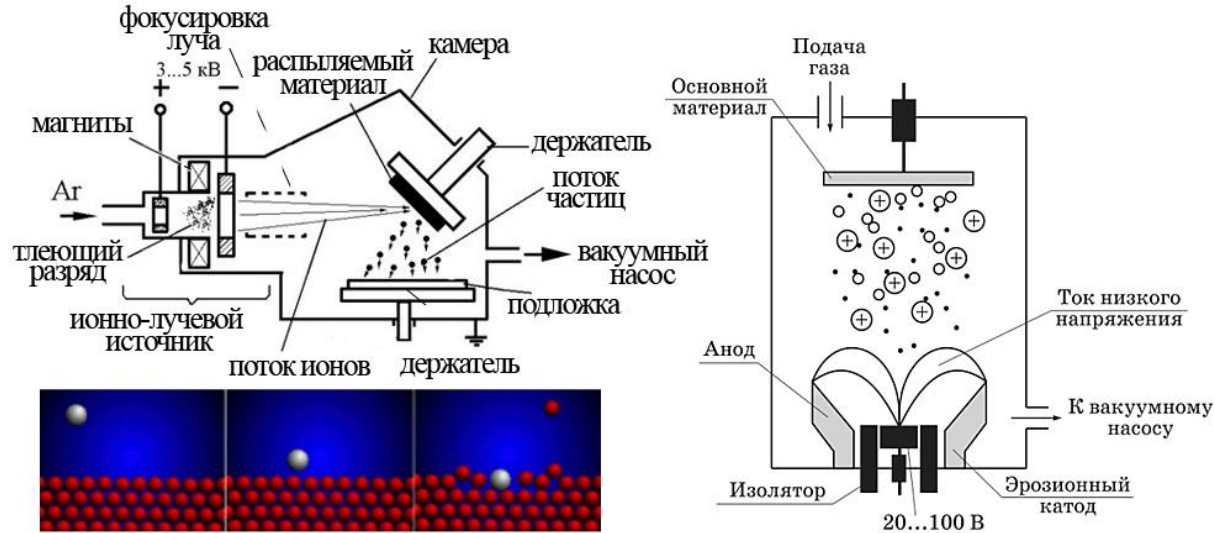
### 3. Ионное распыление

Ионно-плазменное распыление



Ионное плакирование с применением лазера

Ионно-лучевое распыление



Ионное плакирование с тлеющим разрядом

- **Ионно-лучевое перемешивание:** ионному облучению подвергается композиция из материала с уже нанесённым поверхностным слоем

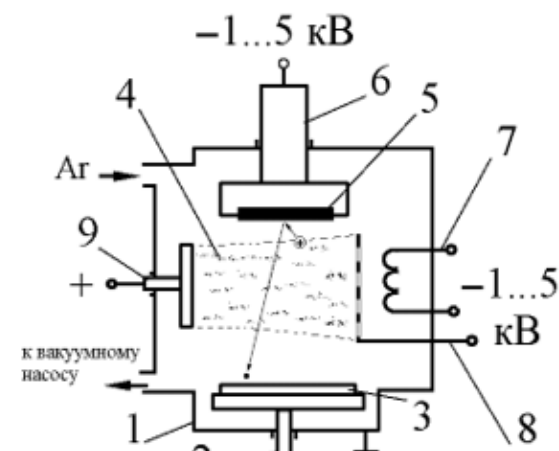
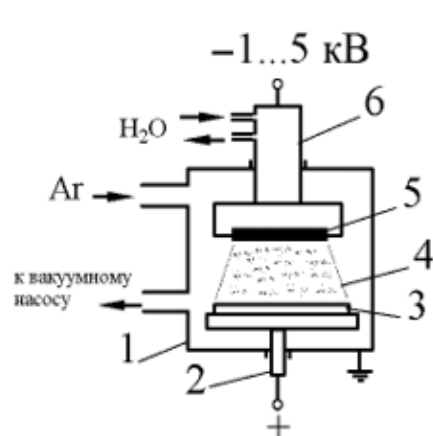
## Ионно-плазменное распыление

двухэлектродный метод

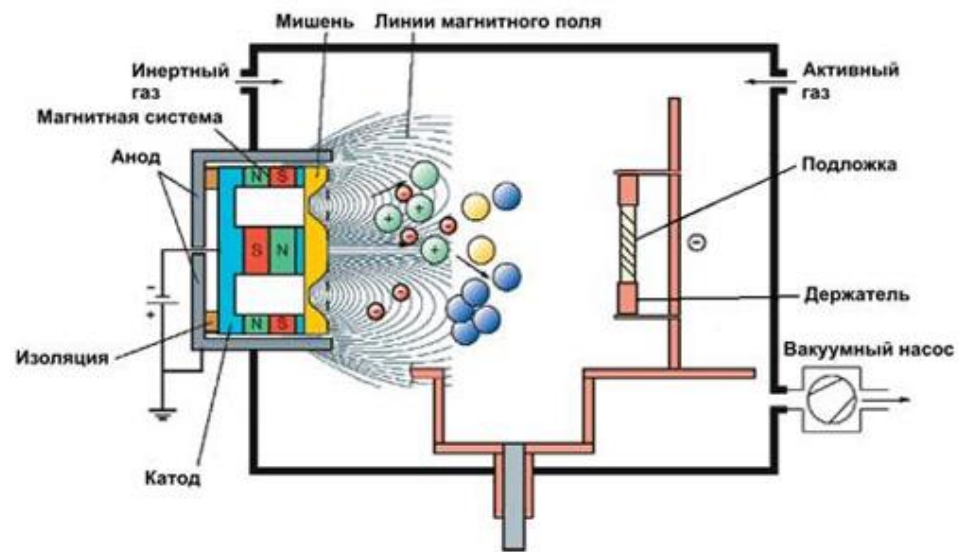
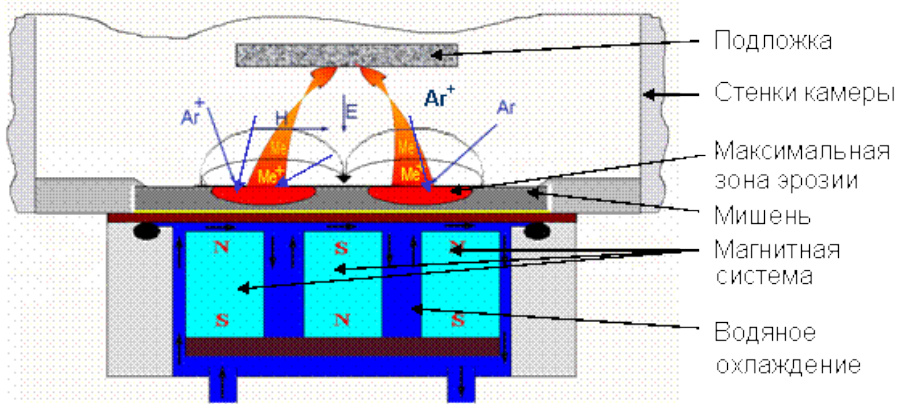
четырёхэлектродный метод

с применением магнитного поля

## Ионно-плазменное распыление



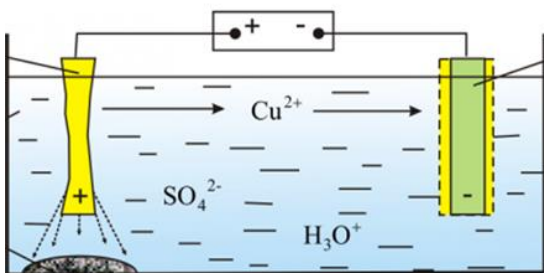
## Магнетронное распыление



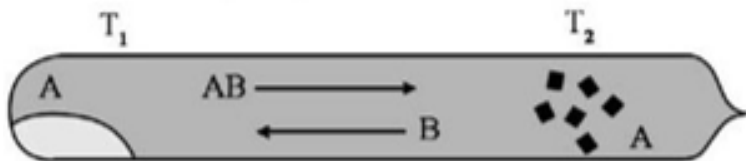


## 4. Химическое осаждение

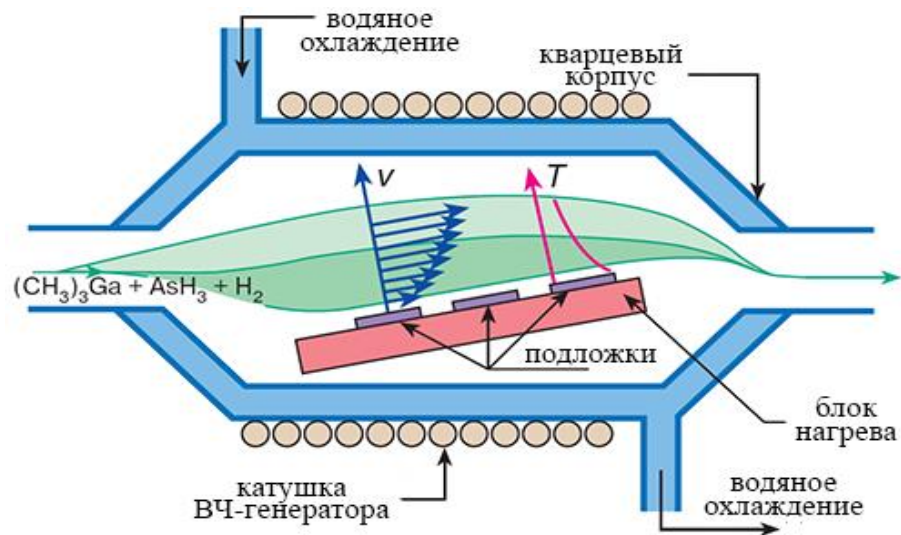
Электрохимическое осаждение.  
Электролиз



A – кристаллизация из газовой фазы  
в замкнутом реакционном сосуде



Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)



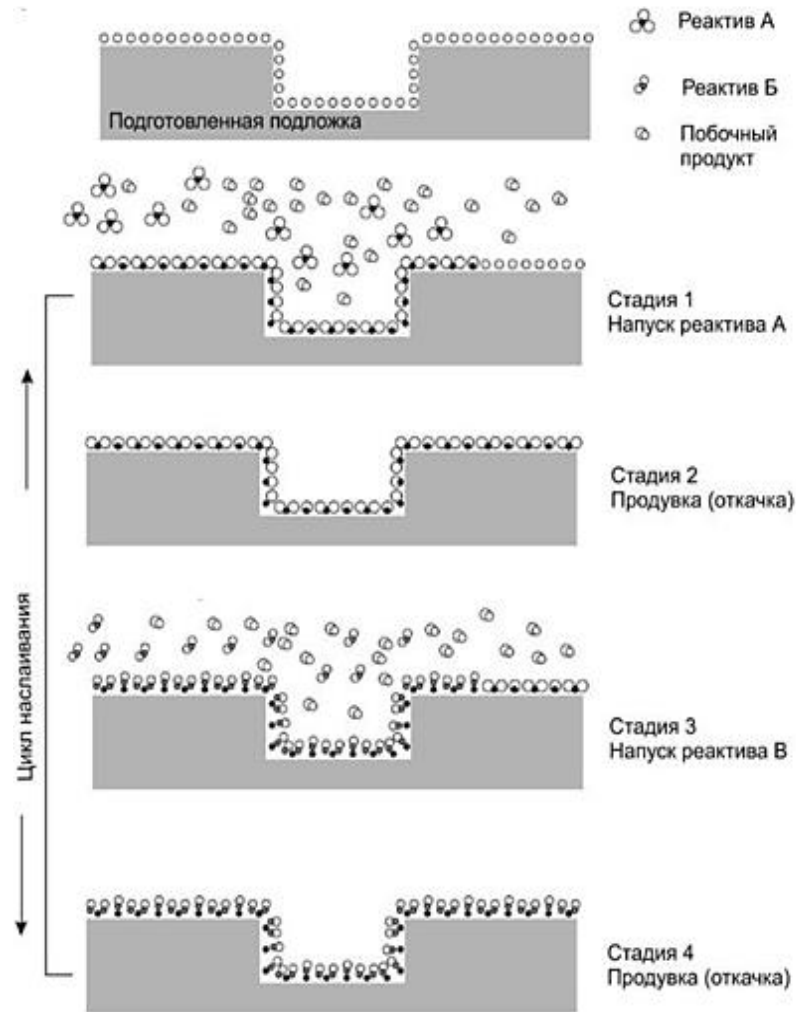
- **Основным недостатком CVD-метода** является необходимость нагрева деталей до высоких температур: это с одной стороны оказывает отрицательное влияние на механические свойства и структуру подложки, а с другой – мешает создавать наноструктурное состояние самого покрытия.

Разновидности CVD:

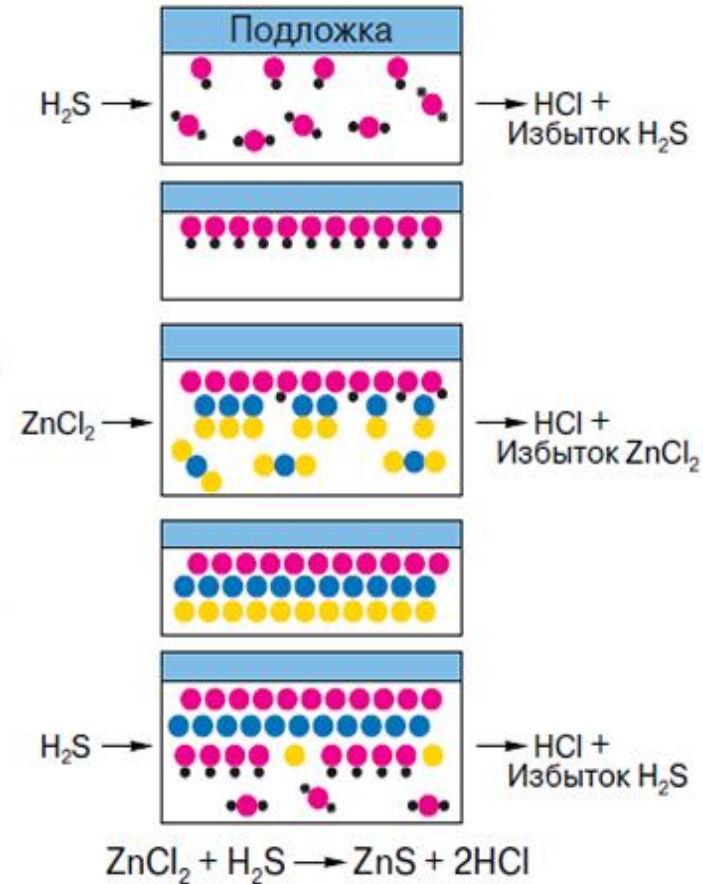
- **Парофазная эпитаксия (VPE):** газовая фаза находится в термодинамическом равновесии с твёрдой фазой плёнки.
- Гибридное физико-химическое парофазное осаждение (HPCVD): испарение твёрдого материала и химическое разложение молекул.
- Пламенное разложение (CCVD): сгорание в открытой атмосфере.
- Каталитический CVD или CVD с горячей нитью (Cat-CVD / HWCVD / HFCVD) – использует горячий носитель для ускорения реакции газов.
- Быстродействующее термическое химическое парофазное осаждение (RTCVD) использует лампы накаливания или другие методы быстрого нагрева подложки. Нагрев подложки без разогрева газа позволяет сократить нежелательные реакции в газовой фазе.
- **Металлорганический CVD (MOCVD)** использует металло-органические прекурсоры (metal-organic). Поочерёдное введение реагентов в газовый поток позволяет осадить их на подложке слой за слоем, так что химическая реакция происходит на её поверхности, а не в газе (рис. 1.7а).
- **Атомно-слоевое осаждение (ALCVD или ALD)** или молекулярное наслаивание: поочерёдно осаждаются слои различных материалов (рис. 1.7б).

**Плазменно-химическое осаждение из газовой фазы (PECVD):** использует ВЧ плазму (тлеющий разряд), которая снижает температуры нужные для реакции (80 – 350 °С)

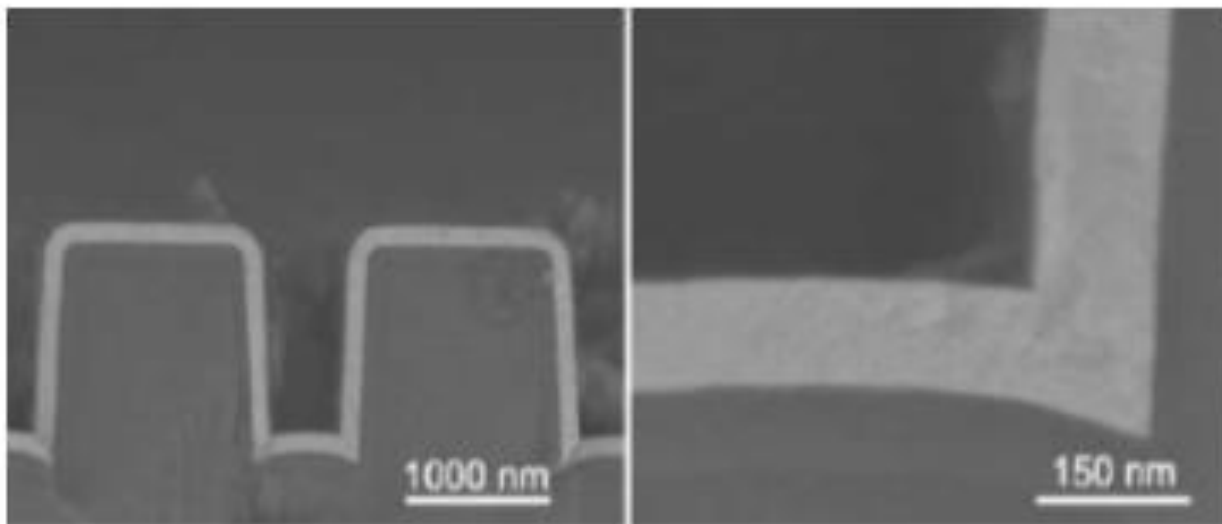
## МOCVD – осаждение с металло-органическими прекурсорами



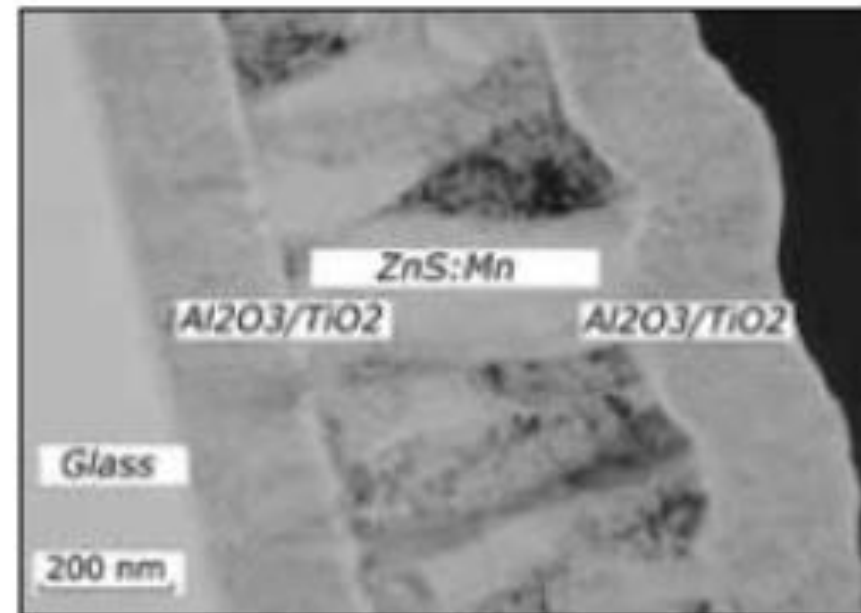
## ALCVD – молекулярное наплаивание



- **Достоинства MOCVD метода:** получение плотных покрытий без микроотверстий с высокой однородностью по толщине (толщиной до 20 мкм со скоростью до 0,1 мкм/мин) даже при формировании покрытия внутри полостей изделий, что невозможно достигнуть другими распространёнными технологическими методами.



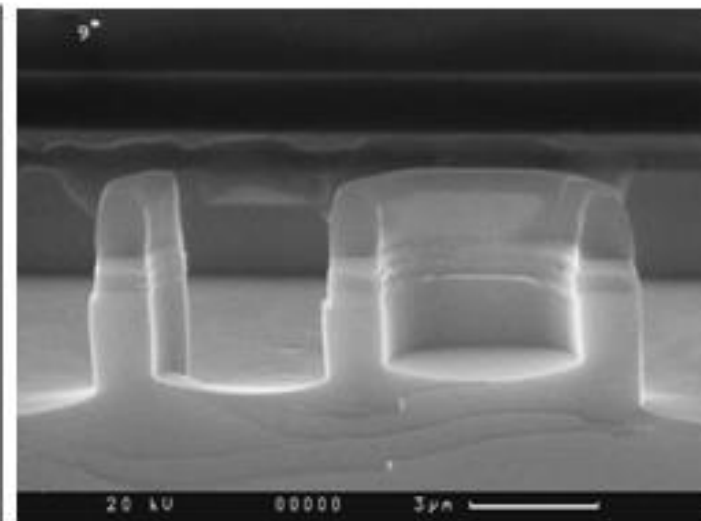
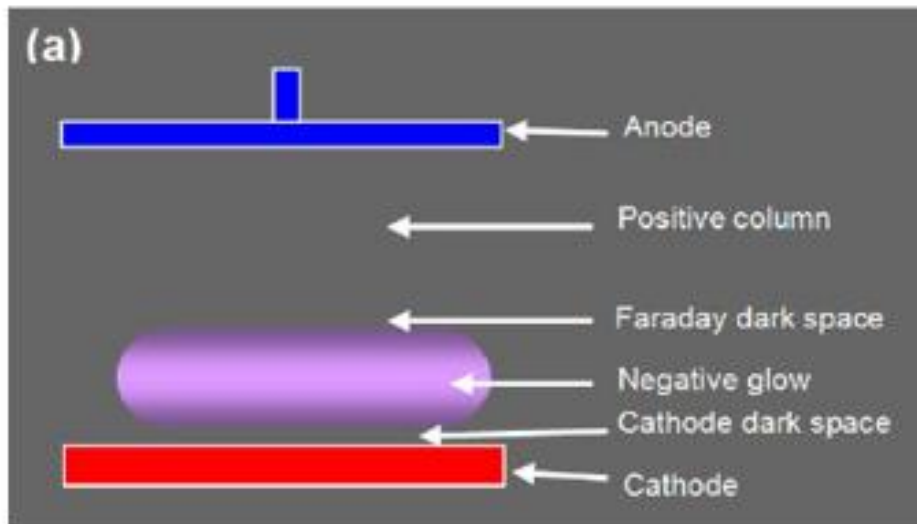
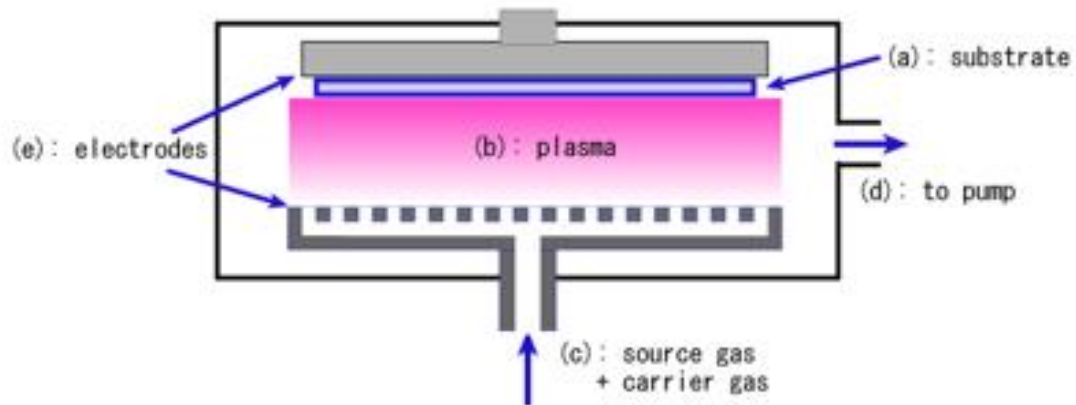
Пленка  $PtO_x$  на кремниевой подложке сложной формы



Структура стекла тонкопленочного  
электролюминесцентного дисплея

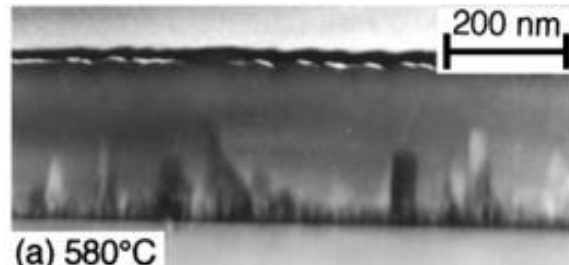
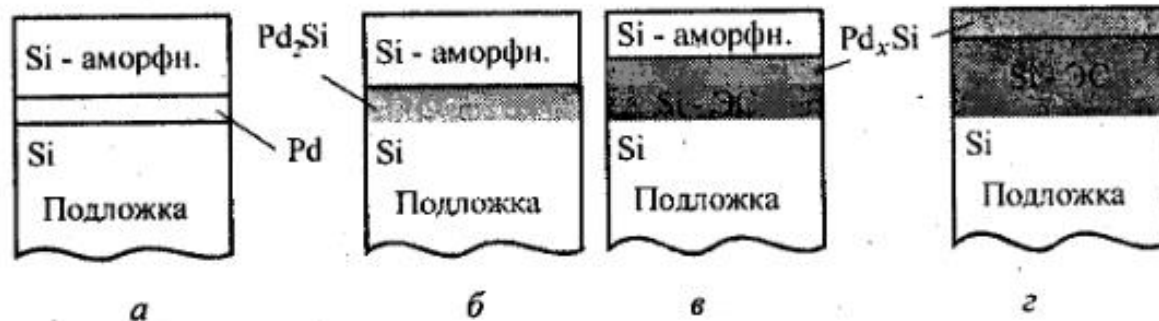
## Плазмо-химическое осаждение из паровой фазы (PE-CVD)

процесс химического осаждения тонких плёнок из паровой фазы при низком давлении с использованием плазмы тлеющего разряда. Плазма позволяет снизить температуру подложки (80-350C), в итоге увеличивается эффективность и скорость процесса.

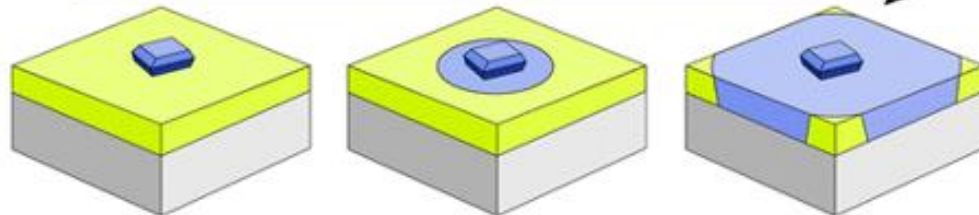


## Твёрдофазная эпитаксия (ТФЭ)

твёрдофазное взаимодействие в многослойной тонкоплёночной системе при изотермическом отжиге



Seeded Solid Phase Epitaxy



- на монокристаллическую подложку наносят аморфную плёнку с примесями,
- затем подложка нагревается, и плёнка кристаллизуется, а примеси вытесняются в узкий слой на дне плёнки

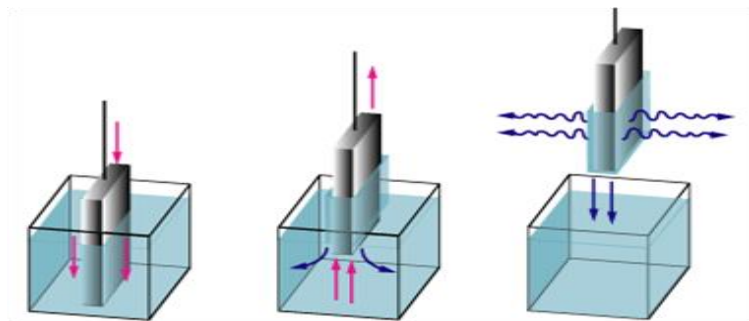
Получение тонких слоёв силицидов:

- наносим металл,
- за ним аморфную плёнку,
- при нагреве в результате термодиффузии образуются силициды (MeSi)

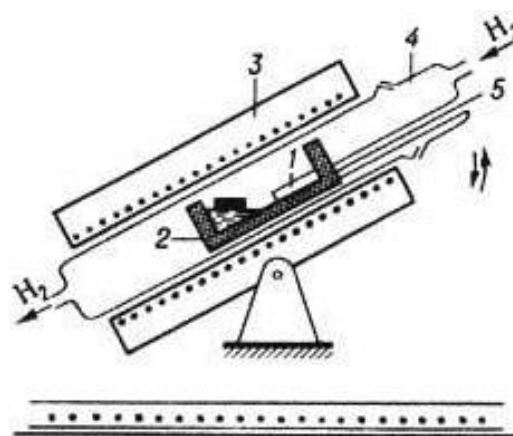
**Посевная эпитаксия** использует кристаллики на поверхности плёнки как шаблон-затравку

# 5. Жидкофазное осаждение

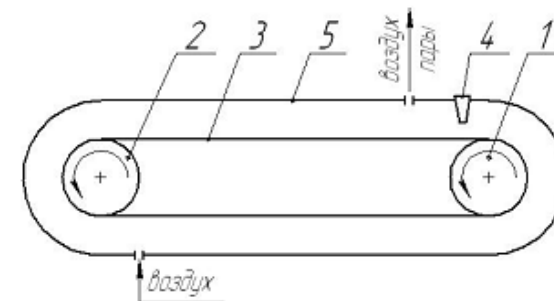
Вытягивание из раствора (dip-coating)



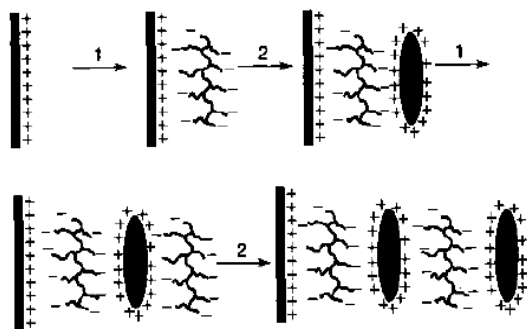
Слив раствора с поверхности подложки



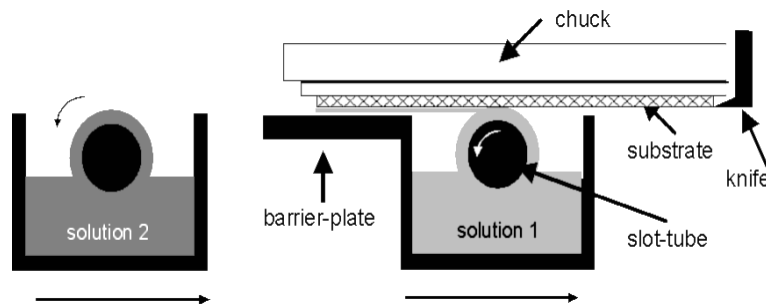
Полив по подложке движется фильера



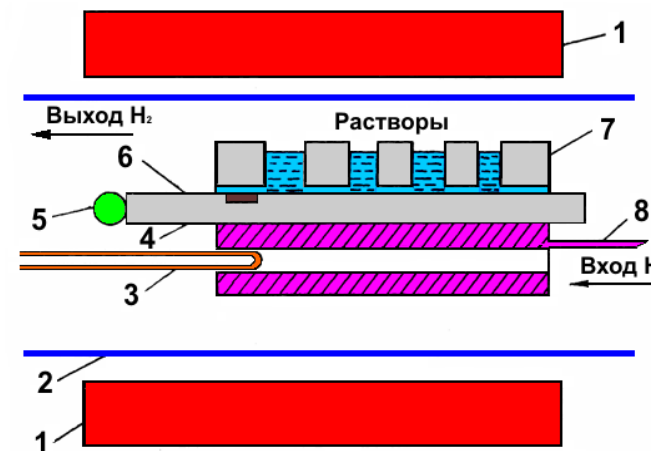
ионное наслаивание



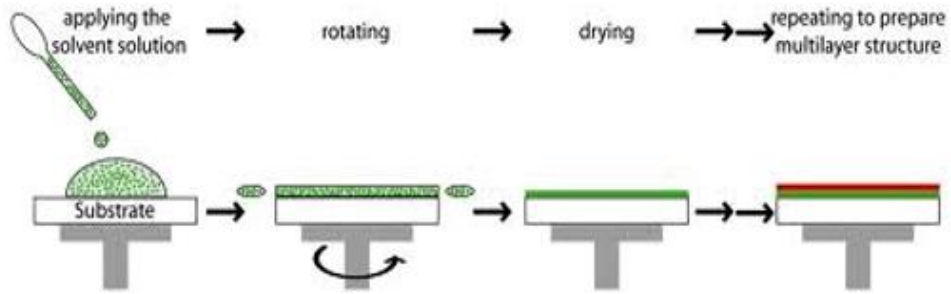
Капиллярная колонка



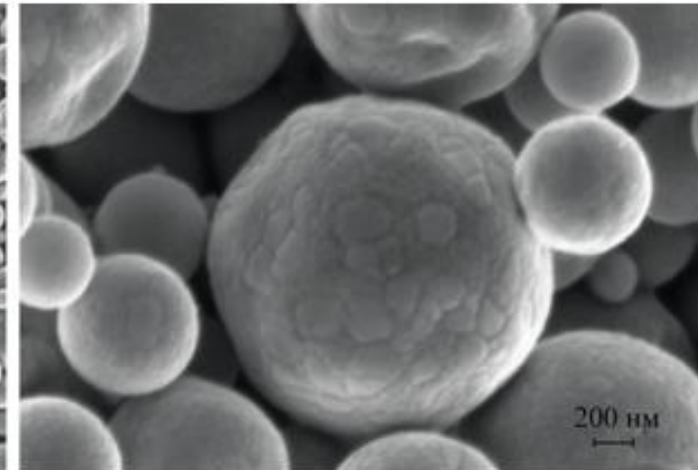
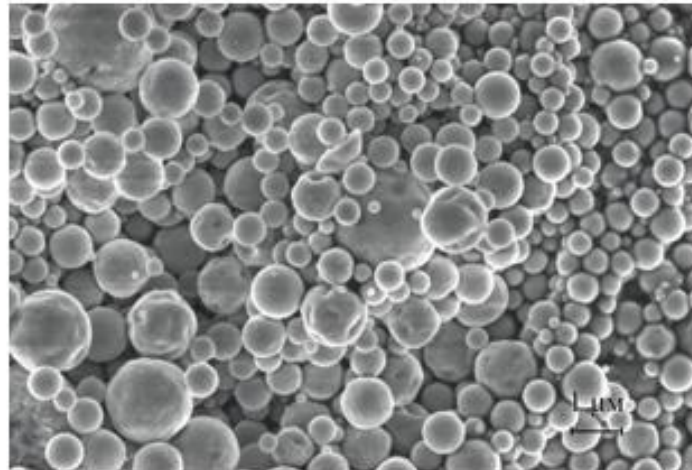
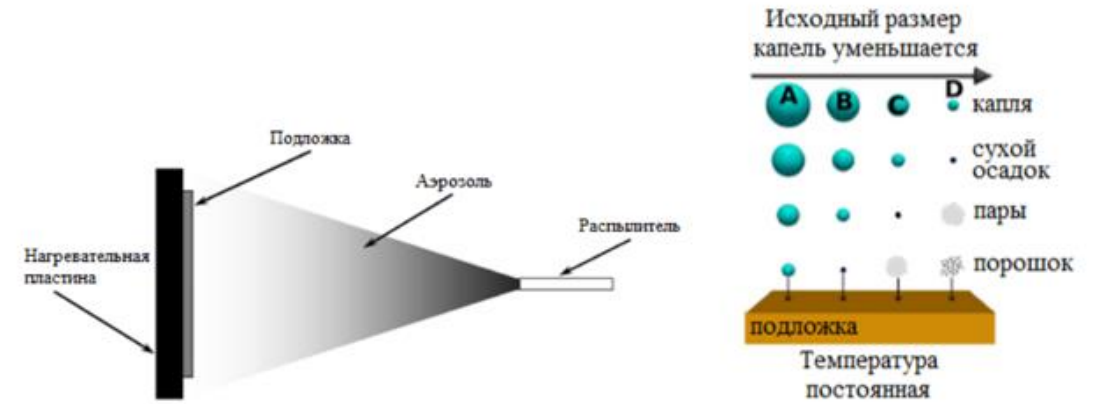
Принудительное удаление раствора



## Метод вращающегося столика (spin-coating)



## Нанесение из аэрозоля (spray coating) (Aerosol Assisted CVD)

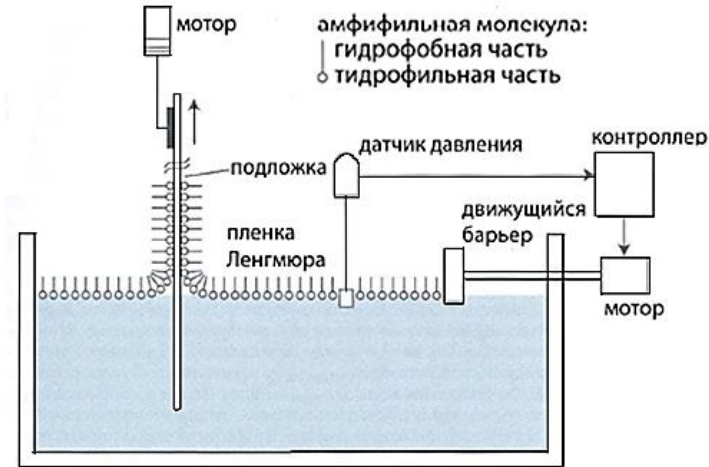
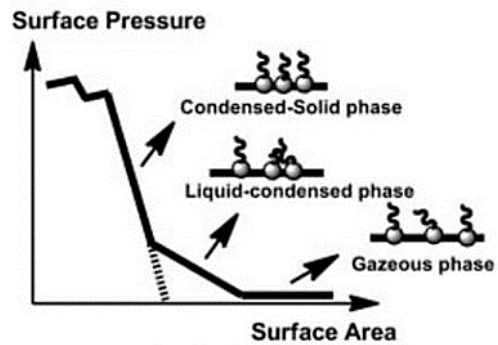
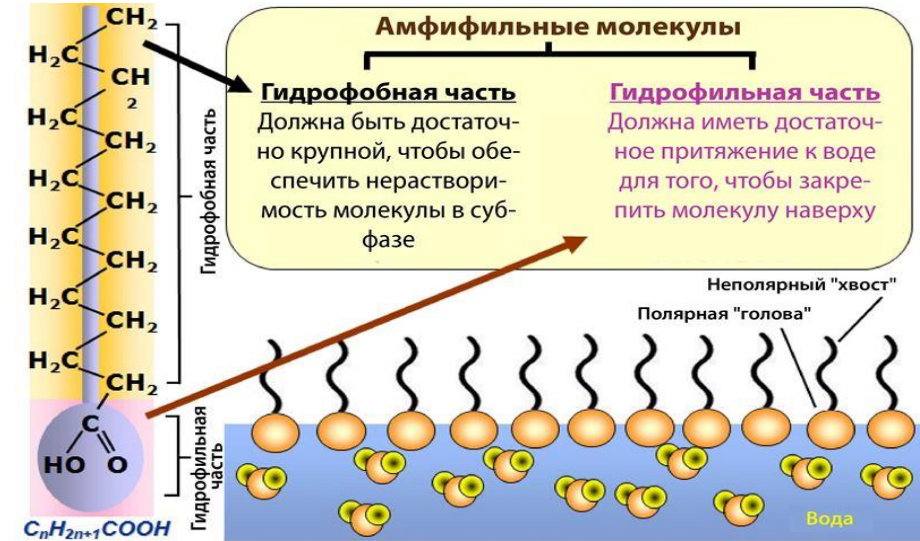
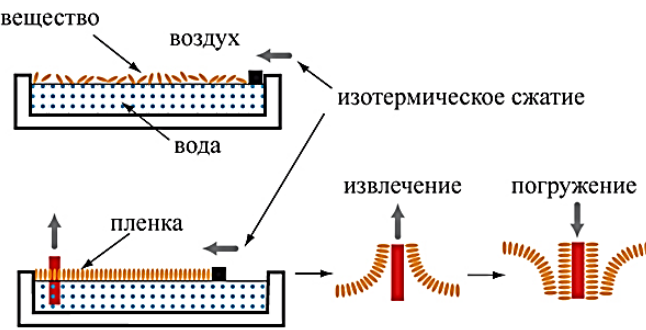
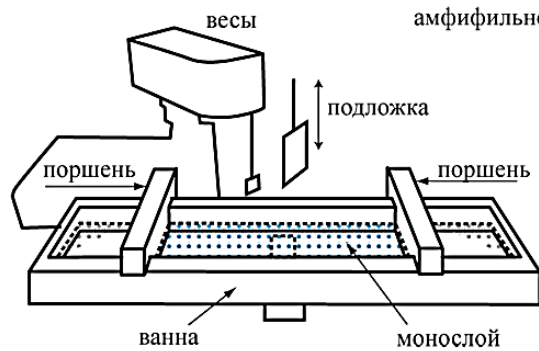


Литиевая феррошпинель  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ , полученная методом пиролиза аэрозолей из раствора нитратов Li и Fe(III) при температуре горячей зоны печи  $850^\circ\text{C}$ .



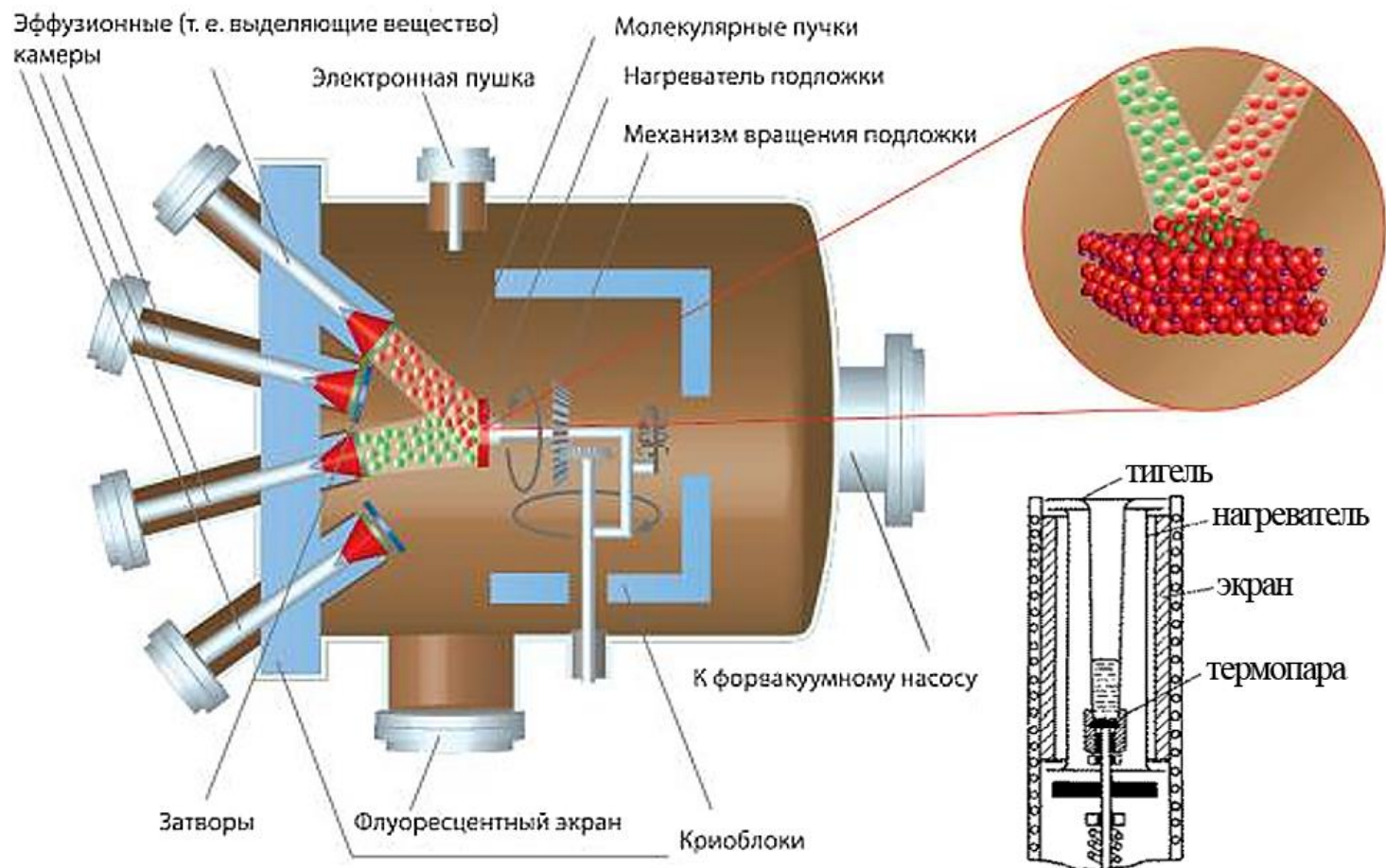
# Технология Ленгмюра – Блоджетт (LB)

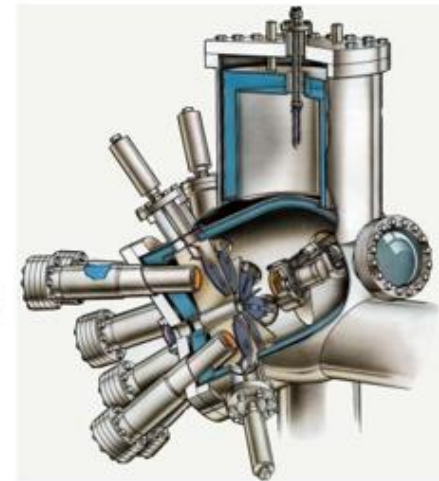
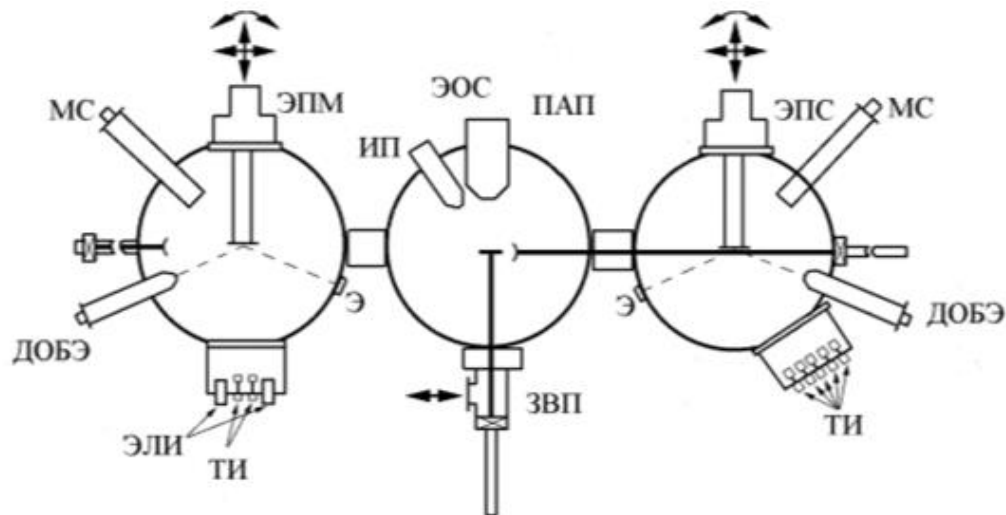
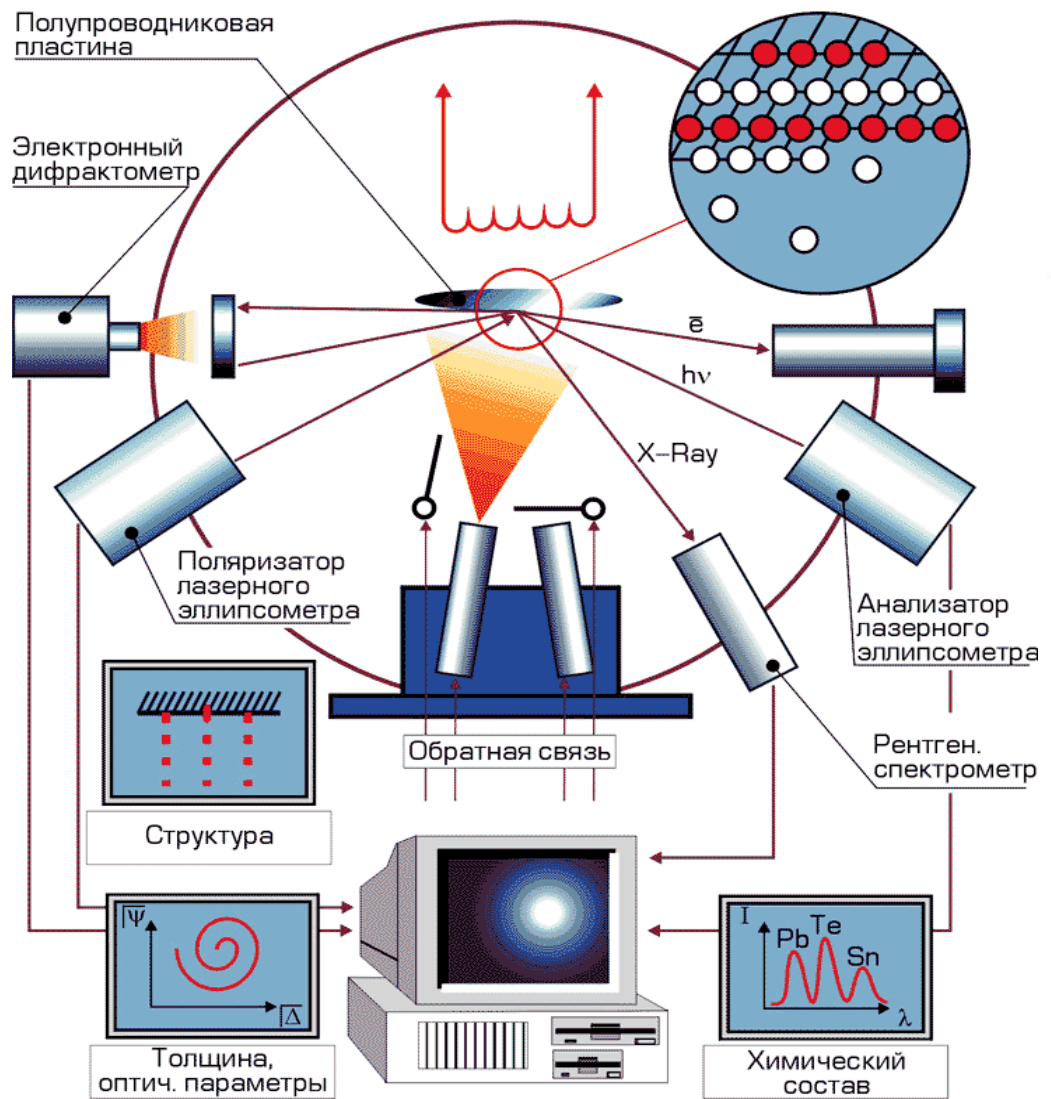
- Технология Ленгмюра-Блоджетт (или метод горизонтального осаждения) была разработана Ирвингом Ленгмюром и его ученицей Кэтрин Блоджетт в 1930 г.



## 6. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)

- **МЛЭ** – выращивание одного кристаллического материала на поверхности другого в сверхвысоком вакууме. Применяется **эффузия** – медленное истечение газа через малое отверстие.

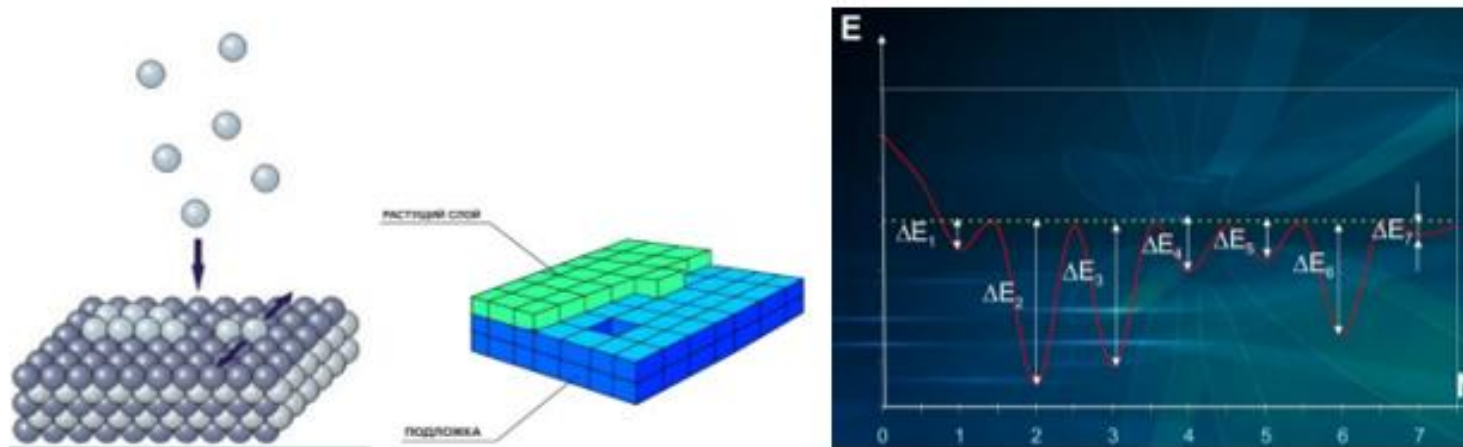




## Механизм роста плёнок в МЛЭ

Индивидуальные атомные процессы, сопровождающие эпитаксиальный рост:

- **адсорбция** составляющих атомов или молекул на поверхности подложки (химическая, физическая);
- поверхностная **миграция** атомов и **диссоциация** адсорбированных молекул;
- **присоединение** атомов к подложке или к выращенным ранее эпитаксиальным слоям;
- термическая **десорбция** с поверхности кристалла атомов, не успевших встроиться в кристаллическую решётку.
- **абсорбция** – проникновение атомов нарастающей фазы в объём материала подложки происходит: за счёт их диффузии, растворения, движения по стенкам капилляров или границам зёрен.



зависимость энергии связи с подложкой ( $E$ ) от номера положения атома ( $N$ ):

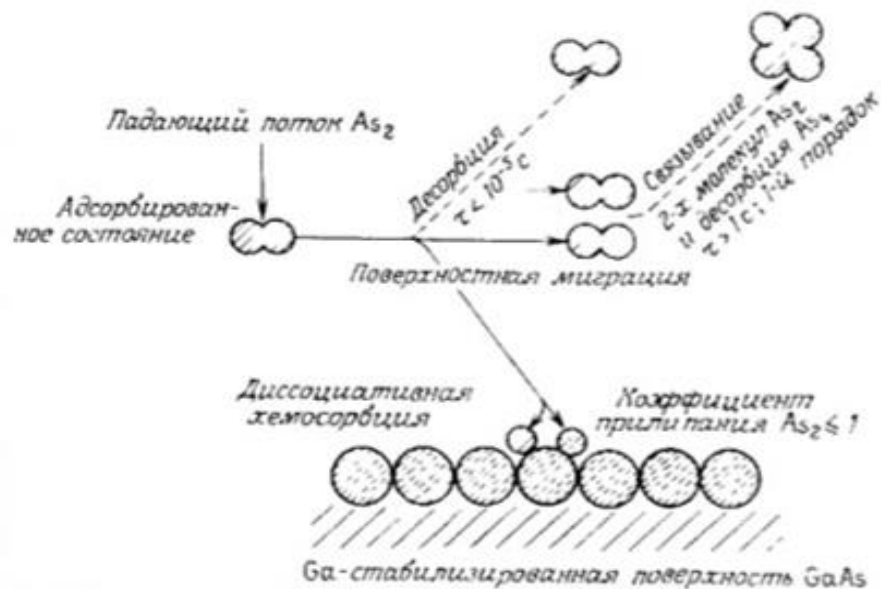
1,4,5 - атом на атомно-гладком участке поверхности,

2,3 – атом на месте вакансии в поверхностном слое,

5 6 7 6 – атом у излома ступени роста,

7 – десорбированный атом.

## Пример МЛЭ процесса



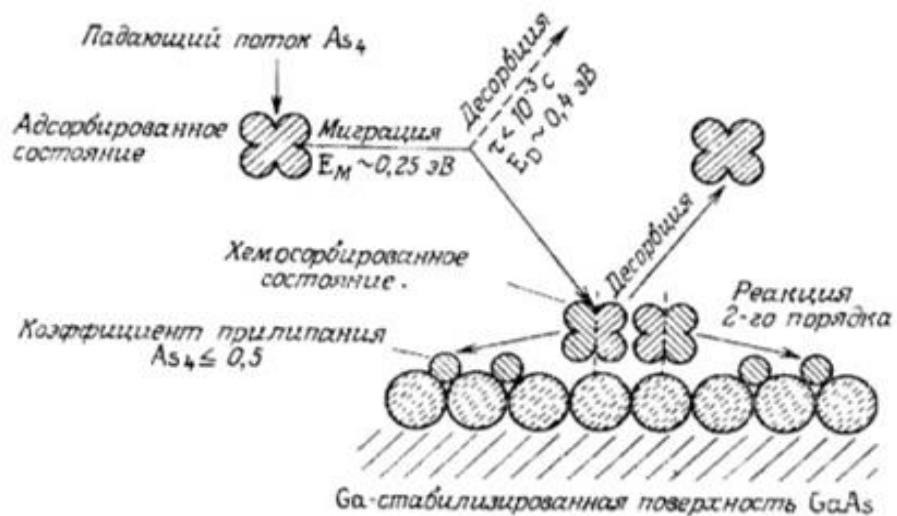
Эпитаксия кристаллических слоёв GaAs.

Модель роста плёнки AsGa:

а) из пучков Ga и  $As_2$ ,

б) из пучков Ga и  $As_4$ .

$$J = 1,12 \cdot 10^{22} \frac{\pi d_D^2 p}{4r^2 \sqrt{MT}} \cos(\theta),$$



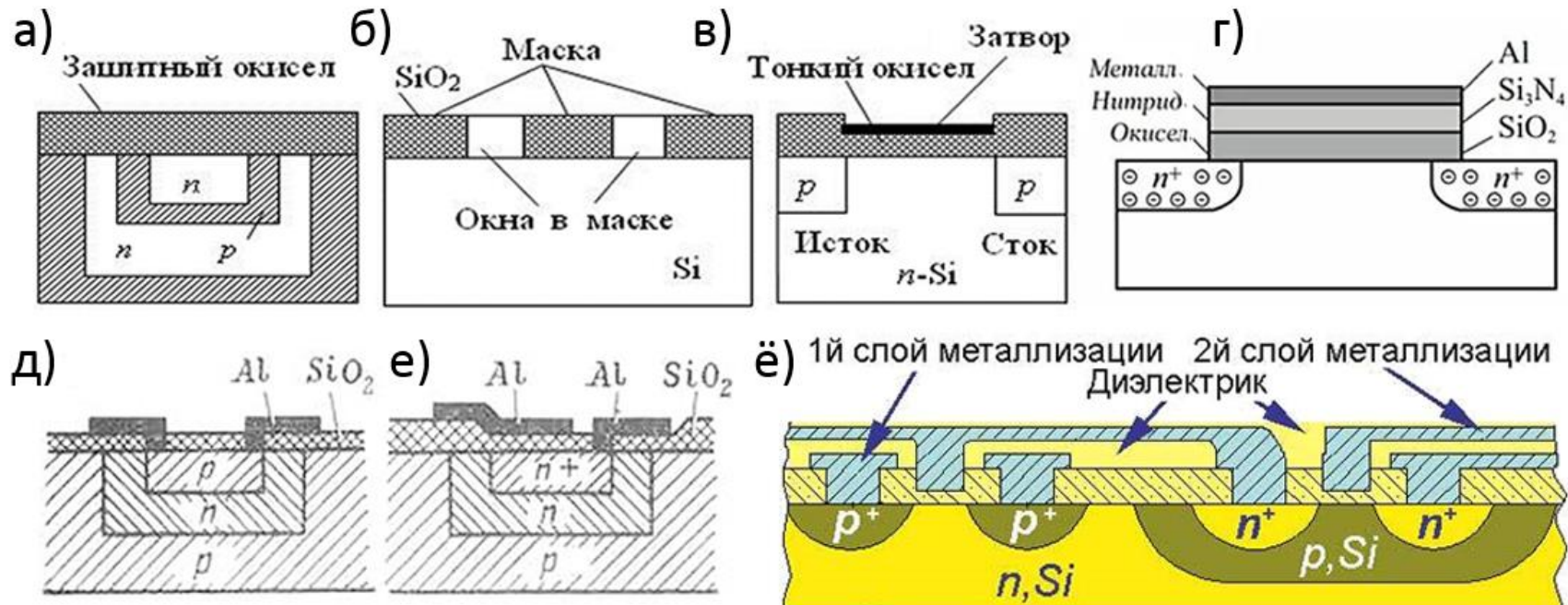
$$u = \frac{\alpha p}{\sqrt{2\pi M k T}} f(\theta) \exp(-E/kT).$$

### Преимущества и недостатки

Метод	Преимущества	Недостатки
<b>Термическое испарение</b>	Простое оборудование, возможность получения чистых плёнок	Трудно испарять тугоплавкие металлы, трудность воспроизведения химического состава испарителя
<b>Катодное распыление</b>	Возможность напыления тугоплавких материалов и химических соединений	Невысокая чистота плёнок, сложность управления процессом синтеза
<b>Магнетронное распыление</b>	Высокая скорость роста, возможность нанесения плёнок на подложки с низкой термостойкостью	Более высокая шероховатость поверхности плёнок
<b>Химическое осаждение из паровой фазы</b>	Позволяет получать высококачественные эпитаксиальные и поликристаллические плёнки	Сложное оборудование. Требуется точное задание скорости газового потока; высокая температура подложки
<b>Молекулярно-лучевая эпитаксия</b>	Даёт высококачественные плёнки соединений	Сложное оборудование
<b>Жидкофазная эпитаксия</b>	Плёнки соединений с хорошим качеством	Трудно контролировать концентрацию и обеспечивать воспроизводимость состава плёнок
<b>Электрохимическое осаждение</b>	Высокая скорость роста, большая площадь нанесения, однородность по толщине	Применим лишь для металлических плёнок; проблема примесей

# 7. Создание диэлектрических слоёв

- а) защита поверхности платы, б) маска для локального легирования, в) тонкий подзатворный окисел, г) ячейка памяти на основе структуры «металл нитрид окисел полупроводник»,



- д) устройство полупроводникового резистора, е) устройство конденсатора с тонким слоем SiO<sub>2</sub>,  
ё) изоляция системы с многоуровневой металлизацией

- **Применение полимерных покрытий**

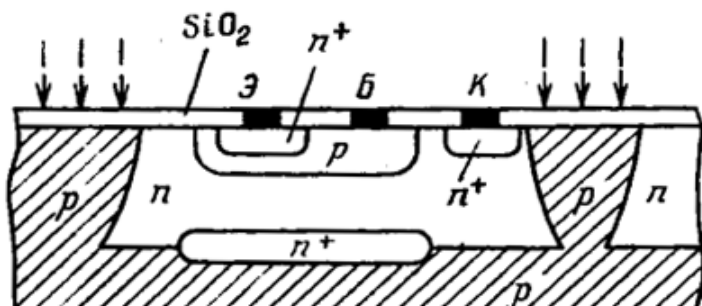
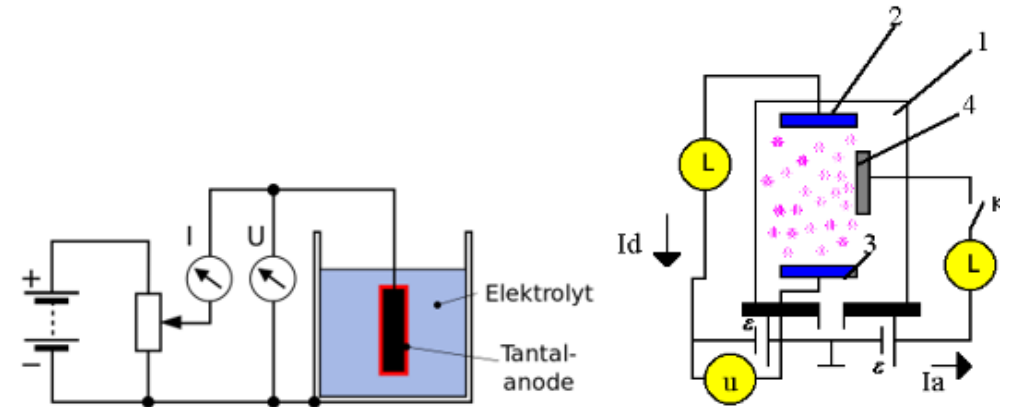
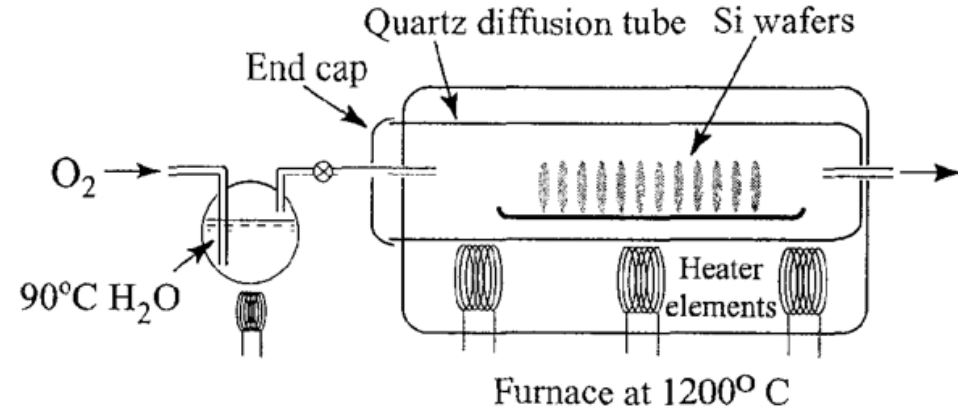
- **Оксидирование**

термическое (нагрев в газе-окислителе),  
химическое (обработка расплавами или растворами),  
электрохимическое (окисление в электролите),  
микродуговое (электрическая дуга),  
плазменное (окисление в низкотемпературной плазме)

**Термическое окисление кремния**

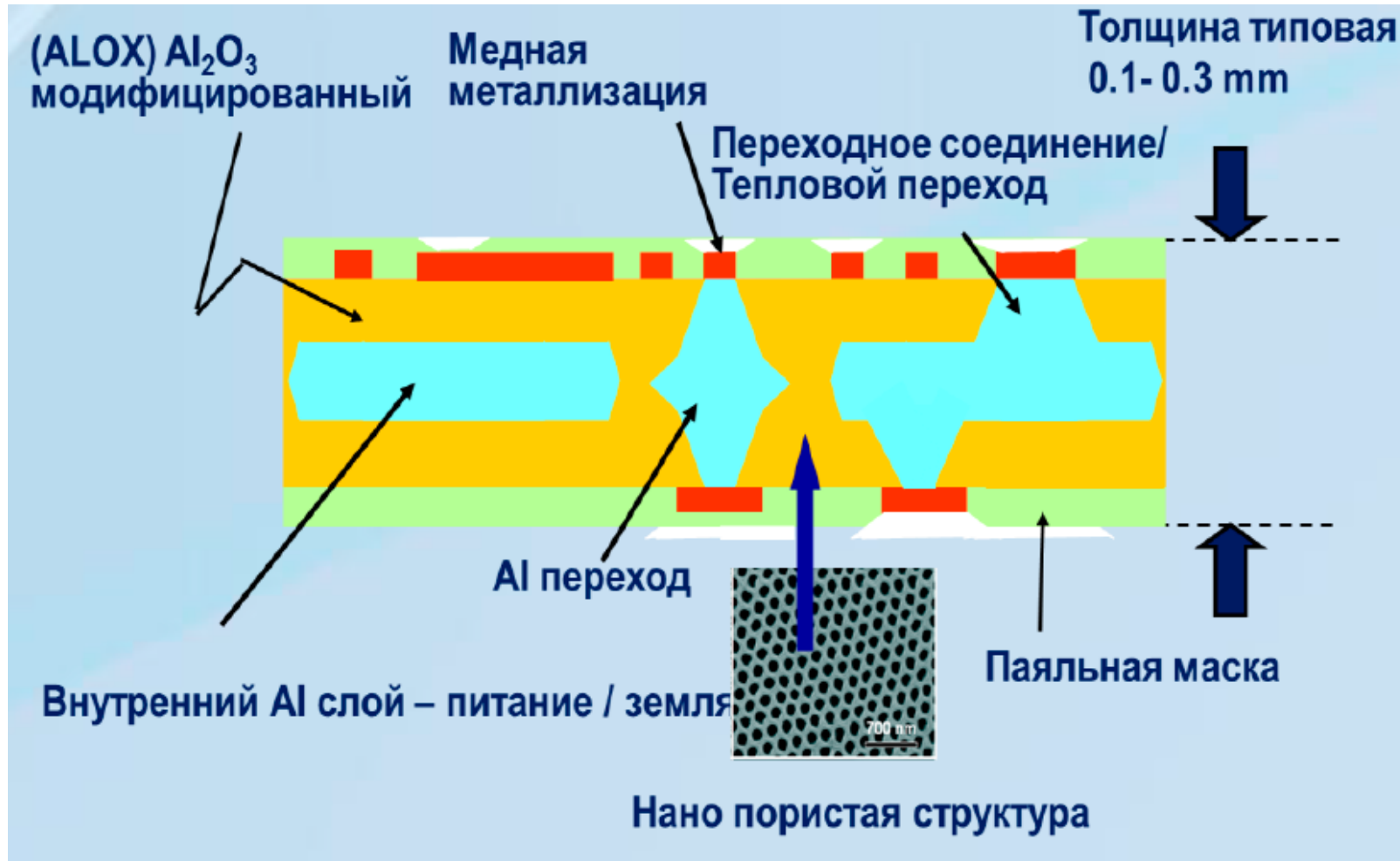
**Анодирование – электрохимическое окисление металлов**

- **Изоляция закрытым р-п-переходом**





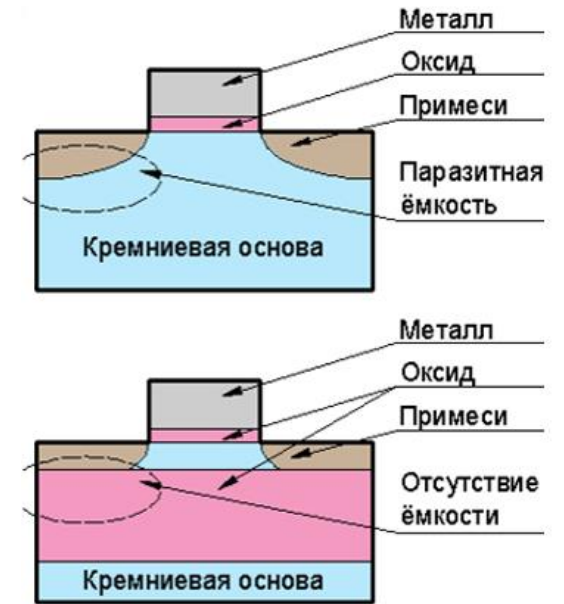
**Алюмооксидная технология** – это применение подложек из проводящих слоёв алюминия (и/или меди) и диэлектрического пористого  $\text{Al}_2\text{O}_3$



## Технология кремний на изоляторе (КНИ или SOI)

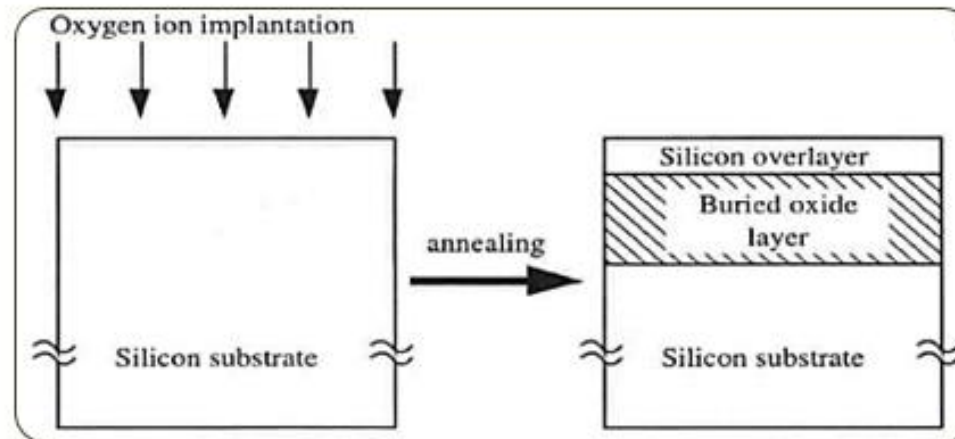
использует трёхслойные подложки со структурой кремний-диэлектрик-кремний вместо монокристаллических кремниевых пластин.

Наиболее распространена **технология кремний на оксиде** (КМОП или CMOS – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник).



Внедрение ионов кислорода в поверхность кремния в процессе отжига.

Печи для диффузии и термического оксидирования (LAAS, Тулуза, Франция)



## Способы создания подложек для КНИ

**Эпитаксиальный метод** (seed method): рост диэлектрической плёнки на кремниевой подложке методами эпитаксии (например, МЛЭ), а затем рост кремниевой плёнки на диэлектрике.

**Ионная имплантация кислорода** (или разделение имплантированным кислородом) (SIMOX – Separation by IMplantation of Oxygen):

- в кремниевую пластину имплантируют большие дозы атомов кислорода
- после отжига этой пластины образуется слой оксида кремния, который и служит изолятором.



## Способы создания подложек для КНИ

**Кремний на сапфире** (UltraCMOS) – (CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor)

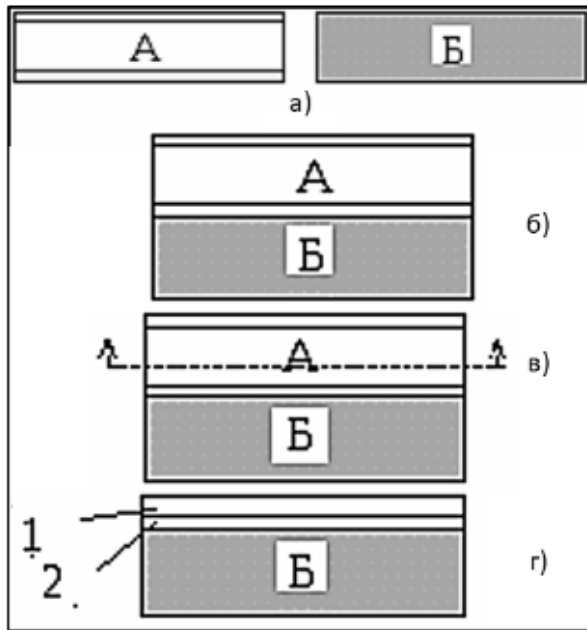
это выращивание структур «кремний на сапфире»:

слои кремния на сапфировой подложке  $Al_2O_3$  толщиной до 100 нм и менее.

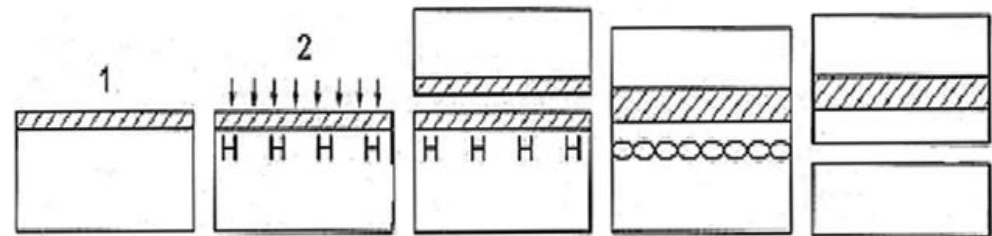
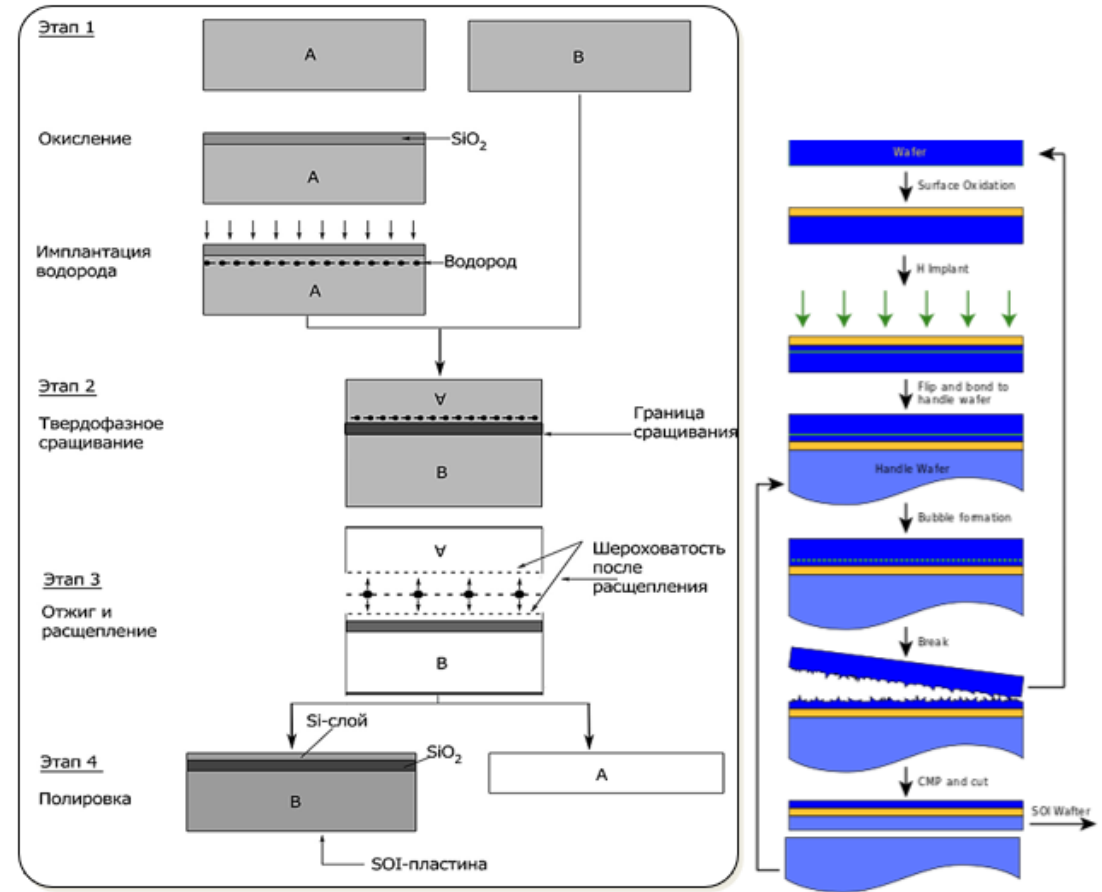


- эпитаксия кремния на сапфире
- облучение ионами кремния и аморфизация дефектного переходного слоя
- твердофазная эпитаксия (отжиг) аморфного Si  
(превращение его в кристаллический уже без дефектов)  
с последующим или одновременным окислением поверхности.

## Метод сращивания пластин (wafer bonding)



## Метод управляемого скола (Smart Cut)



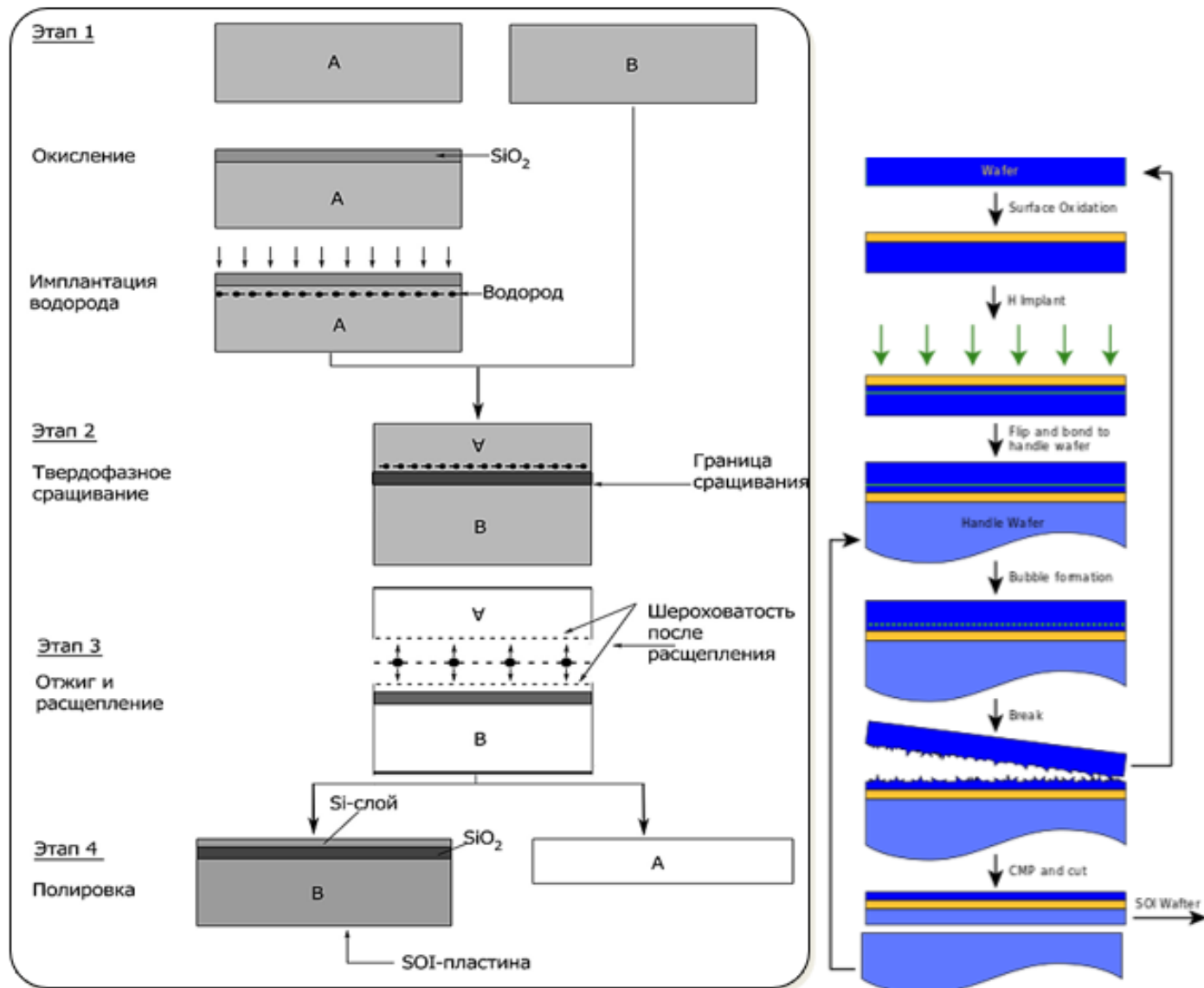


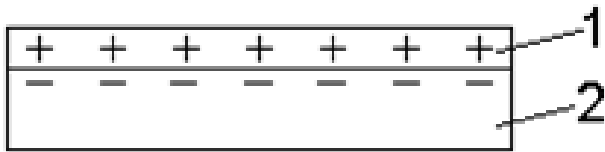
Рис. 5.53. Две, в сущности, одинаковые схемы управляемого скола в КНИ.

## 8. Адгезия и контроль толщины плёнок

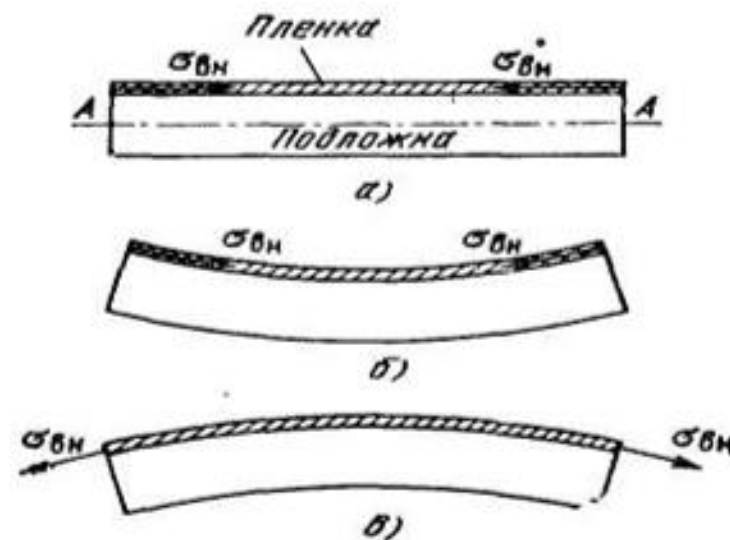
- **Адгезией** называют явление прилипания, которое возникает при контакте двух разнородных конденсированных сред (покрытие и основа).

Частный случай адгезии – **когезия** – взаимодействие соприкасающихся одинаковых тел.

3 варианта взаимодействия подложки с плёнкой: адсорбционная, электрическая и диффузионная.

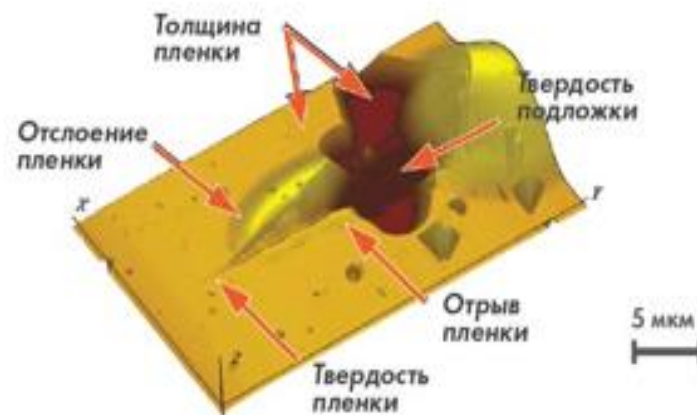
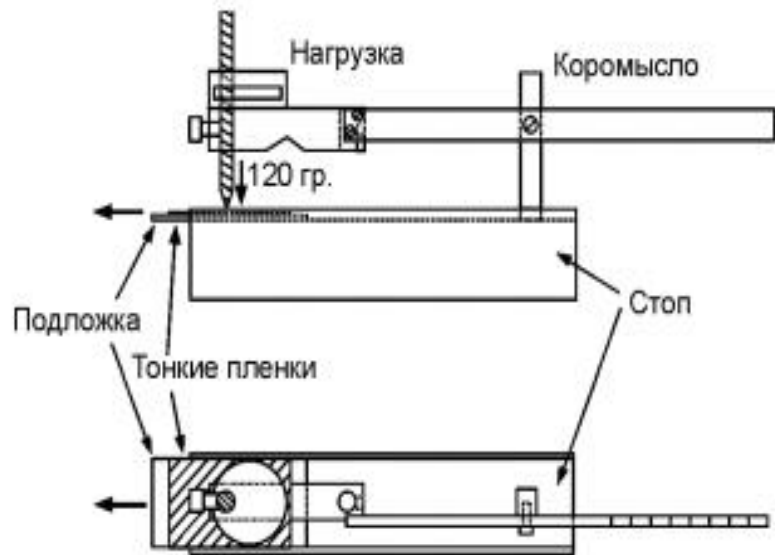


Механизм **коробления** из-за напряжений на границе подложка-плёнка, если плёнка не очень тонкая.



## Определение качества адгезии

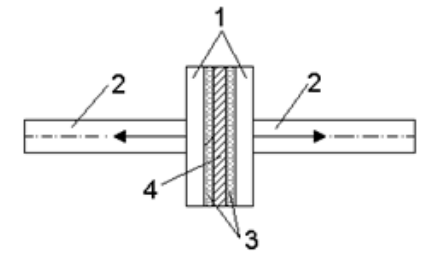
- **Метод ленты.** На поверхность покрытия накладывают специальную липкую ленту и затем её отрывают.
- **Метод царапания.**



- **Метод истирания.** Исследуют сопротивление плёнки стиранию, так как сопротивление плёнки зависит не только от твёрдости слоя, но и от адгезии.



- **Метод нормального отрыва.** Адгезию измеряют приложением сил, перпендикулярных поверхности раздела, при этом покрытие отрывают от подложки.
- **Метод центрифуги.** Плёнка наносится на цилиндрическую поверхность ротора. Ротор приводится во вращение с постепенно увеличивающейся скоростью до тех пор, пока плёнка не отрывается.
- **Метод ультразвуковой вибрации.** В этом случае применяется ультразвуковая вибрация. Метод основан на том, что при прохождении звуковых волн через материалы различной плотности часть волн отражается от поверхности раздела этих материалов.
- **Метод перегиба.** Подложку многократно изгибают до момента удаления (отскока) плёнки в месте перегиба.
- **Метод полирования.** При полировании металлического покрытия выделяемое тепло может вызвать образование вздутия на участках с неравномерной адгезией.
- **Метод нагрева.** Никелевые, оловянные и оловянно-никелевые покрытия можно испытывать на равномерность адгезии путём нагревания до 150 – 350 °С и затем охлаждения в воде.
- **Метод распиловки.** Изделие распиливают под углом 45°, ждут отслаивание.



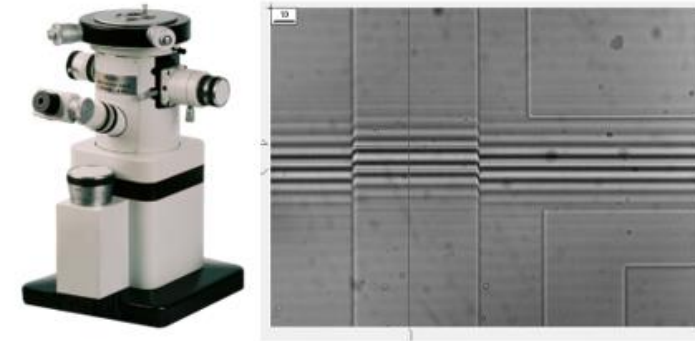
взвешивание, ультразвуковой, электромагнитный, магнитный, вихретоковый, электро-магнитно-вихретоковый.

## Контроль толщины тонких плёнок

Для определения толщины плёнки обычно применяют **метод свидетеля**.

- **Резистивный метод** может быть использован в процессе напыления. Регистрируется электрическое сопротивление свидетеля, которое зависит от толщины плёнки на нём. Когда сопротивление достигает заданной величины, напыление прекращают.
- **Резонансный метод** также может быть использован в процессе напыления. Используется **пьезоэлектрический свидетель** – тонкая кварцевая пластина, которая через внешние выводы подсоединяется к колебательному контуру генератора. Резонансная частота кварцевой пластины однозначно связана с её толщиной. В процессе напыления изменяется толщина пластины.
- **Оптические методы** используют измерение коэффициента поглощения или же определяют толщину методами интерферометрии или эллипсометрии.
- **Спектральный оптический контроль** по прозрачному свидетелю. Основан на спектральном широкополосном измерении коэффициента пропускания свидетеля

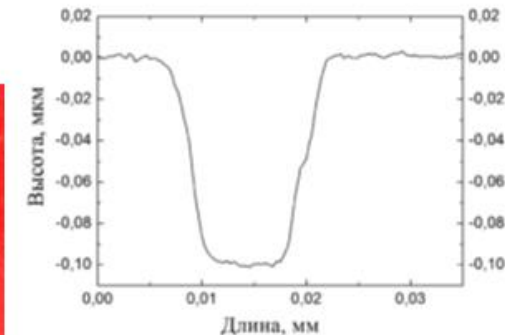
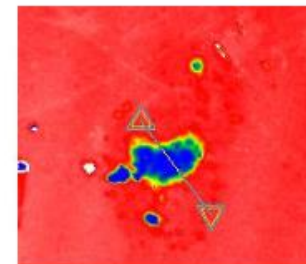
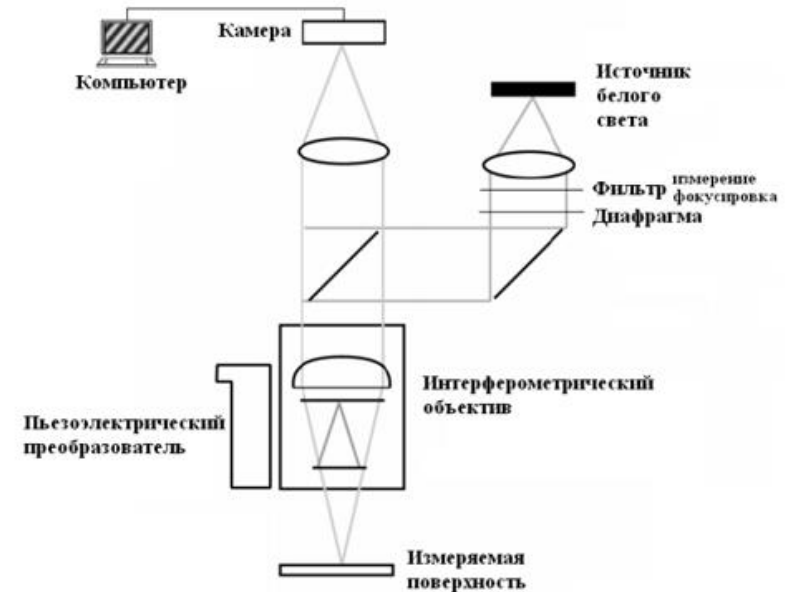
- **Интерферометр** использует законы интерференции света: на образец пускают две волны, которые отражаясь от него интерферируют и создают интерференционную картину



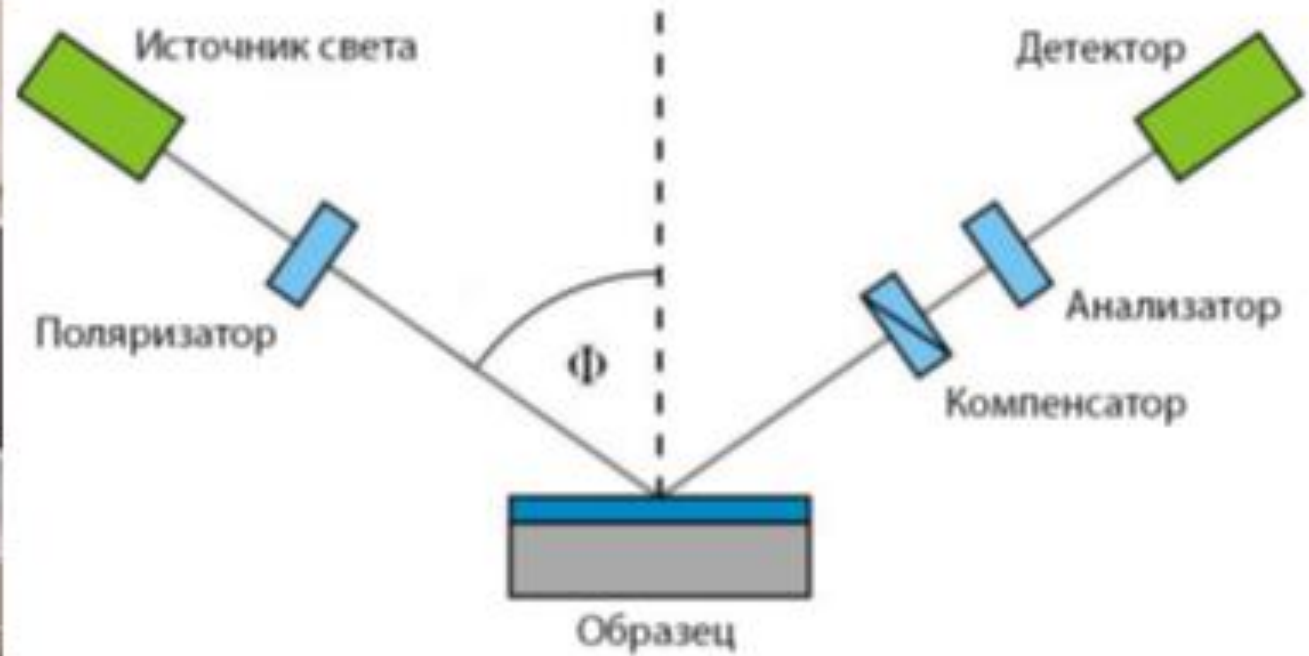
Интерферометр Линника МИИ-4М и смещение интерференционных полос на краях плёнки (искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на поверхности 0.27 мкм).

Схема сканирующего интерференционного микроскопа.

Изображение кусочка плёнки  $\text{Co}$  на подложке  $\text{Si}$  и его профилограмма.

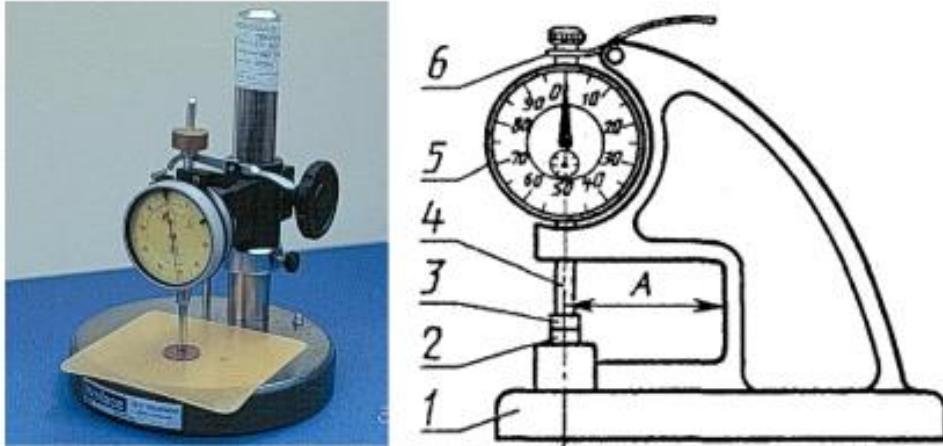


- **Эллипсометр** использует измерение угла Брюстера для света двух взаимно перпендикулярных поляризаций

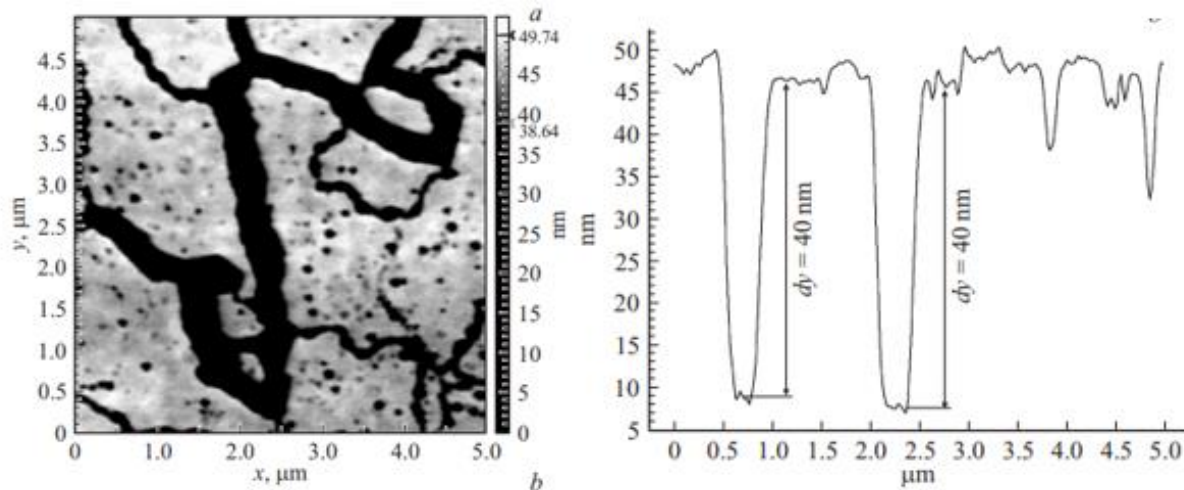


вращение поляризатора меняет поляризацию падающего на образец света (переключение между р и s – поляризованными волнами).

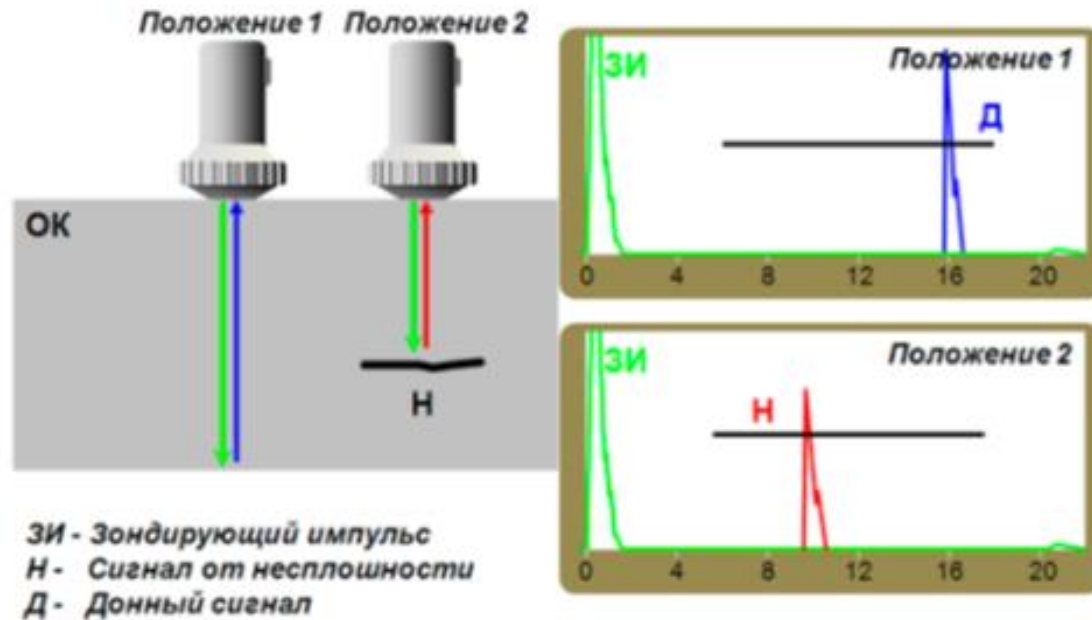
- **Механические методы** могут использовать как стандартные **толщиномеры**, такие как стрелочный толщиномер,



- так и **метод процарапывания плёнки** с применением АСМ



- В зонде **ультразвуковых толщиномеров** располагается датчик, генерирующий волны высокой частоты и посылающий их через анализируемый объект. Импульс отражается от поверхности и затем преобразуется датчиком в высокочастотный электрический сигнал.



- **Вихретоковый толщиномер** используются для проведения измерений непроводящих покрытий, нанесённых на проводящую подложку (свидетель) без разрушения самого покрытия.
- **Электромагнитные толщиномеры** используют магнитную индукцию. Проводящая (взаимодействующая с магнитным полем) плёнка оказывает влияние на величину магнитного поля.
- **Магнитные толщиномеры** позволяют производить замер немагнитных плёнок, нанесённых на магнитные основания.

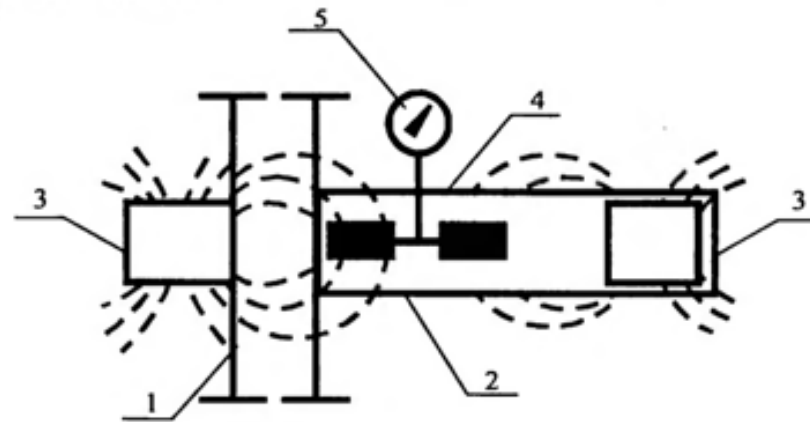
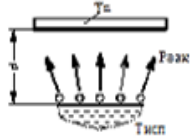
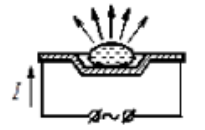
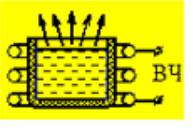
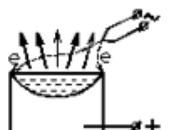

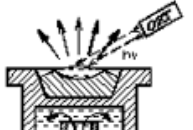

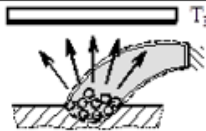

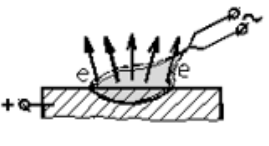
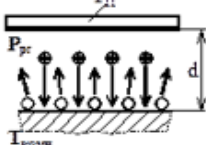
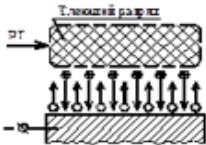

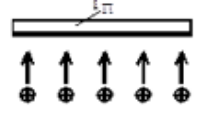
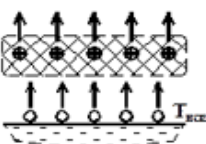
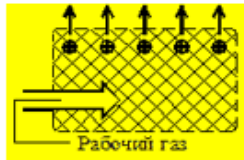




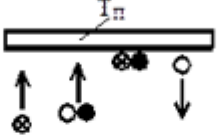


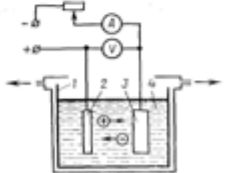
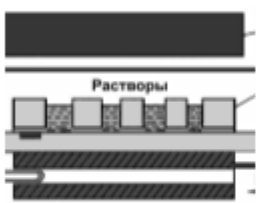
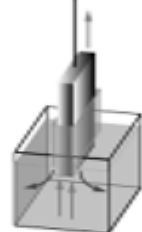

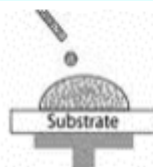
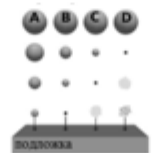

Схема электромагнитного толщиномера,  
работающего «на просвет»

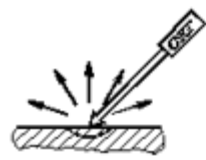

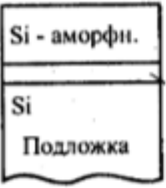
# Перечень методов осаждения тонких плёнок

Термическое испарение		
<p><math>p_{\text{вак}} = 10^{-4} \div 10^{-8}</math> Па  <math>T_{\text{подложки}} = 373 \div 973</math> К</p>  $v_{\text{max}} = 1,4 \cdot 10^3 \rho_{\text{исп}} \sqrt{\frac{M}{T_{\text{исп}} \cdot d^2 \cdot \rho}} = 0,1 - 1,0 \text{ мкм/с}$		
<b>Резистивный</b>	<b>ВЧ-нагрев</b>	<b>Электронный</b>
		
<b>Электронно-лучевой</b>	<b>Лазерный</b>	<b>Молекулярно-лучевой (МЛЭ)</b>
		
Дуговой разряд		
<p><math>p_{\text{вак}} = 10^{-2} \div 10^{-5}</math> Па  <math>T_{\text{пл}} = 293 \div 693</math> К  <math>E = 0,1 \div 10</math> эВ</p>  $v_{\text{max}} \leq \frac{q_{\text{вак}} \cdot M \cdot 10^2}{E_{\text{вак}} \cdot \rho} = 0,1 \div 50 \text{ мкм/с}$		
<b>С холодным катодом</b>	<b>С горячим катодом</b>	
		

Ионное распыление		
<p><math>p_{\text{р.г.}} = 10 \div 5 \cdot 10^{-2}</math> Па  <math>T_{\text{пл}} = 293 \div 693</math> К  <math>E = 3 \div 5</math> эВ</p>  $v_{\text{max}} = \frac{3,3 \cdot 10^3 j_{\text{и}} \cdot S \cdot M \cdot F_{\text{з}}}{\rho \cdot d^2} = 10^{-3} \div 0,5 \text{ мкм/с}$		
<b>Ионно-плазменный</b>	<b>Ионно-лучевой</b>	
		
Ионное осаждение		
<p><math>p_{\text{вак}} = 10^{-3} \div 10^{-5}</math> Па  <math>p_{\text{р.г.}} = 10^3 \div 10^{-1}</math> Па  <math>T_{\text{пл}} = 293 \div 493</math> К  <math>E = E_{\text{отп}} \gg 100</math> эВ</p>  $v_{\text{max}} \leq \frac{q_{\text{вак}} \cdot M \cdot 10^2}{E_{\text{отп}} \cdot \rho} = 0,1 \div 50 \text{ мкм/с}$		
<b>Термо-ионный</b>	<b>Ионно-плазменный</b>	<b>Ионно-лучевой</b>
		
<b>Плазмотронный</b>		
		



Химическое осаждение		
$p_{пл.} = 10^5 \div 10^{-1} \text{ Па}$ $T_{пл.} = 293 \div 1793 \text{ К}$ $E = 0,1 \div 10 \text{ эВ}$		
		
$v_{пл.}^{теор.} = 4,58 \cdot 10^4 \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{p} \sqrt{\frac{M_i}{T_{пл.}}} =$ $= 0,01 \div 1 \text{ мкм / с}$		
<b>Из газовой фазы</b>	<b>Плазмо-химический</b>	<b>Электро-химическое</b>
		
Жидкофазное осаждение		
<b>Метод ионного наплавления</b>	<b>Вытягивание из раствора</b>	<b>Золь-гель метод</b>
		
<b>Вращающийся стол</b>	<b>Аэрозоль</b>	<b>Лэнгмюр-Блоджетт</b>
		

Взрыв		
$p_{взак} = 10^3 \div 10^{-5} \text{ Па}$ $T_{пл.} = 293 \text{ К}$ $E = 1 \div 1000 \text{ эВ}$	$p_{взак} = 10^3 \div 10^{-5} \text{ Па}$ $T_{пл.} = 293 \text{ К}$ $E = 1 \div 1000 \text{ эВ}$	$p_{взак} = 10^3 \div 10^{-5} \text{ Па}$ $T_{пл.} = 293 \text{ К}$ $E = 1 \div 1000 \text{ эВ}$
<b>Лазерный</b>	<b>Газотермический</b>	<b>Детонационный и газодинамический</b>
		
Другие странные методы		
<b>Твёрдофазная эпитаксия</b>		
		

**Спасибо за внимание :)**