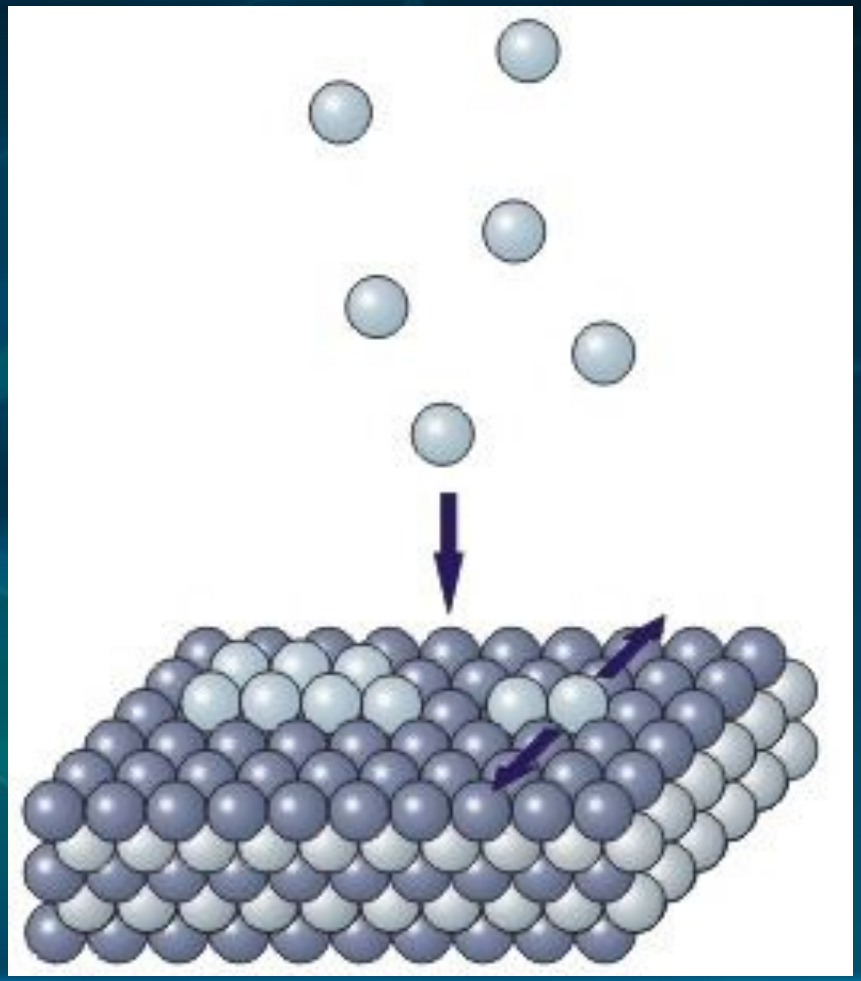
Молекулярно-лучевая эпитаксия

Молекулярно-лучевая эпитаксия

- Молекулярно-лучевая эпитаксия - это процесс синтеза веществ, реакций, потоков атомов молекул и компонентов в сверхвысоком вакууме (~ 10^{-8} - 10^{-9} Па)

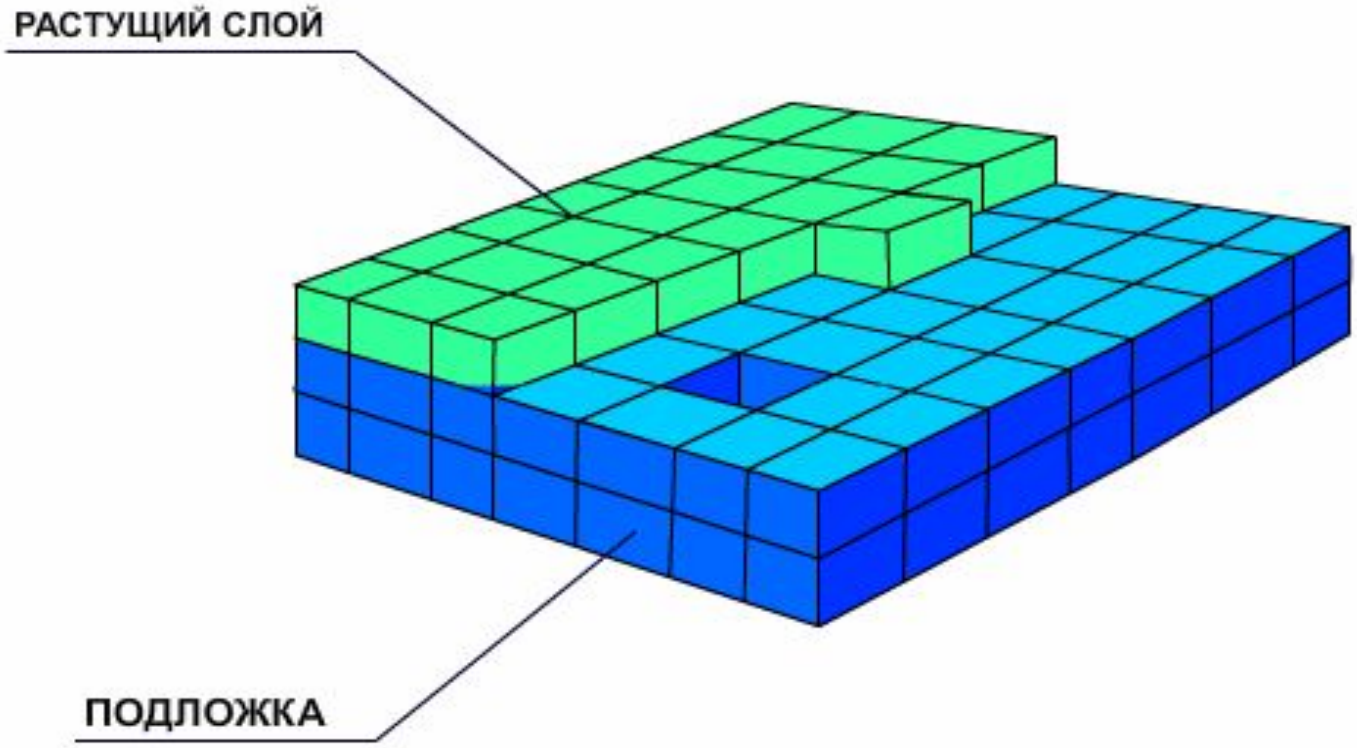


Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок

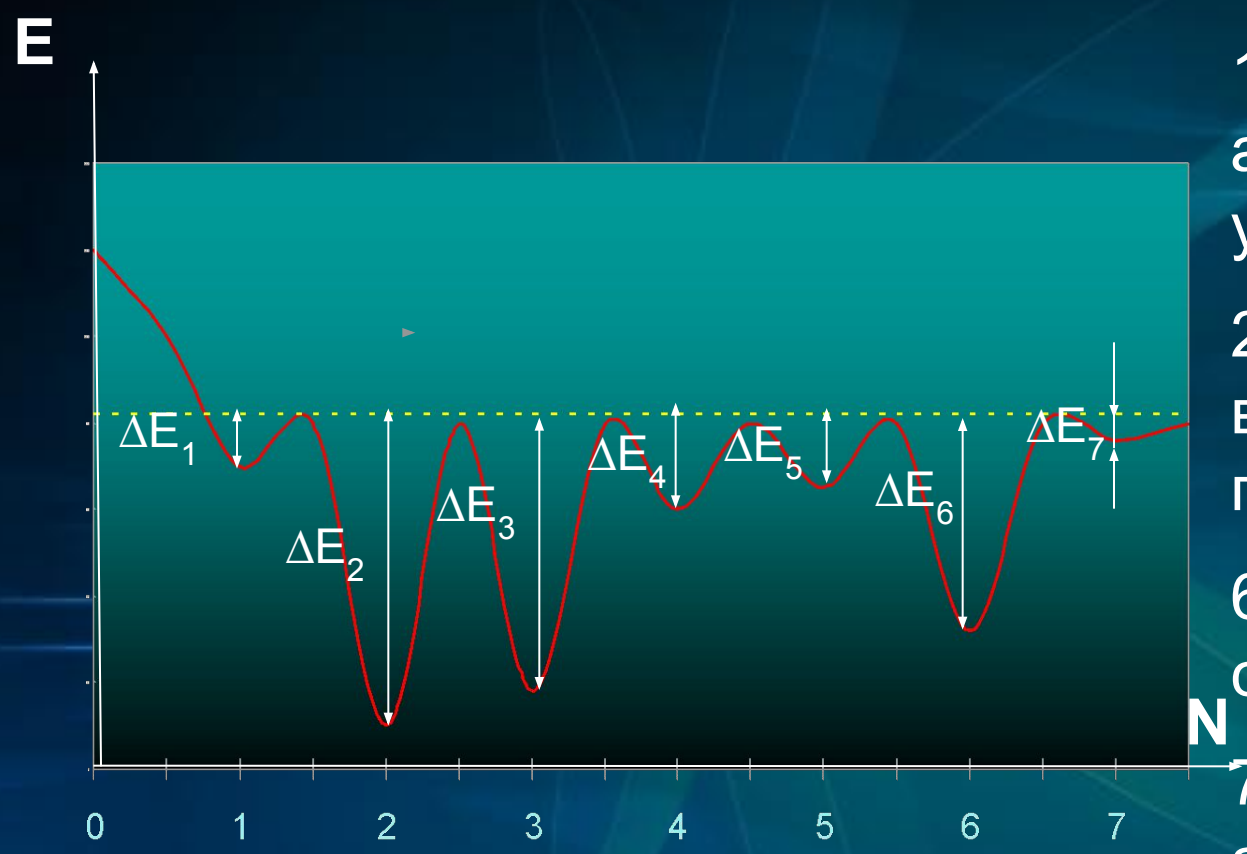
Наиболее важные индивидуальные атомные процессы, сопровождающие эпитаксиальный рост :

- **адсорбция** составляющих атомов или молекул на поверхности подложки;
- поверхностная миграция атомов и диссоциация адсорбированных молекул;
- присоединение атомов к кристаллической решетке подложки или эпитаксиальным слоям, выращенным ранее;
- термическая десорбция атомов или молекул, не внедренных в кристаллическую решетку.

Механизм эпитаксии



Механизм эпитаксии



E – Энергия связи с подложкой

N – номер атома

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

2,3 – атом на месте вакансии в поверхностном слое

6 –атом у излома ступени роста

7 – десорбированный атом

Механизм эпитаксии

- В зависимости от энергии связи (E) с подложкой и её температуры (T) дефекты могут либо мигрировать по поверхности либо переходить в объем Для атомов, адсорбированных на поверхность существует также вероятность испарения в окружающую среду.

Коэфициенты диффузии:

a- постоянная рещетки

$\nu_a = \nu_\upsilon \sim 10^{13}\ c^{-1}$ – линейная частота колебаний адсорбированных атомов и вакансий в положениях равновесия

ΔE_υ, ΔE_a - энергия активации перехода вакансии и атома в соседнее положение равновесия через потенциальный барьер.

вакансии :

$$D_\upsilon = a^2 \nu_\upsilon \exp\left(\frac{-\Delta E_\upsilon}{RT}\right)$$

атома :

$$D_a = a^2 \nu_a \exp\left(\frac{-\Delta E_a}{RT}\right)$$

Механизм эпитаксии

- Время жизни дефекта на поверхности

$$\tau_a = (1/\nu_a) exp\left[\frac{\Delta E'_a}{RT}\right]$$

$$\tau_\upsilon = (1/\nu_\upsilon) \exp\left[\frac{\Delta E'_\upsilon}{RT}\right]$$

$\Delta E'_\upsilon$ – Энергия перехода вакансии с поверхности в объем или наоборот
$\Delta E'_a$ – Энергия испарения адсорбированного атома в окружающую среду

Диффузионная длина дефекта по формуле Эйнштейна

$$L_a = \sqrt{D_a \tau_a} = a \cdot exp\left(\frac{\Delta E'_a - \Delta E_a}{2RT}\right)$$

L_a<a – Диффузия не происходит – атом испаряется
La>a – Возможна диффузия на значительные расстояния и вероятность закрепления атома в наиб. Энергетическом выгодном положении

Эпитаксия **GaAs**

Синтез GaAs осуществляется из молекулярных потоков **Ga и As_2** или Ga и As_4 . Скорость испарения вещества J

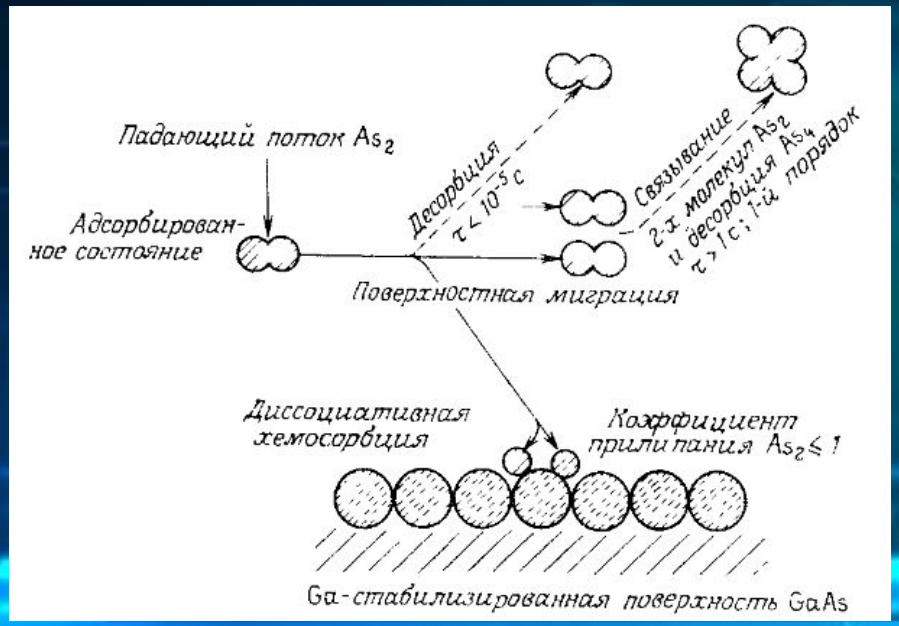
$$J = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

Коэфициент прилипания адсорбированных молекул

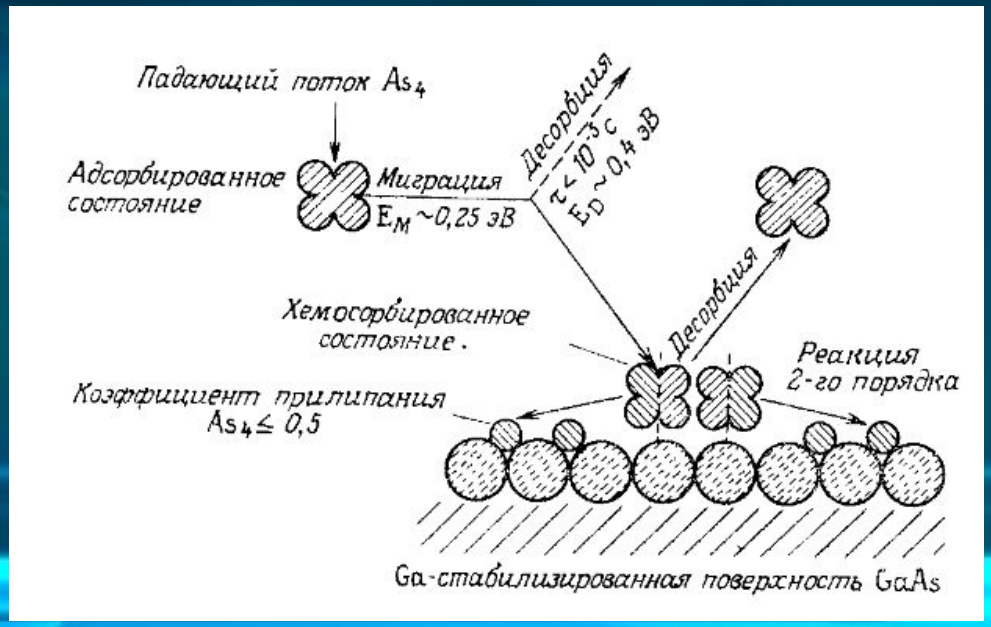
S_{Ga}= 1 при 300K< T<900 K

зависимости от T, K и потока атомов Ga.

Модель роста из пучков **Ga и As_2**



Модель роста из пучков **Ga и As_4**

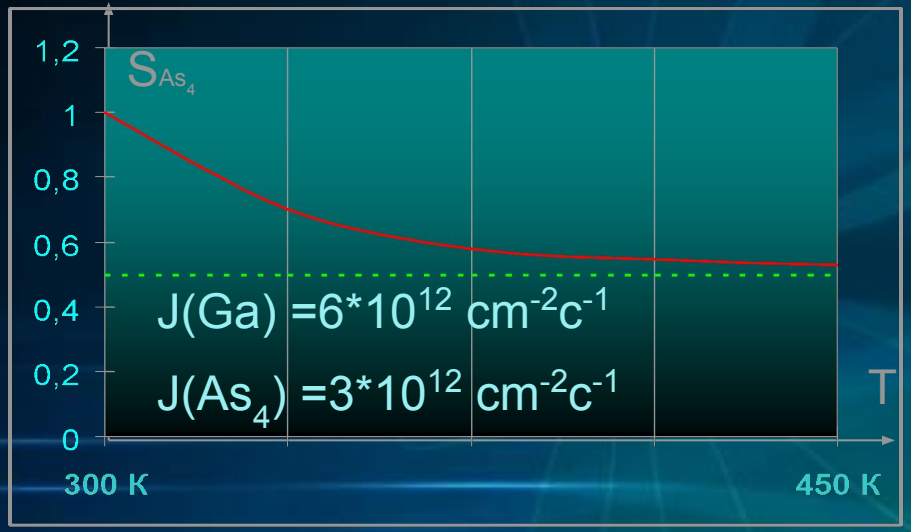


Рост из пучков **Ga** и **As_4** при **300K < T < 450 K**

Химическая адсорбция p(Ga) <<p (As_4)

$0.5 < S_{Ga} < 1$ (налич. св атомов Ga)

$\tau(As_4)_{,c\ Ga}=9.0*10^{-8}\exp[0.38эВ/(kT)]$



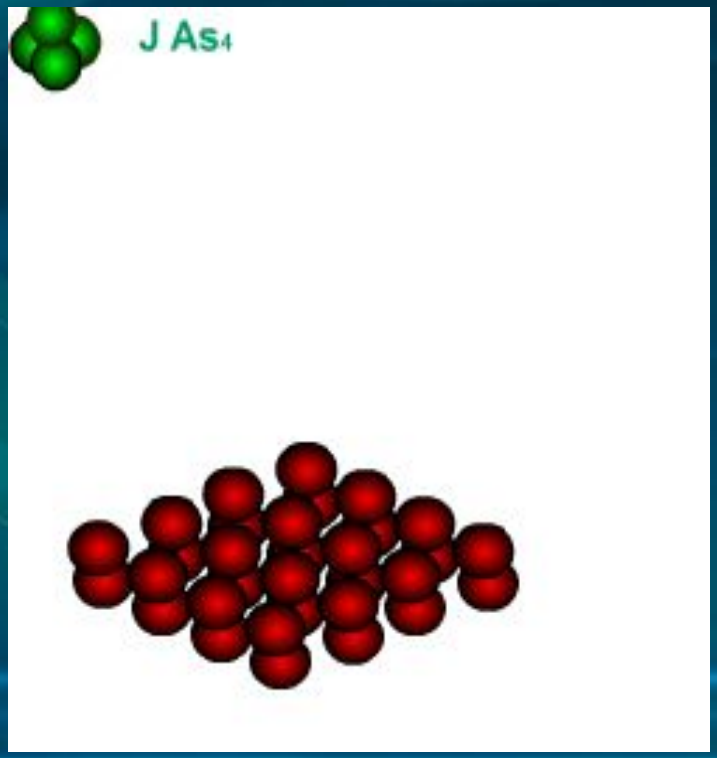
Время жизни дефекта τ(сек)

T, K	Без Ga	с Ga
300	$3.6*10^{-3}$	$0.64*10^{-1}$
450	$2.25*10^{-5}$	$4*10^{-4}$

Физическая адсорбция

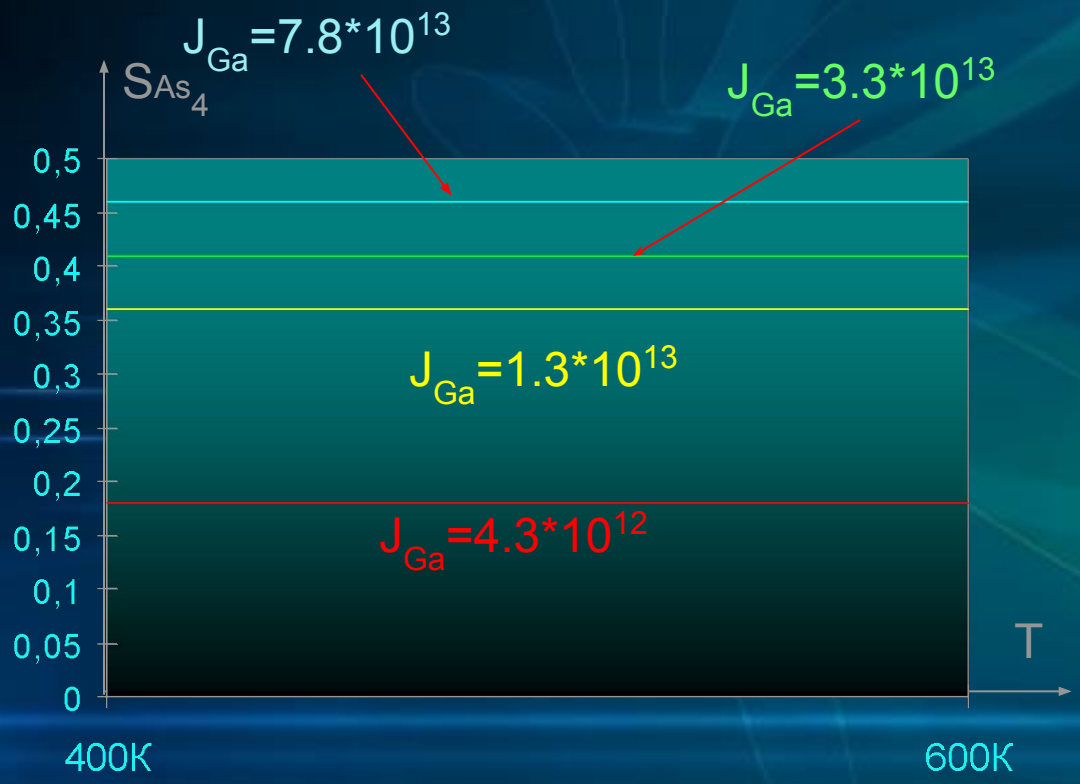
$S(As_4)= 0$ (отсутствие. св атомов Ga)

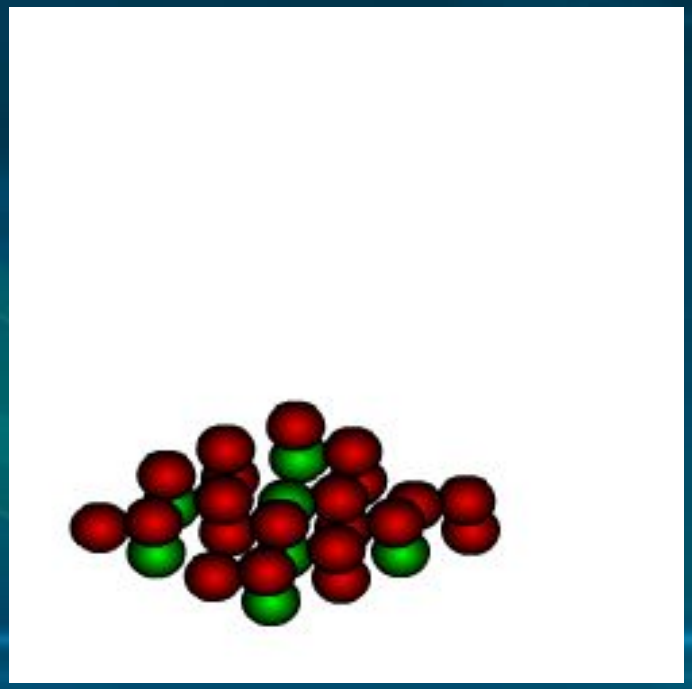
$\tau(As_4)_{,без\ Ga}=9.0*10^{-10}\exp[0.38эВ/(kT)]$



Рост из пучков **Ga** и **As_4** при **400K < T < 600 K**

- При наличии атомов Ga коэфициент прилипания независит от T.
- Если [P_{Ga} >> p (As_4)] то $S(As_4) \leq 0.5$
- Если [p(Ga) << p (As_4)] то обеспечивается стехиометрия растущей пленки,то есть один атом As взаимодействует с атомом одним атомом Ga.





Рост из пучков **Ga** и **As_4** при **600** К **<** Т **<** **900** К

В интервале 600 К <Т < 900 К - 0<$S(As_4)$ <0.5, если нет потока Ga. При Т> 600К дополнительно возникает десорбция As_2 с поверхности GaAs. Это приводит к появлению на поверхности свободных атомов Ga.

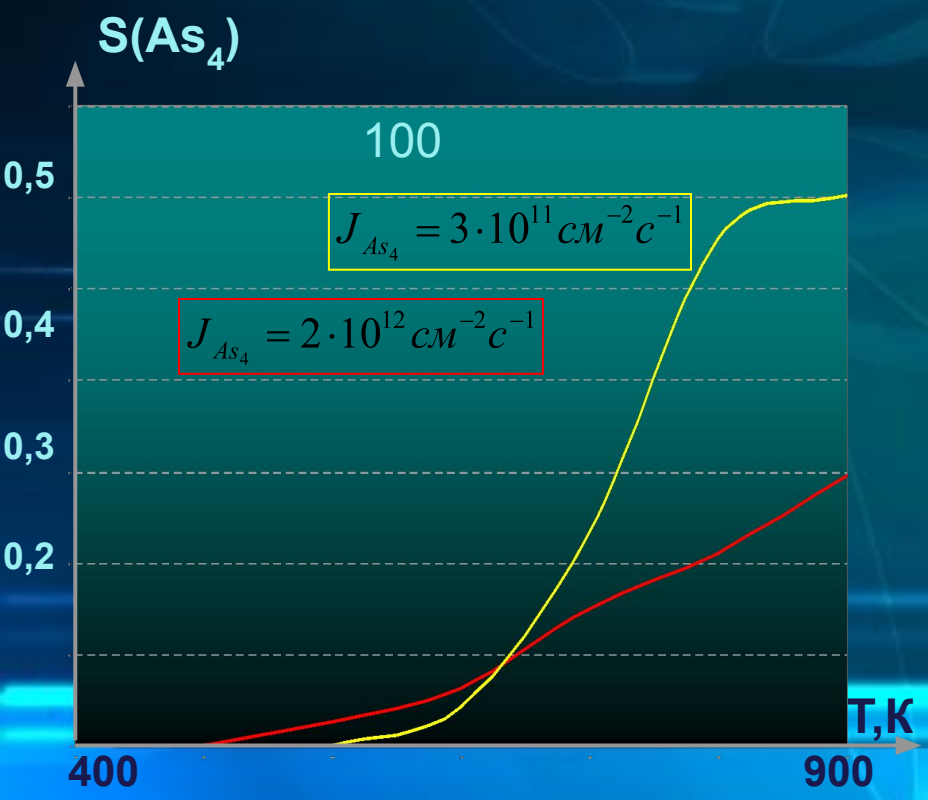
$GaAs(тв) \rightarrow Ga_s + As_s + V_{Ga} + V_{as}$

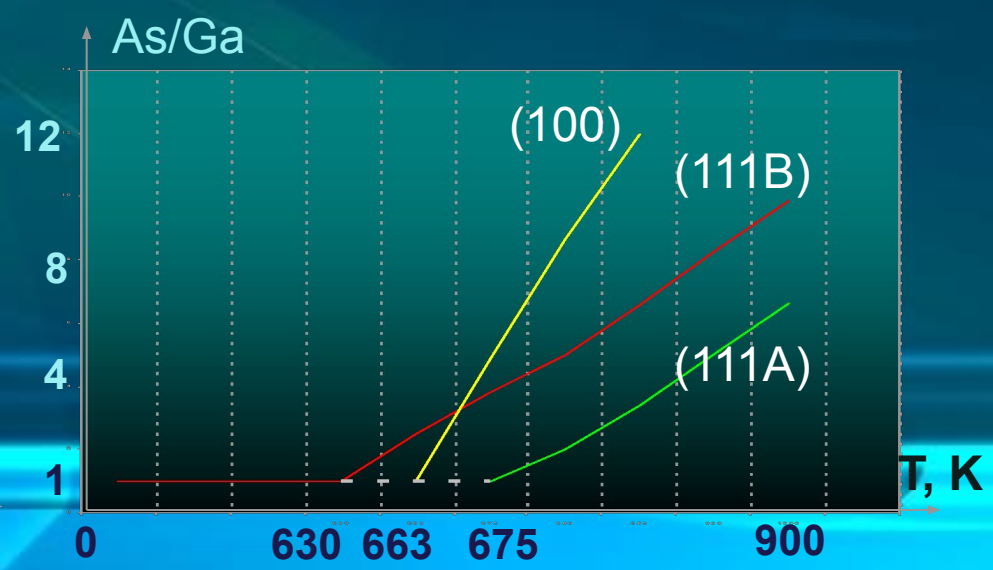
$2As_s \rightarrow As_s$ (объединение) ;

$2As_s \rightarrow As$ (газ)

$Ga_s \rightarrow Ga$ (газ) ;

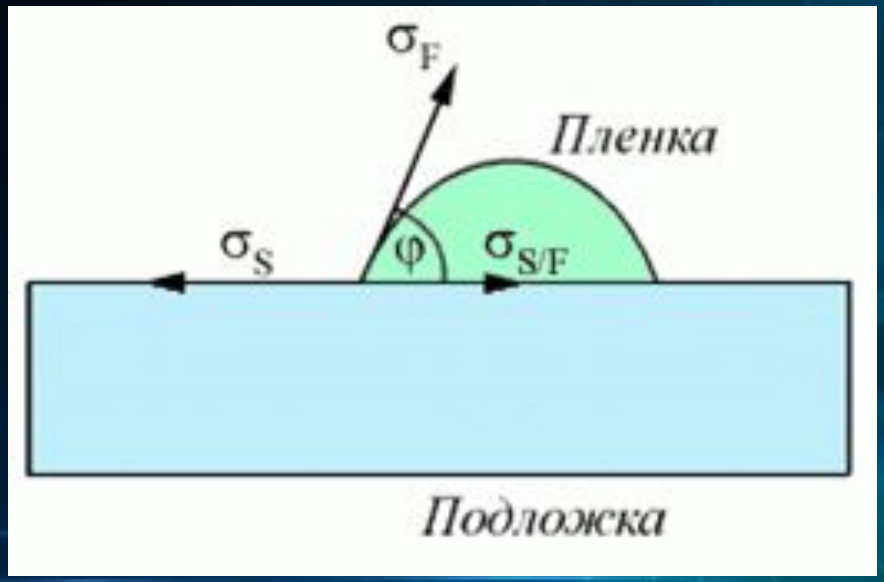
$Ga_s \rightarrow Ga$ (капли)





Модель трехмерного островка пленки

При равновесии для любого элемента длины линии соприкосновения подложки, трехмерного островка пленки и вакуума справедливо уравнение:



$$\sigma_s = \sigma_{S/F} + \sigma_F \cos\varphi$$

, где

σ_s – поверхностное натяжение подложки,

$\sigma_{s/F}$ -поверхностное натяжение на границе раздела подложка-островок

σ_F - поверхностное натяжение на границе раздела островок-вакуум

ϕ – краевой угол.

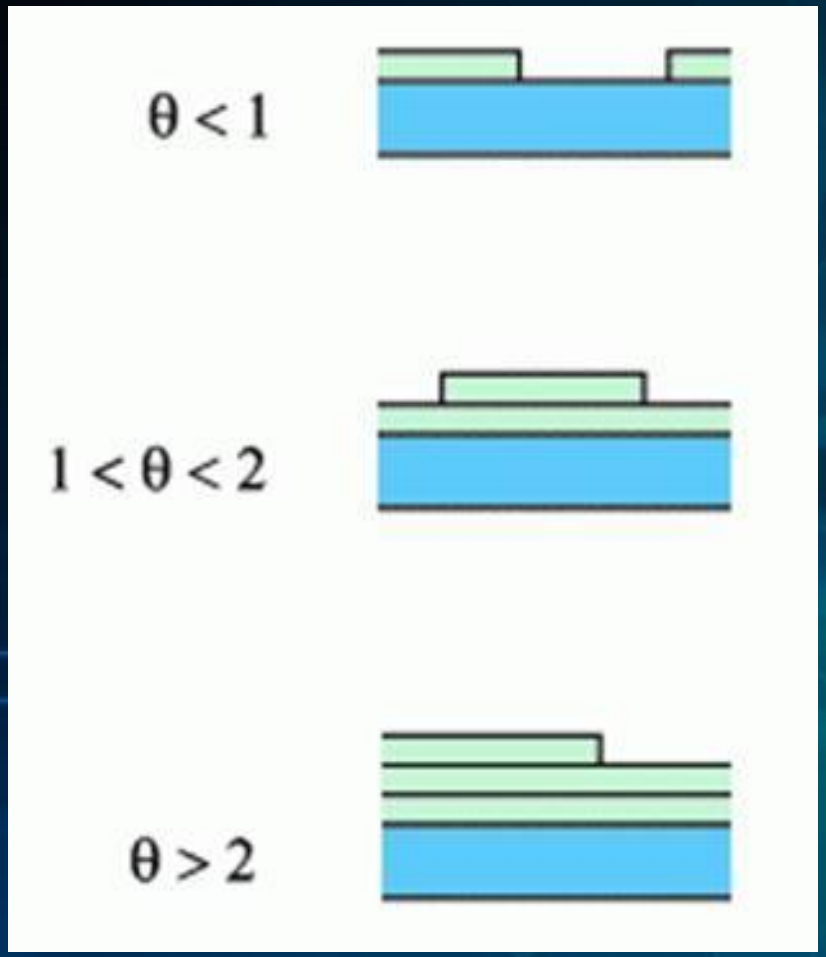
Если $\phi=0$, то островок “растекается” тонким слоем по поверхности подложки, что соответствует слоевому механизму роста , тогда

$$\sigma_s \geq \sigma_{S/F} + \sigma_F$$

Если $\phi>0$, то возникает островковый механизм роста, при котором

$$\sigma_s < \sigma_{S/F} + \sigma_F$$

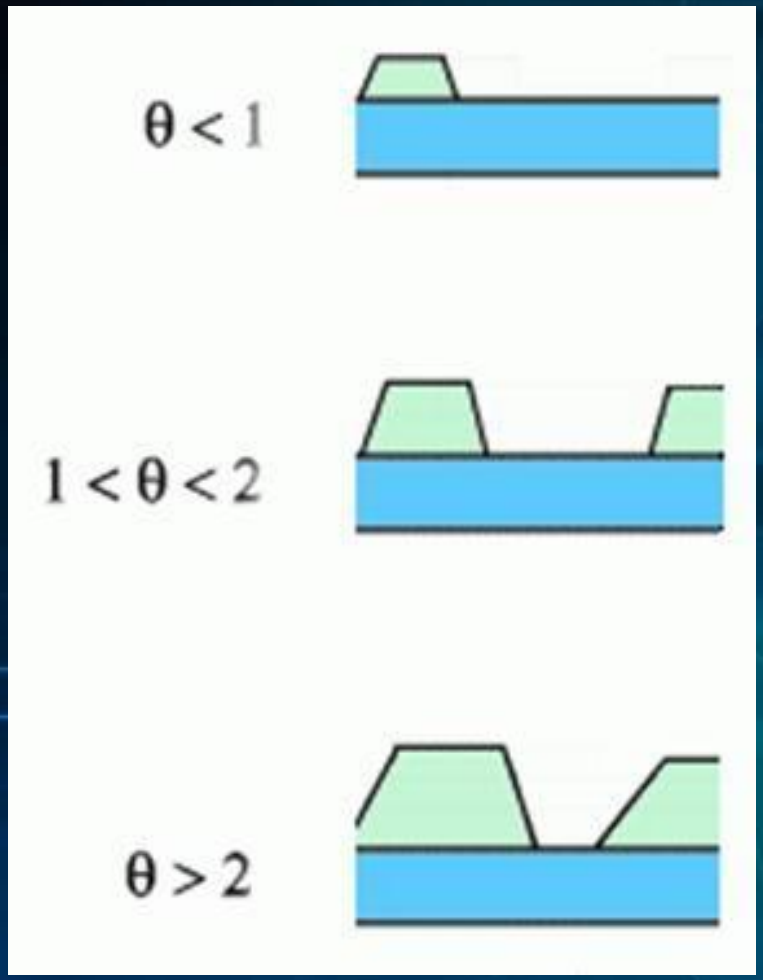
Послойный рост



θ – число монослоев пленки

- Послойный рост (layer-by-layer growth). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного завершения роста предыдущего слоя. Этот механизм роста называют также ростом Франка-ван дер Мерве (Frank-van der Merve, FM). Послойный рост имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов значительно больше, чем между ближайшими атомами в слое.

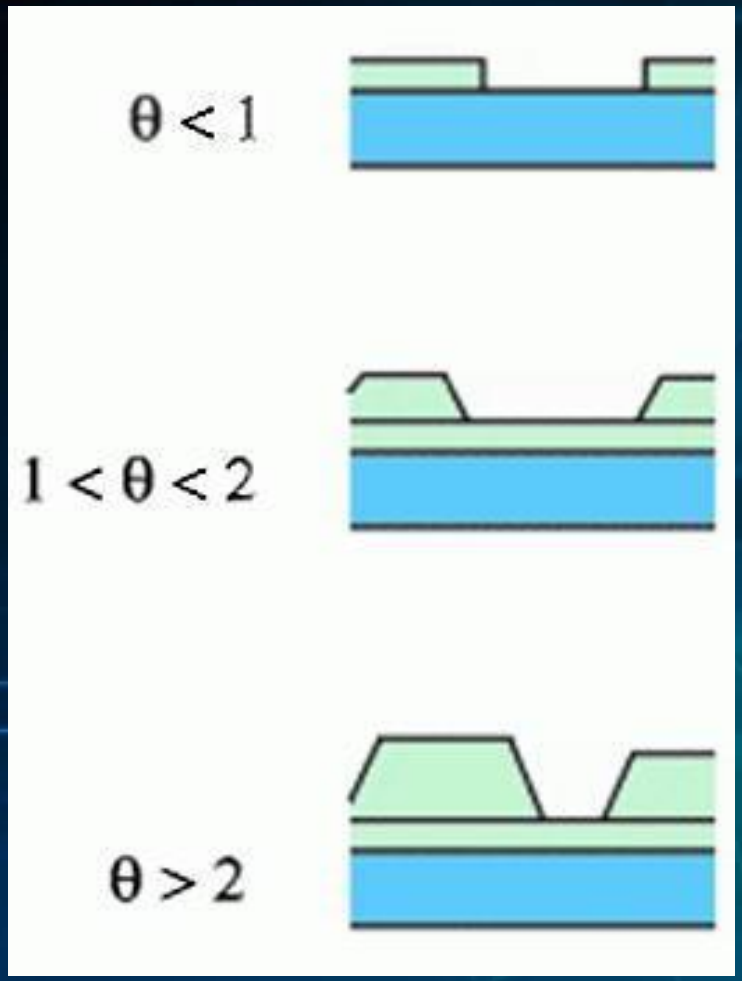
Островковый рост



θ – число монослоев пленки

- Островковый рост или рост Вольмера-Вебера (island growth, Vollmer-Weber, VW). Этот механизм является полной противоположностью послойному росту. Условием его реализации является преобладание взаимодействия между ближайшими атомами над взаимодействием этих атомов с подложкой. При островковом механизме роста вещество с самого начала оседает на поверхности в виде многослойных конгломератов атомов.

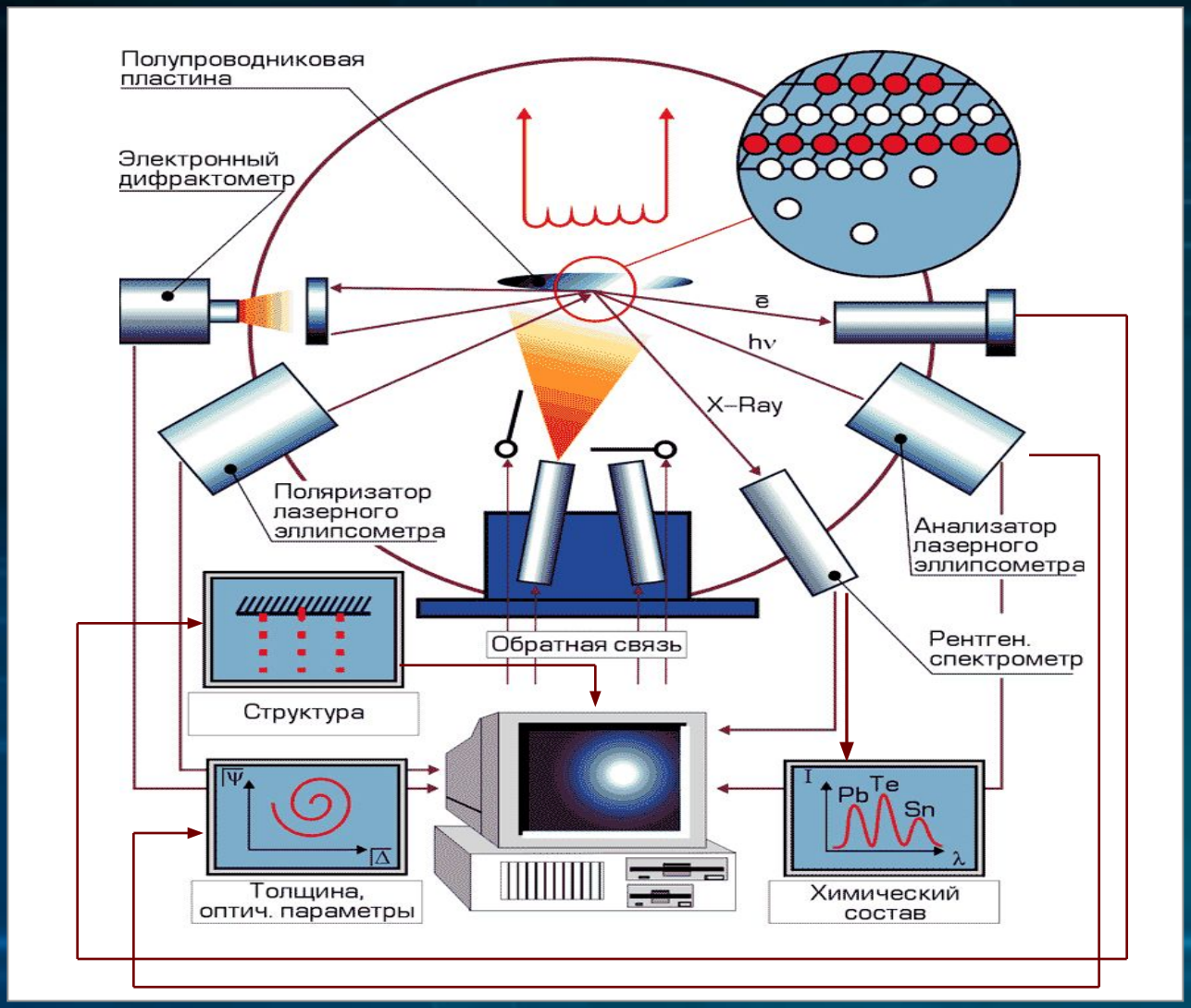
Рост Странски-Крастанова



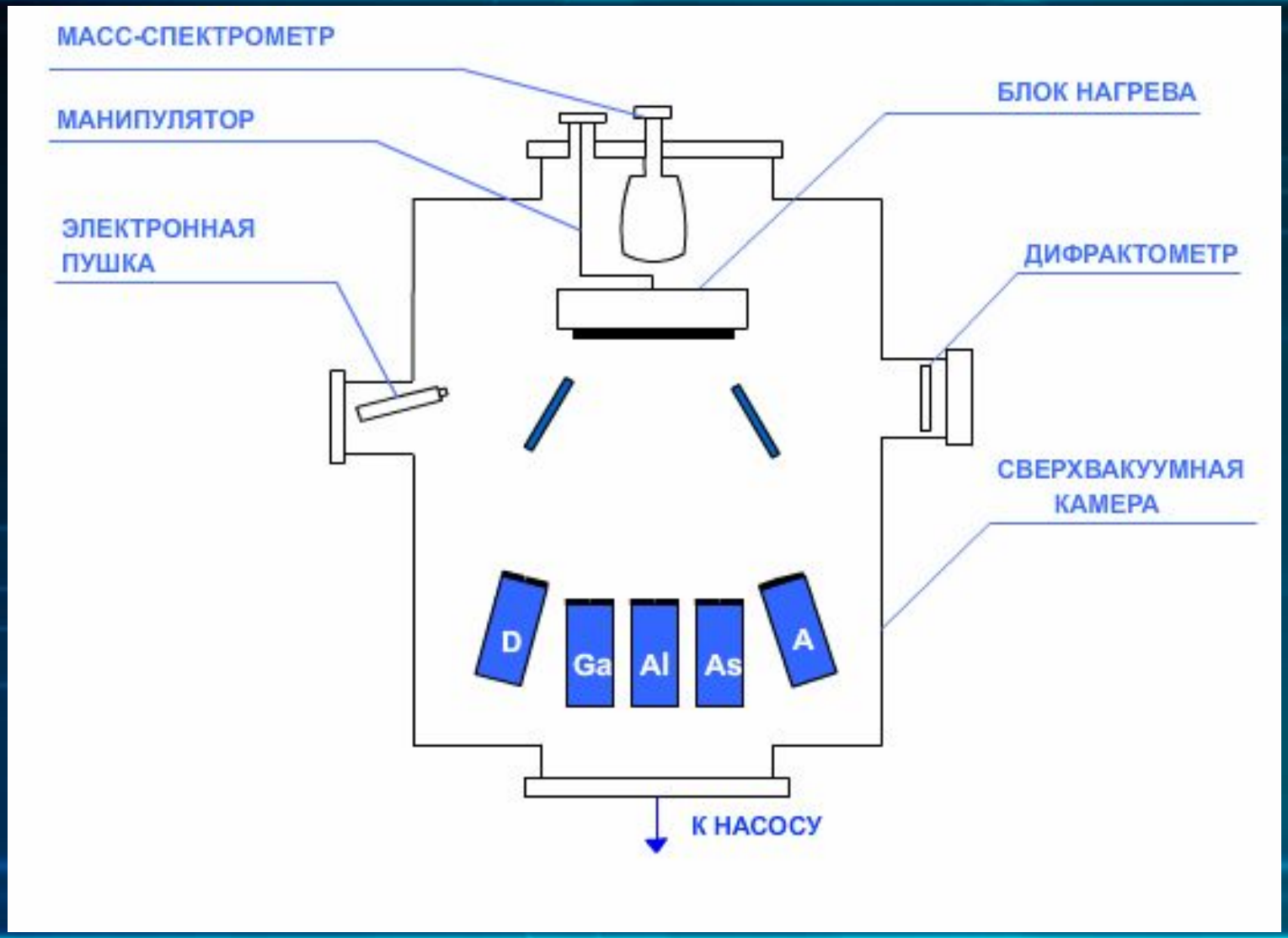
θ – Число монослоев пленки

- Промежуточным между этими двумя механизмами является рост Странски-Крастанова (Stransky-Krastanov, SK, layer-plus-islandgrows), при котором первый слой полностью покрывает поверхность подложки, а на нем происходит рост трехмерных островков пленки. К этому механизму могут приводит многие факторы, в частности достаточно большое несоответствие между параметрами кристаллических решеток пленки и подложки.

Схематичное изображение установки М.Л.Э



Схематичная установка МЛЭ



Описание установки

- Испарение материалов, осаждаемых в сверхвысоком вакууме на подложку, закрепленную на манипуляторе с нагревательным устройством, осуществляется с помощью эффузионных ячеек.
- Ростовые камеры современных установок оборудованы квадрупольным масс-спектрометром для анализа остаточной атмосферы в камере и контроля элементного состава на всем технологическом процессе. Для контроля структуры и морфологии формируемых эпитаксиальных структур в камере роста располагается также дифрактометр отраженных быстрых электронов. Дифрактометр состоит из электронной пушки, которая формирует хорошо сфокусированный электронный пучок с энергий 10 – 40 кэВ. Электронный луч падает на подложку под очень небольшим углом к ее плоскости, рассеянные электронные волны дают дифракционную картину на люминесцентном экране. Часто ростовые камеры или в многокамерных комплексах МЛЭ в камере для подготовки и анализа подложек и эпитаксиальных структур располагаются электронная пушка с энергоанализатором вторичных электронов и ионная пушка для очистки подложек ионным травлением и послойного анализа состава эпитаксиальных структур.