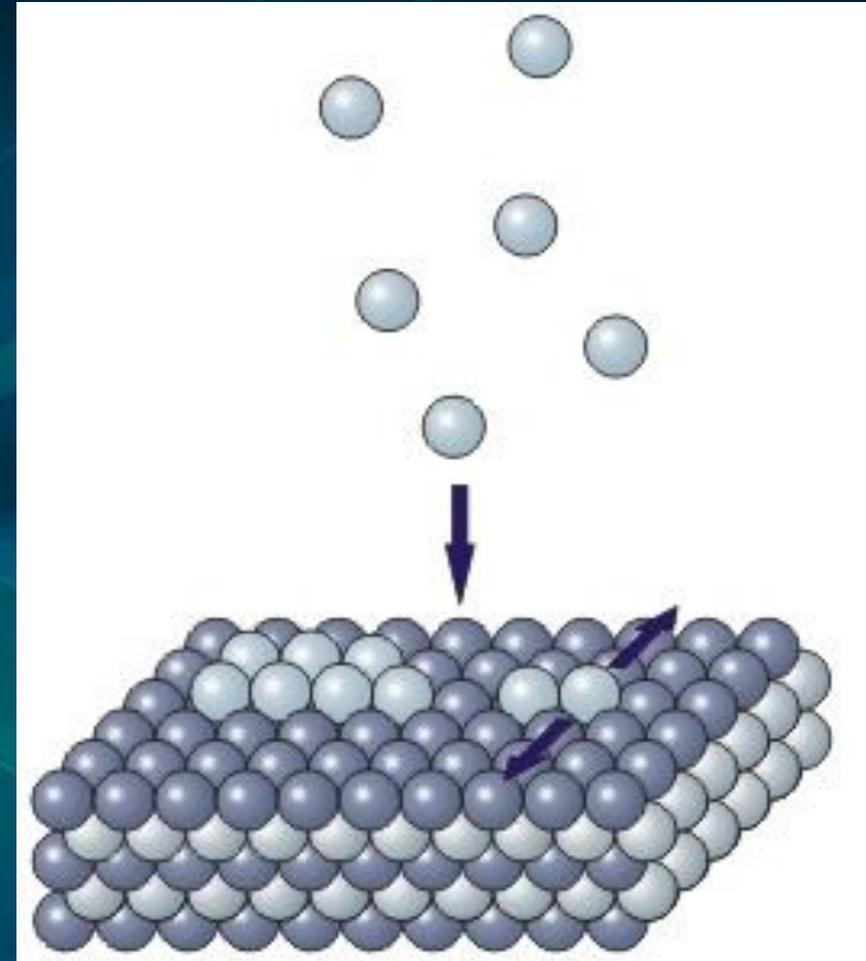


The background features a dark blue gradient with a central, glowing blue flower-like graphic. The flower has several petals, some of which are highlighted with bright blue light. Two prominent horizontal glowing lines, one above and one below the text, intersect the flower's petals. The overall aesthetic is futuristic and scientific.

Молекулярно-лучевая эпитаксия

Молекулярно-лучевая эпитаксия

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



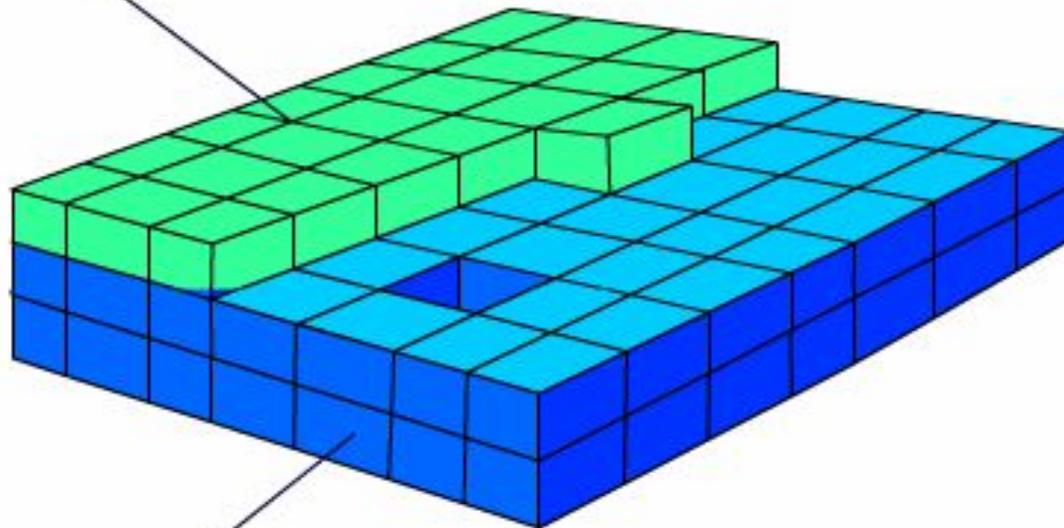
Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок

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.

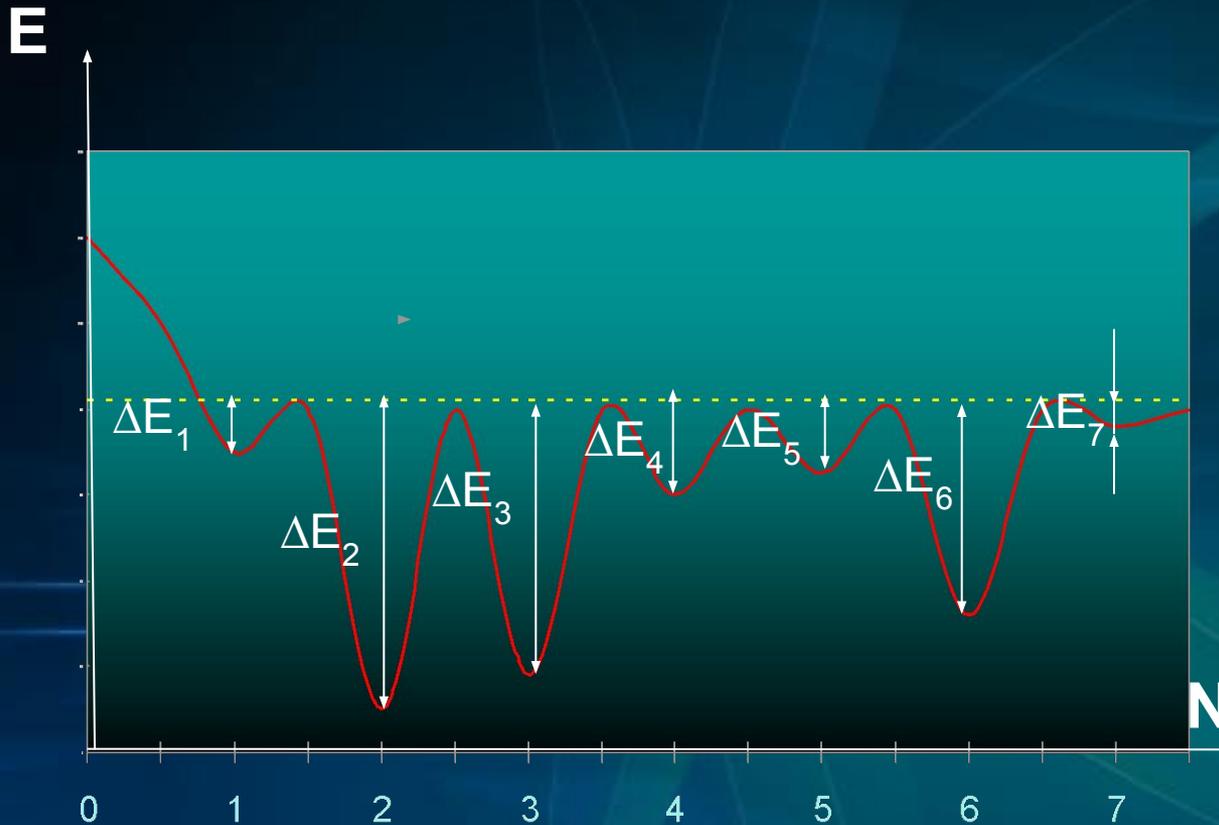
Механизм эпитаксии

РАСТУЩИЙ СЛОЙ



ПОДЛОЖКА

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.

Коэффициенты диффузии:

a - постоянная решетки

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

$\Delta E_v, \Delta E_a$ - энергия активации перехода вакансии и атома в соседнее положение равновесия через потенциальный барьер.

вакансии :

$$D_v = a^2 \nu_v \exp\left(\frac{-\Delta E_v}{RT}\right)$$

атома :

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

Механизм эпитаксии

- Время жизни дефекта на поверхности

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

$$\tau_v = (1/v_v) \exp\left[\frac{\Delta E'_v}{RT}\right]$$

$\Delta E'_v$ – 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

$L_a > a$ – Возможна диффузия на значительные расстояния и вероятность закрепления атома в наиб. Энергетическом выгодном положении

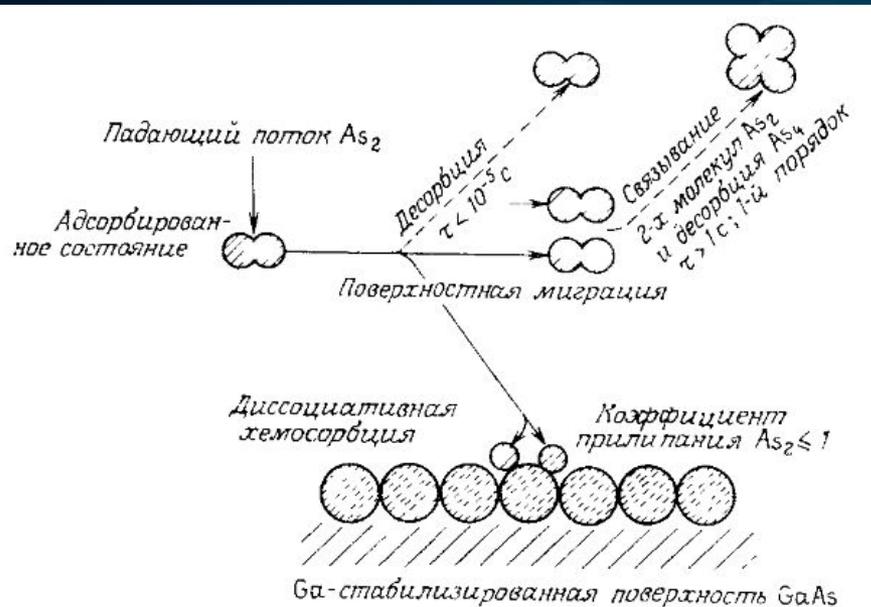
Эпитаксия GaAs

Синтез GaAs осуществляется из молекулярных потоков Ga и As₂ или Ga и As₄. Скорость испарения вещества J

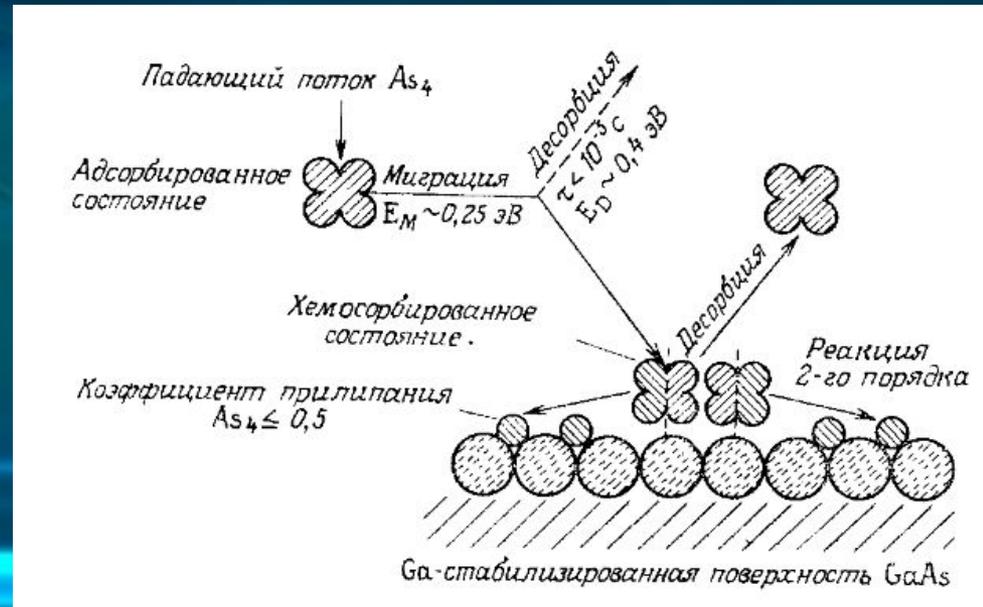
$$J = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

Коэффициент прилипания адсорбированных молекул $S_{Ga} = 1$ при $300K < T < 900 K$ в зависимости от T, K и потока атомов Ga.

Модель роста из пучков Ga и As₂



Модель роста из пучков Ga и As₄

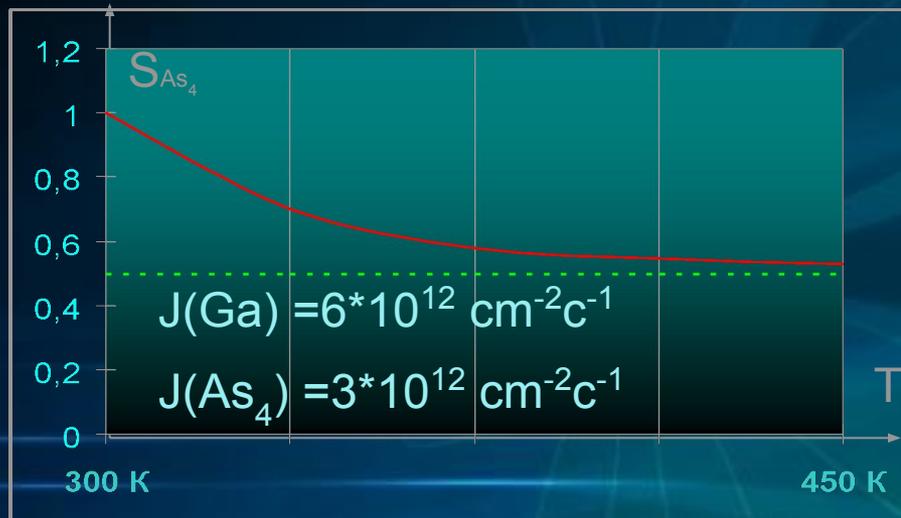


Рост из пучков Ga и As₄ при 300K < T < 450 K

Химическая адсорбция $\rho(\text{Ga}) \ll \rho(\text{As}_4)$

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

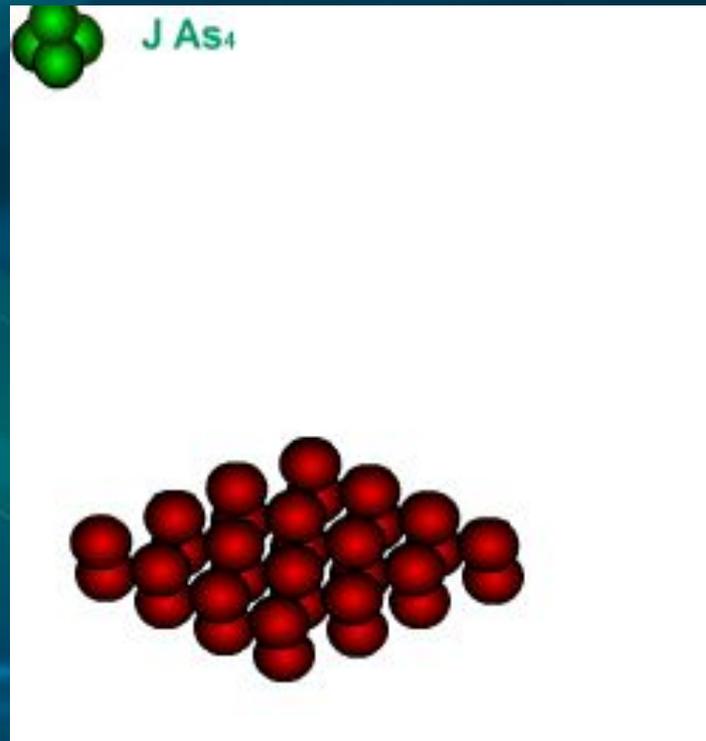
$$\tau(\text{As}_4)_{\text{с Ga}} = 9.0 \cdot 10^{-8} \exp[0.38 \text{эВ}/(kT)]$$



Физическая адсорбция

$S(\text{As}_4) = 0$ (отсутствие. св атомов Ga)

$$\tau(\text{As}_4)_{\text{без Ga}} = 9.0 \cdot 10^{-10} \exp[0.38 \text{эВ}/(kT)]$$

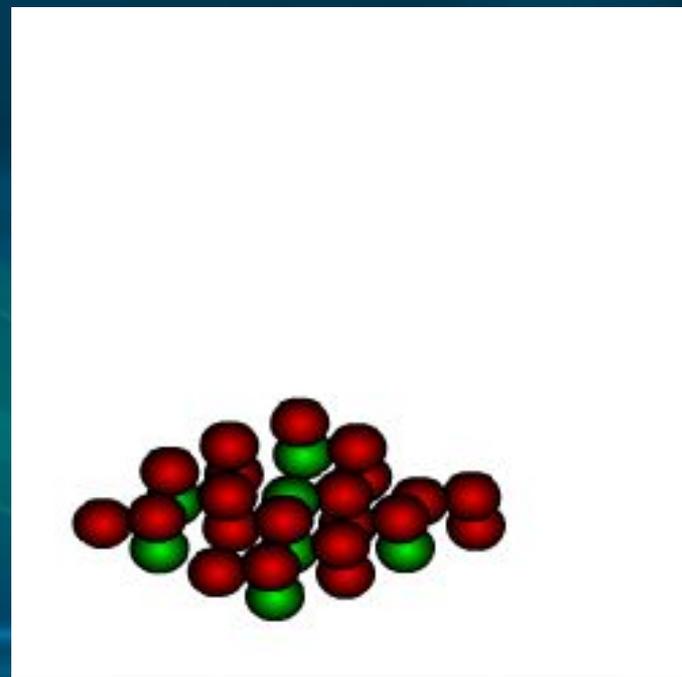
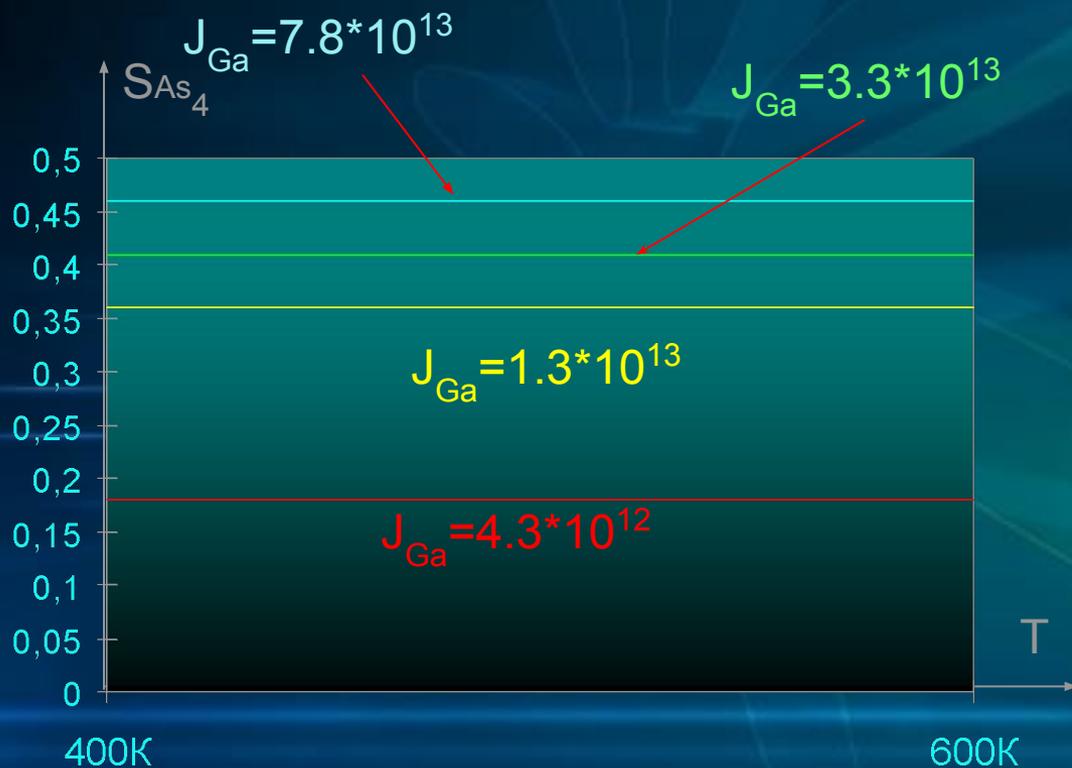


Время жизни дефекта τ (сек)

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

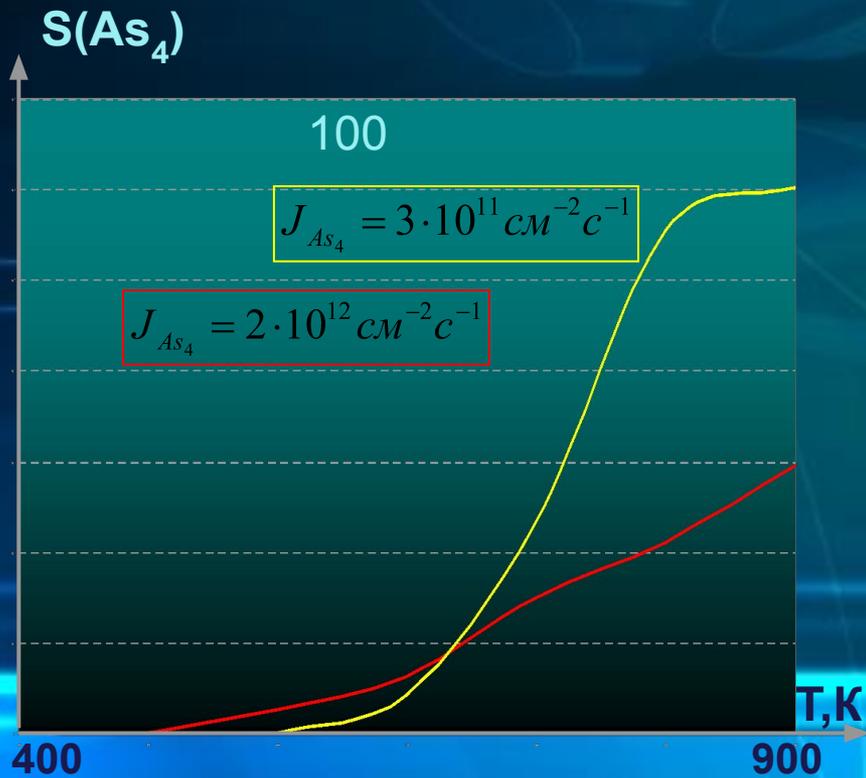
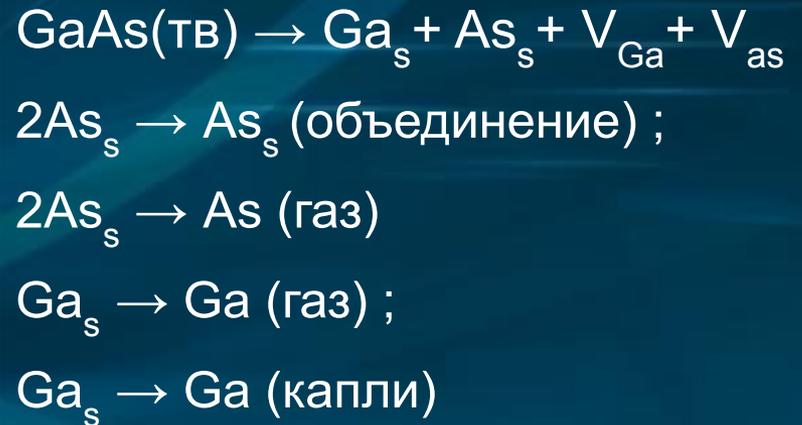
Рост из пучков Ga и As₄ при 400K < T < 600 K

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



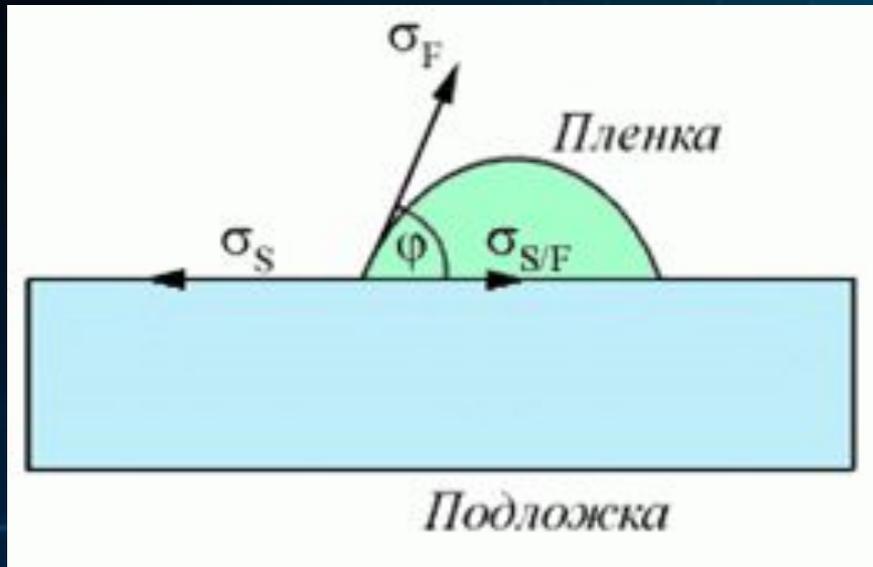
Рост из пучков **Ga** и **As₄** при **600 К < T < 900 К**

В интервале 600 К < T < 900 К - $0 < S(\text{As}_4) < 0.5$, если нет потока Ga. При T > 600К дополнительно возникает десорбция **As₂** с поверхности **GaAs**. Это приводит к появлению на поверхности свободных атомов **Ga**.



Модель трехмерного островка пленки

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



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

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.

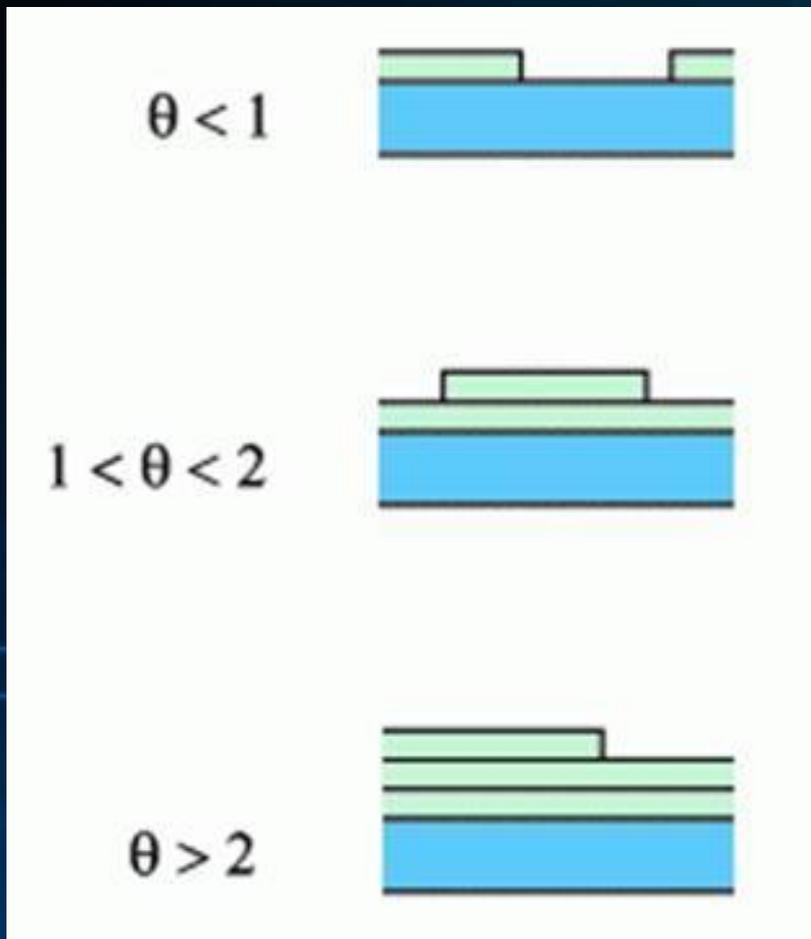
Если $\varphi=0$, то островок “растекается” тонким слоем по поверхности подложки, что соответствует слоевому механизму роста, тогда

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

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

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

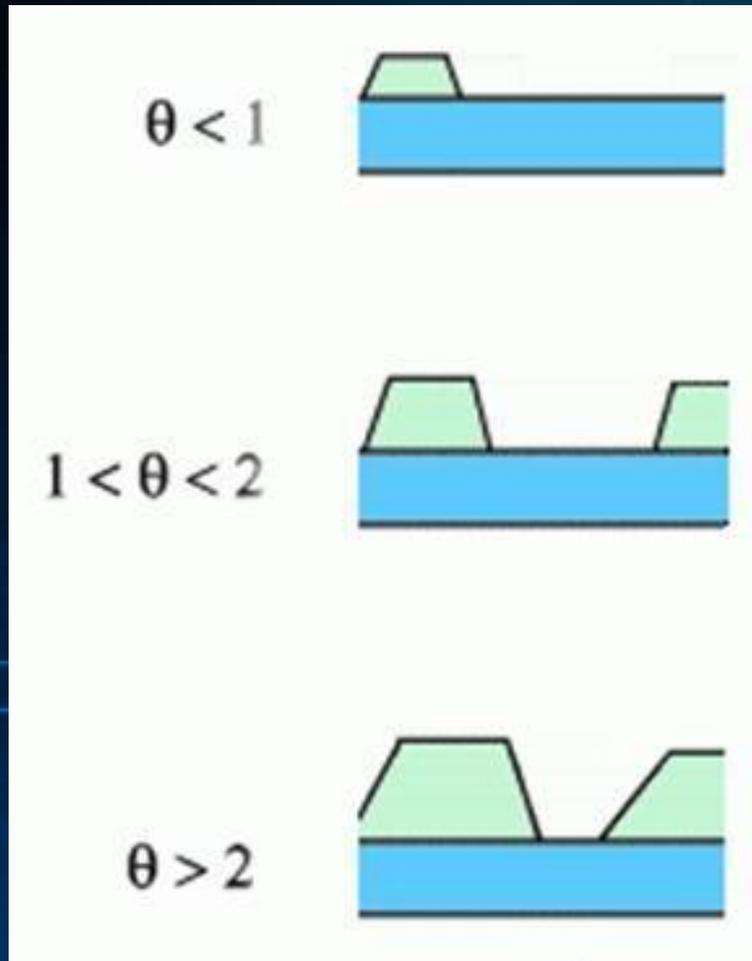
Послойный рост



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.

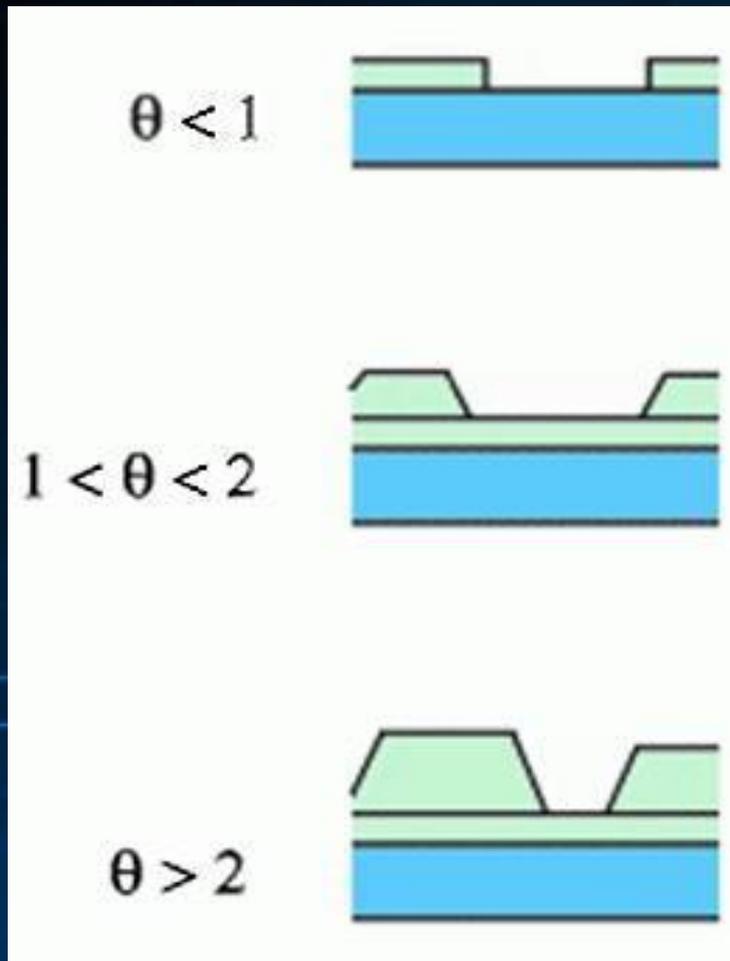
Островковый рост



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.

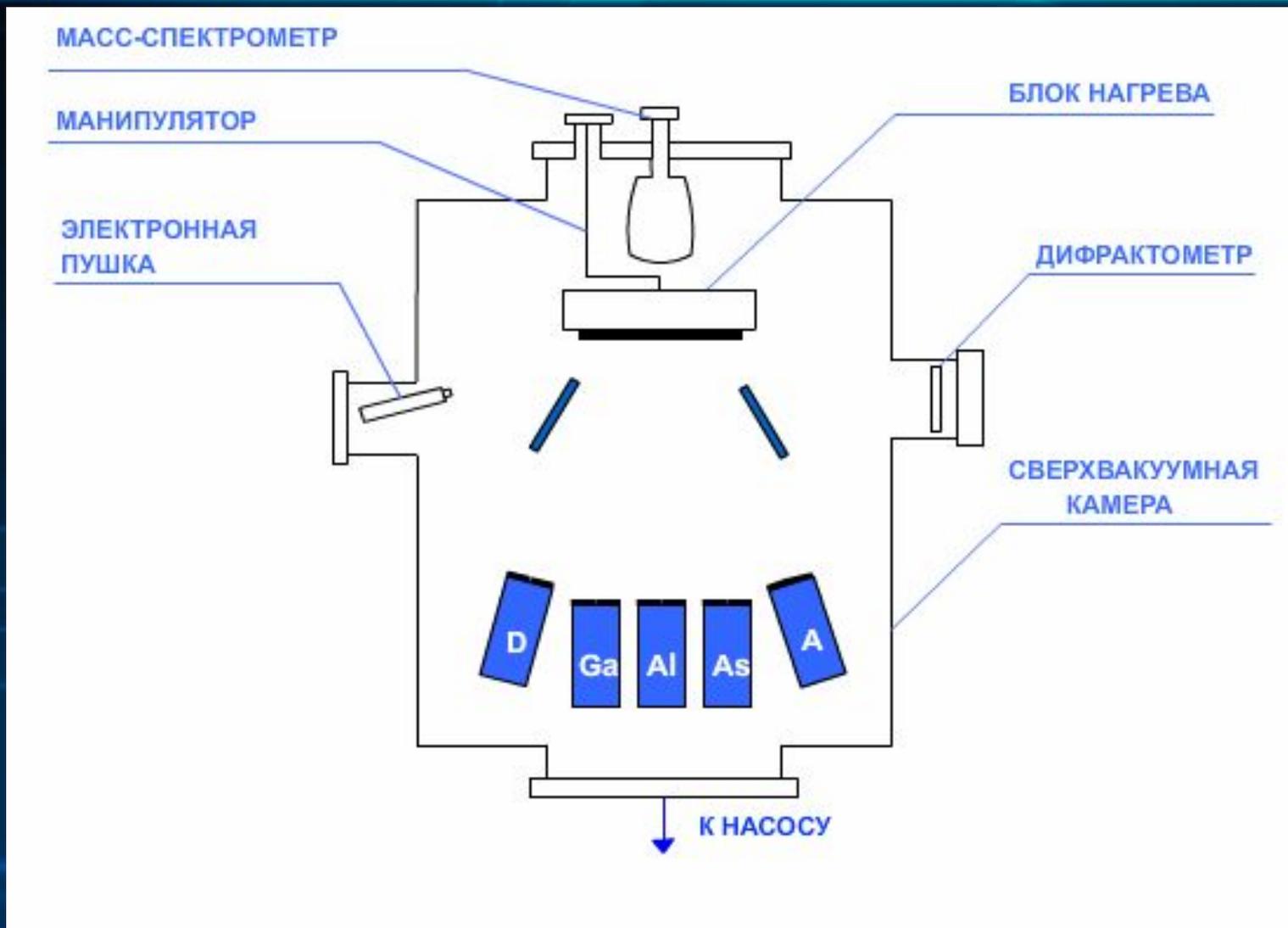
Рост Странски-Крастанова



- 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 приводить многие факторы, в частности достаточно большое несоответствие между параметрами кристаллических решеток пленки и подложки.

θ – Число монослоев пленки

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 энергией 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.