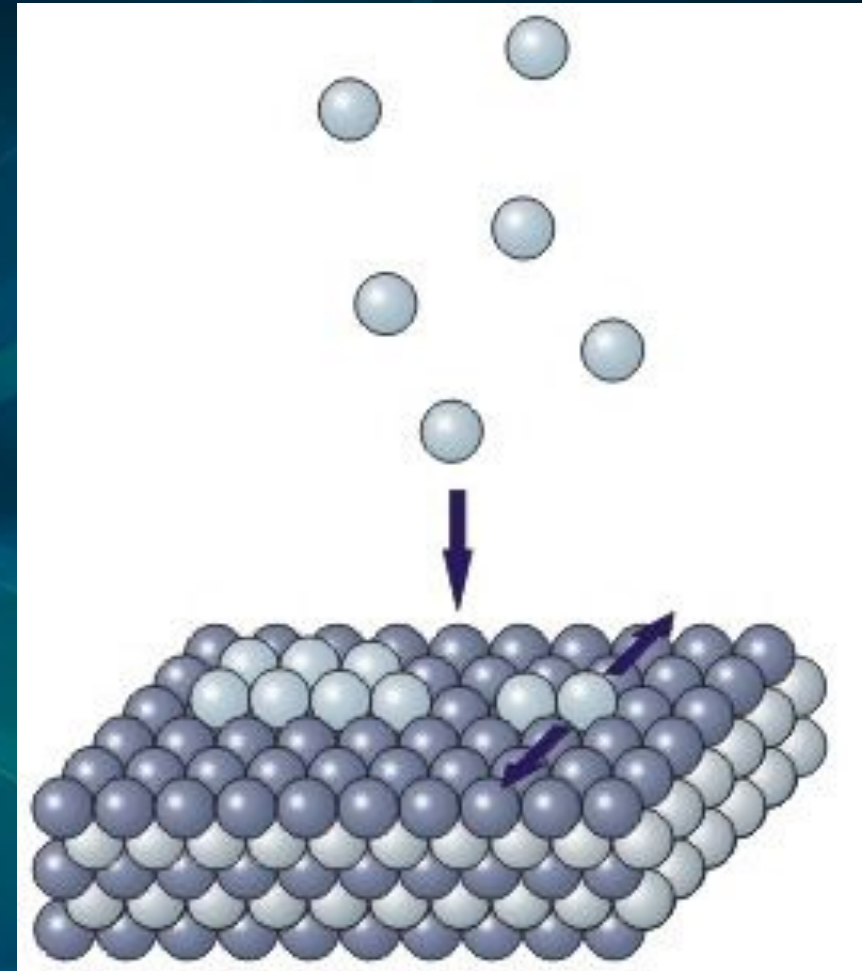


The background features a dark blue gradient with a central, glowing blue flower-like graphic. The flower has several petals and a central stem, all rendered in a semi-transparent, glowing blue color. Two prominent, bright blue horizontal lines cross the image, one above and one below the text, adding a dynamic, futuristic feel.

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)



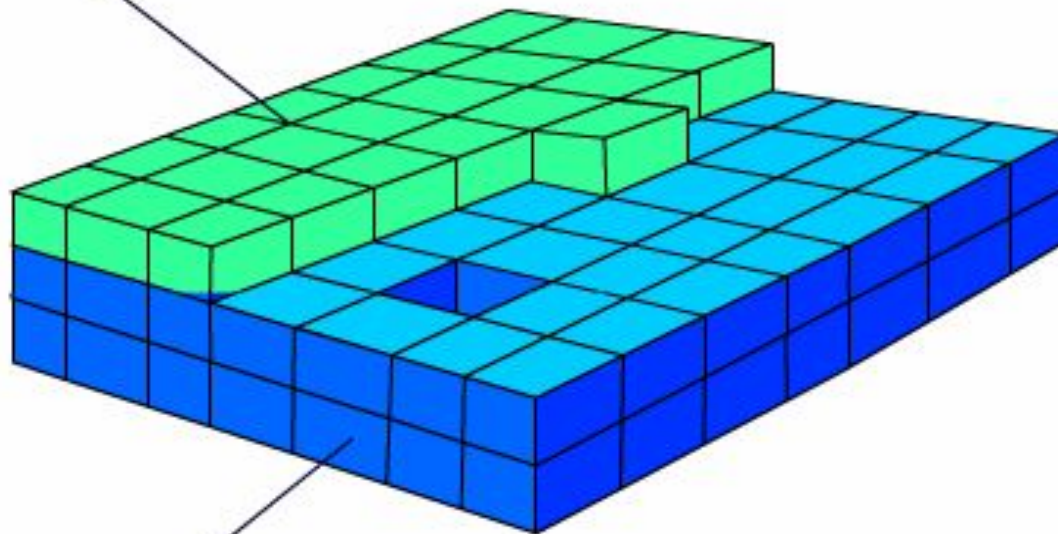
Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок

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.

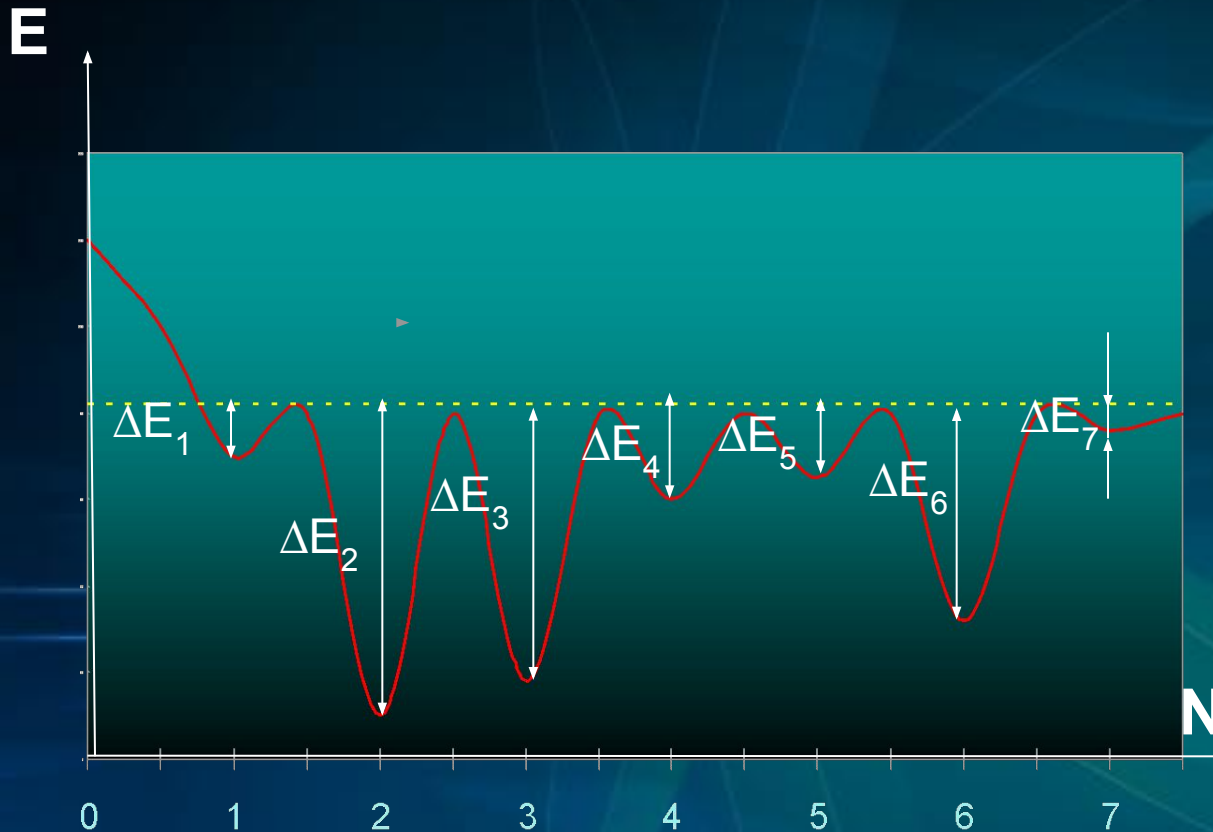
Механизм эпитаксии

РАСТУЩИЙ СЛОЙ



ПОДЛОЖКА

Механизм эпитаксии



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

E – Энергия связи с подложкой

N – номер атома

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

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

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

$\Delta E'_v$ – 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

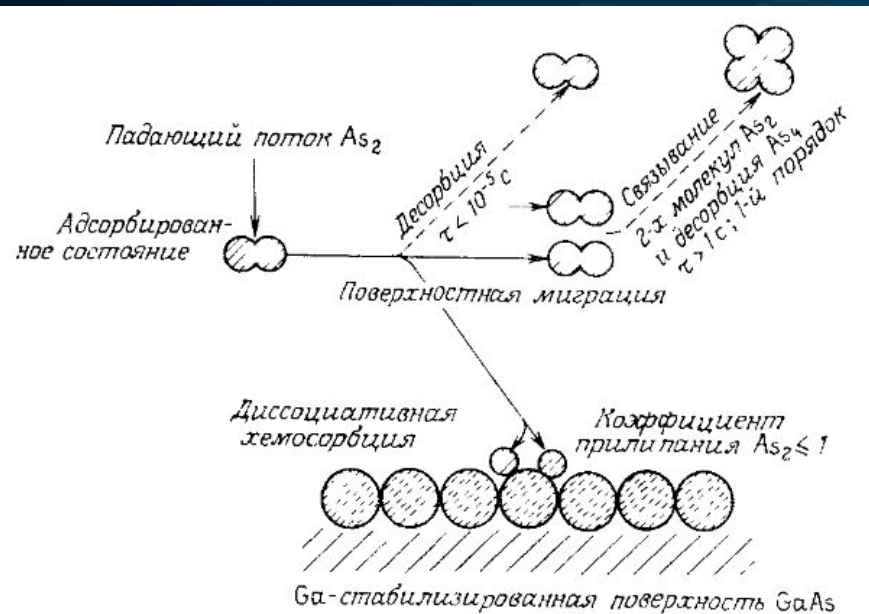
Эпитаксия GaAs

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

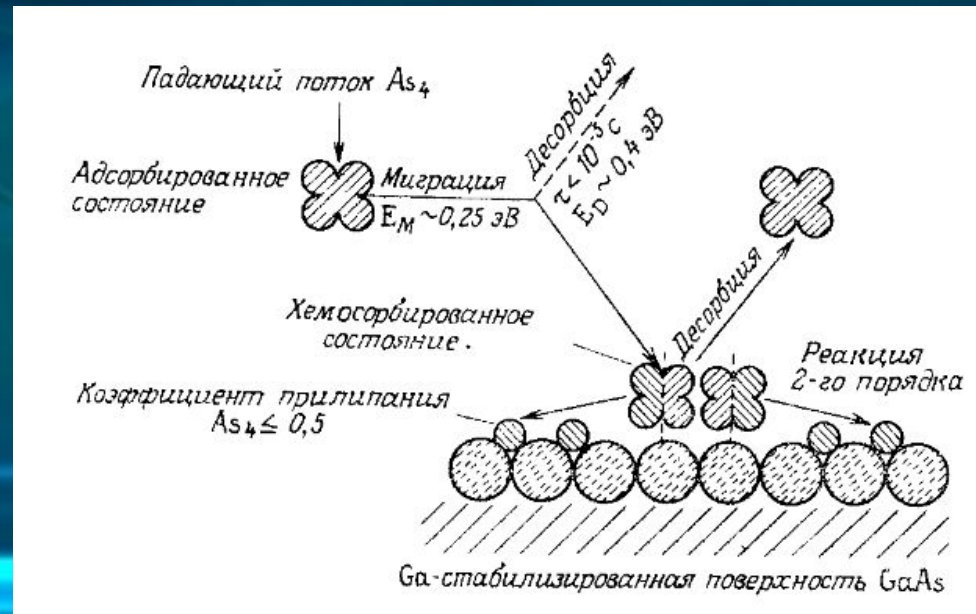
$$J = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

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

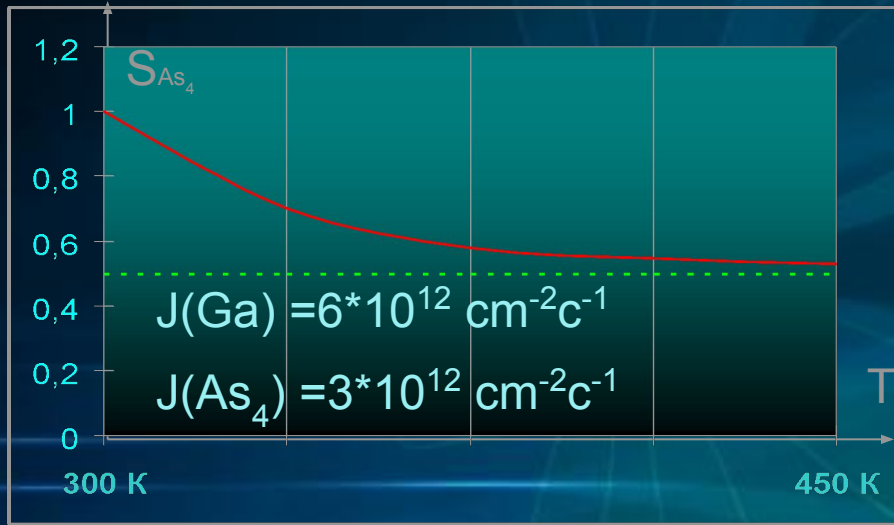


Рост из пучков Ga и As₄ при 300K < T < 450 K

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

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

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



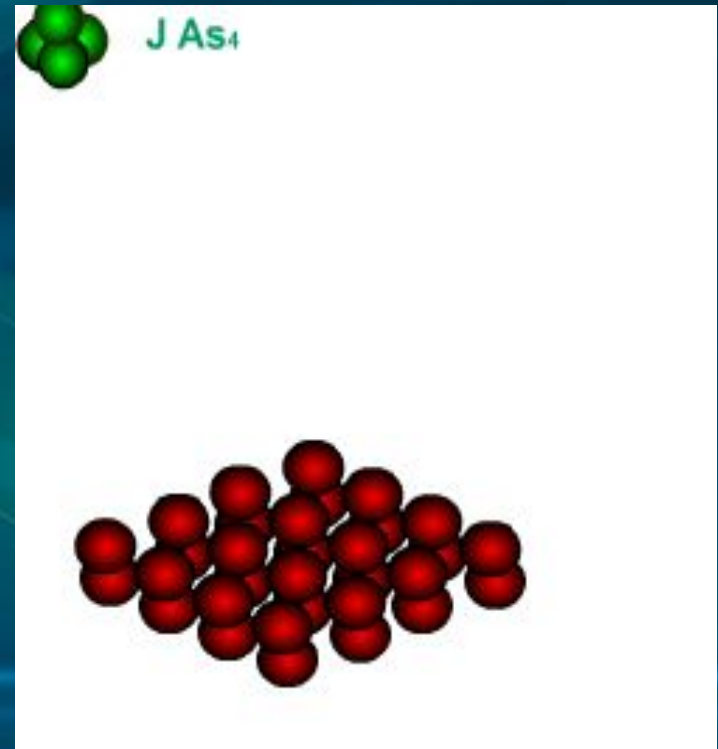
Время жизни дефекта τ (сек)

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

Физическая адсорбция

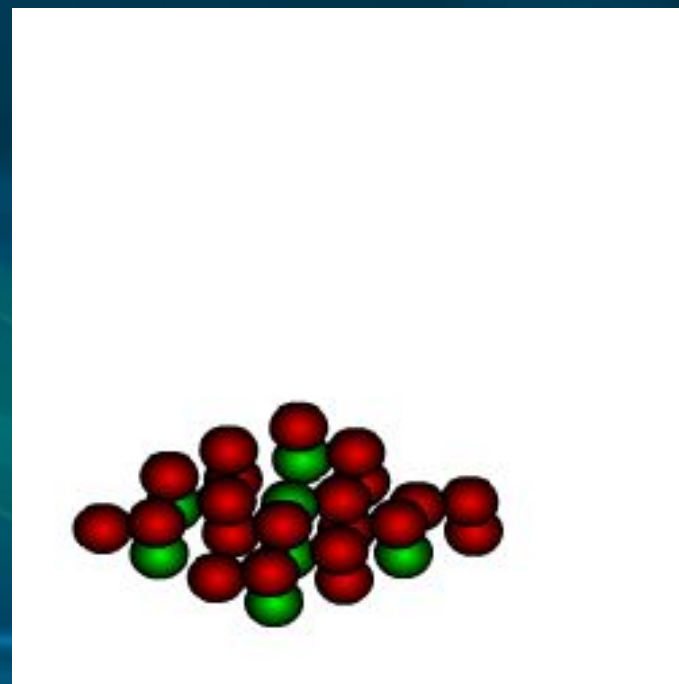
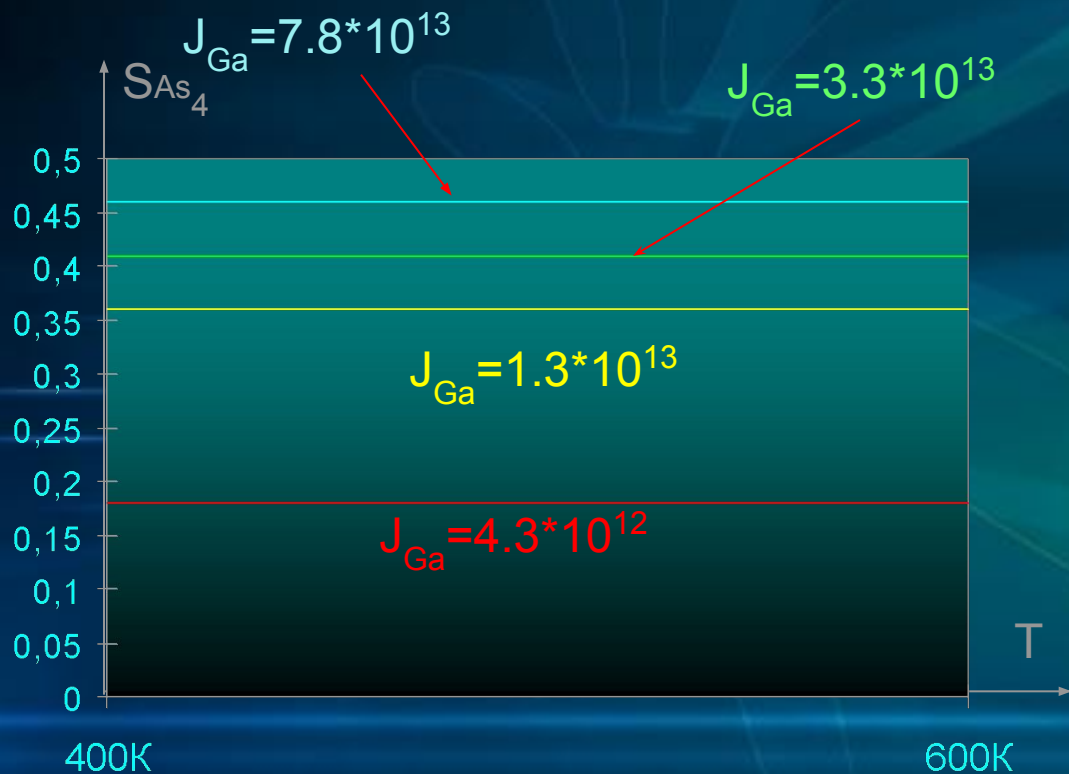
$S(\text{As}_4) = 0$ (отсутствие. св атомов Ga)

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



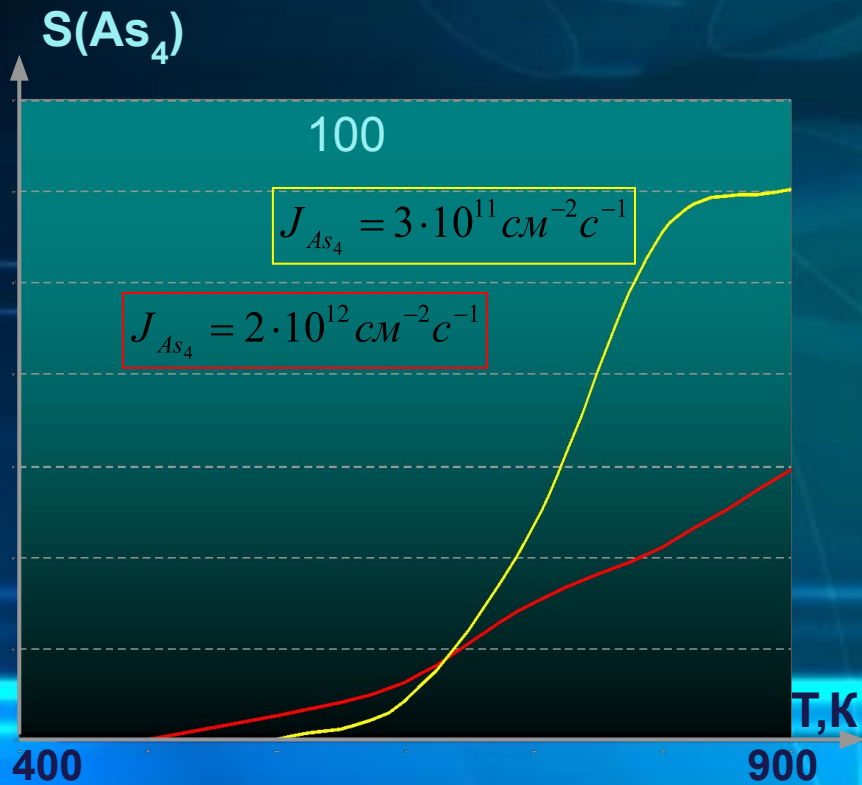
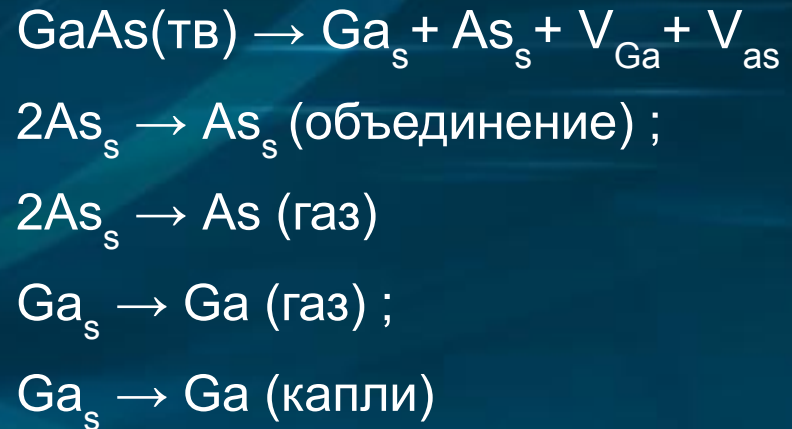
Рост из пучков Ga и As₄ при 400K < T < 600 K

- 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.



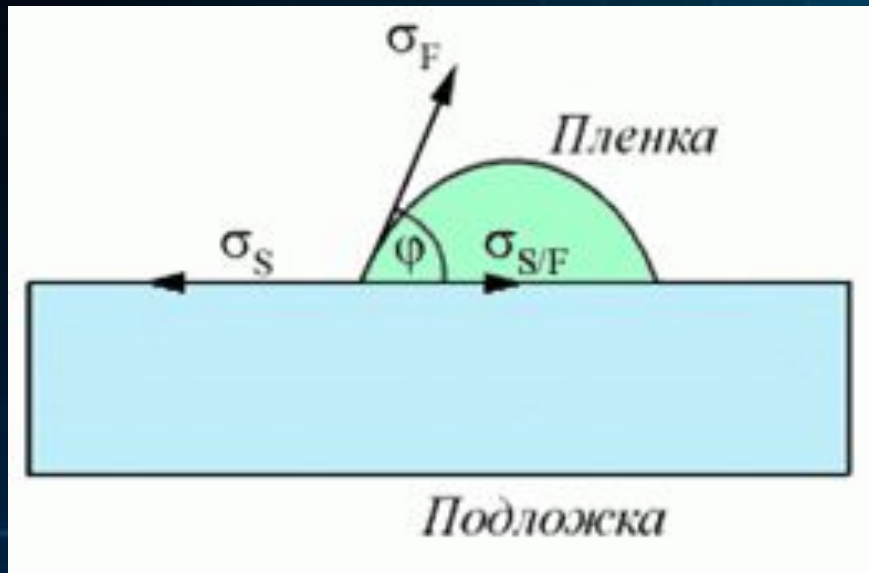
Рост из пучков **Ga** и **As₄** при **600 К < T < 900 К**

В интервале 600 К < T < 900 К - $0 < S(\text{As}_4) < 0.5$, если нет потока Ga. При T > 600 К 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.

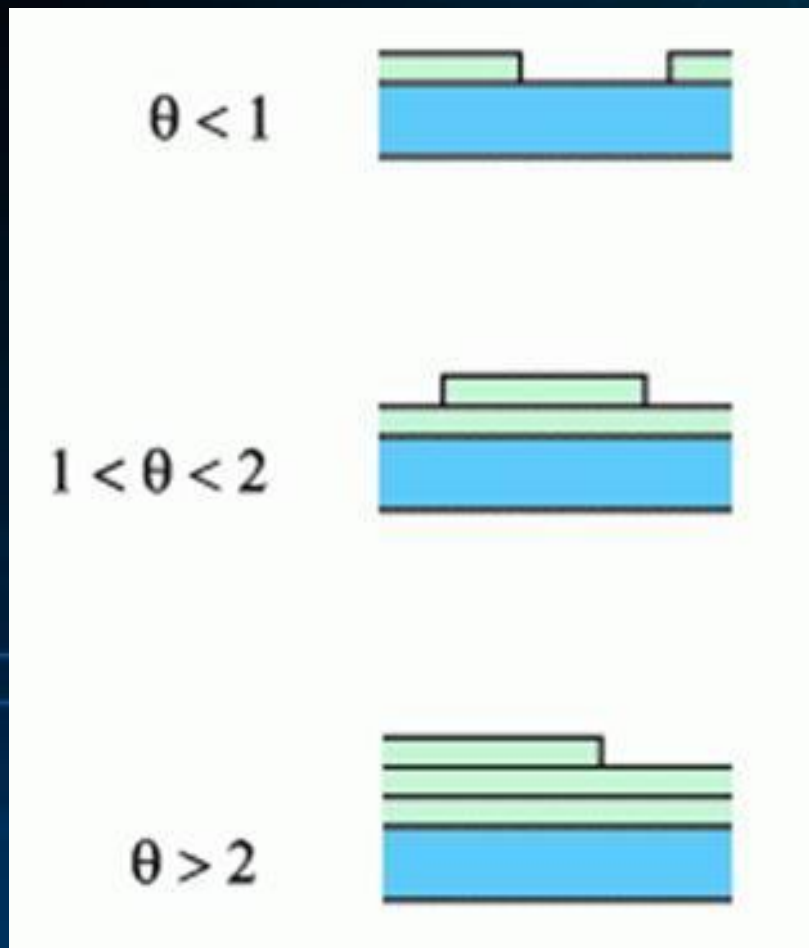
Если $\varphi=0$, то островок “растекается” тонким слоем по поверхности подложки, что соответствует слоевому механизму роста, тогда

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

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

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

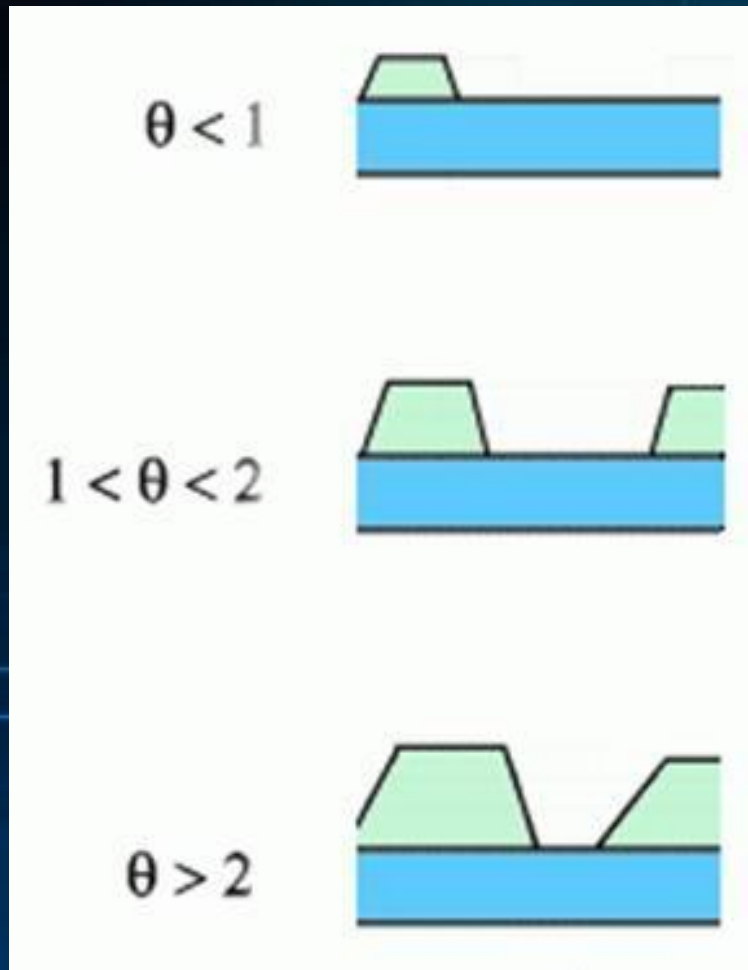
Послойный рост



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.

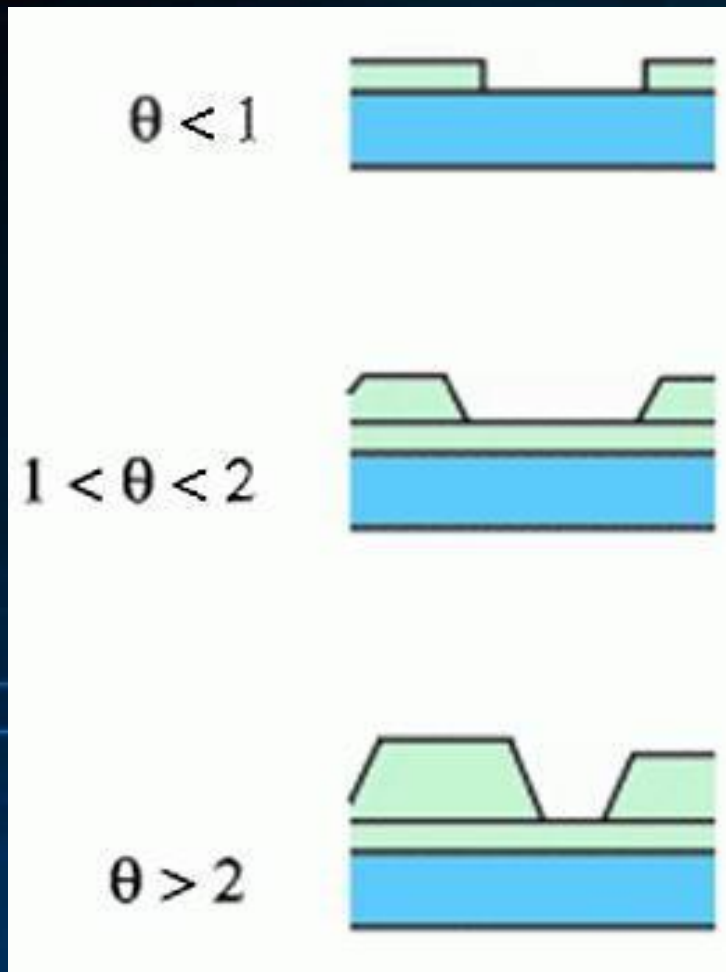
Островковый рост



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.

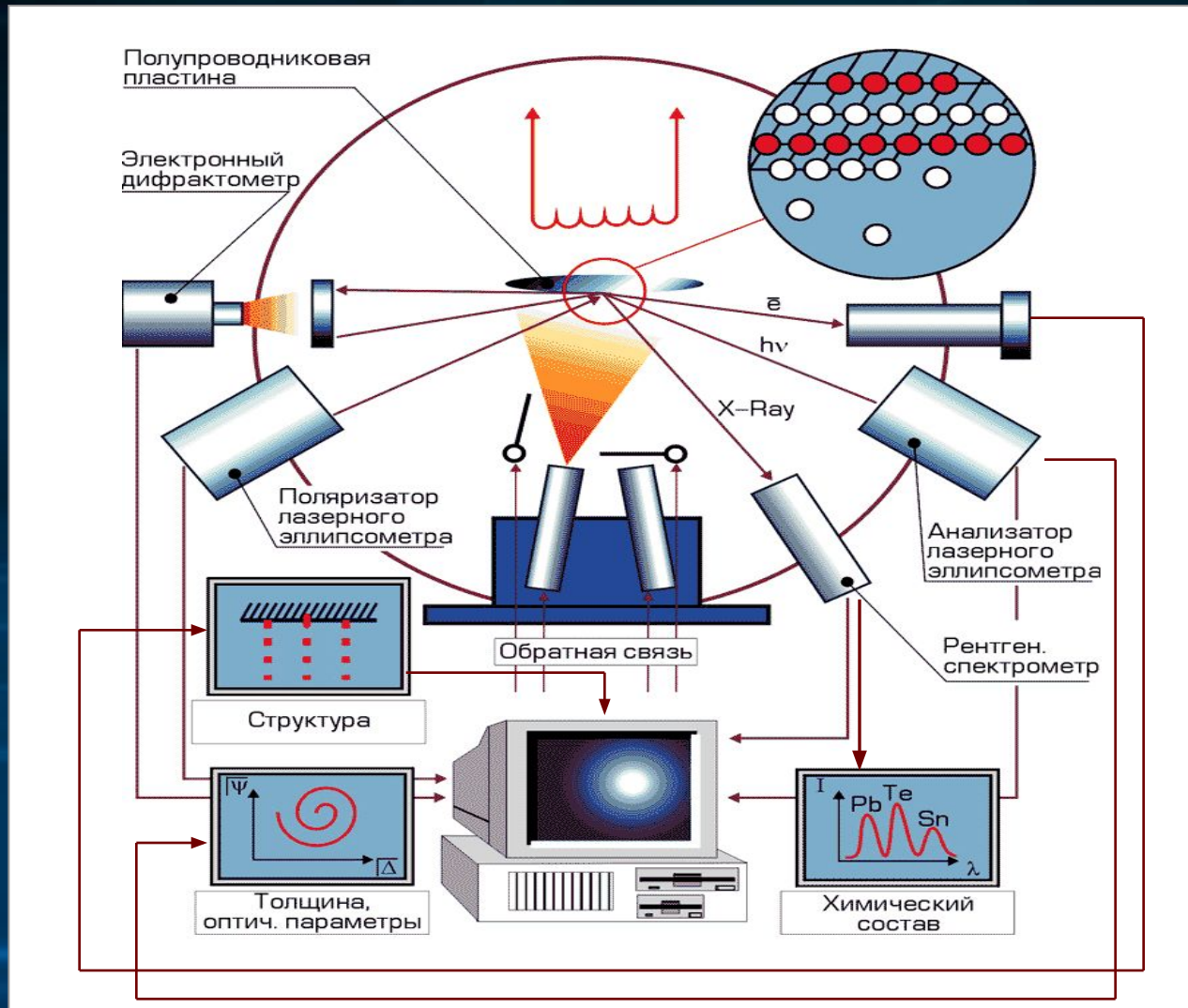
Рост Странски-Крастанова



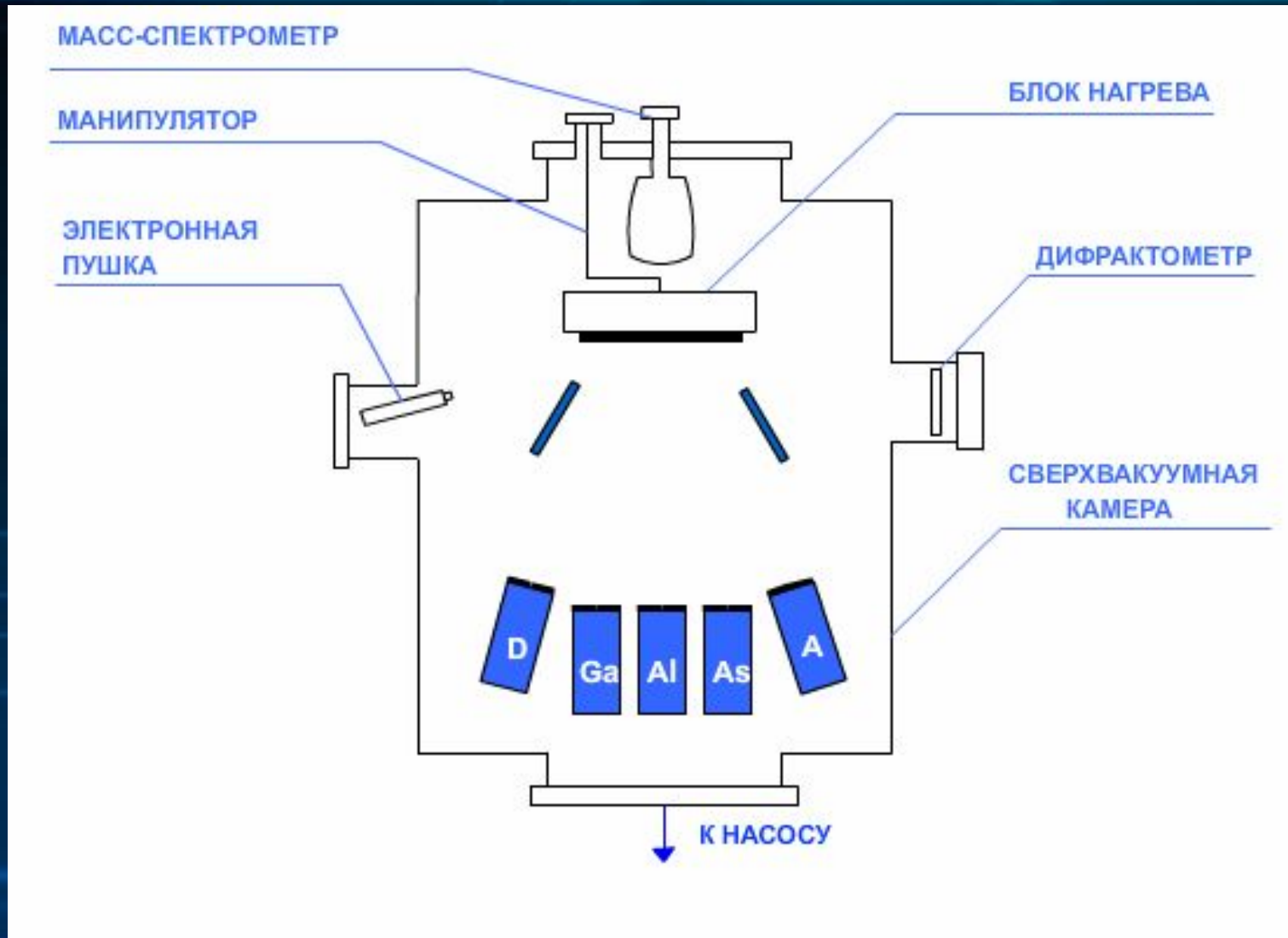
- Промежуточным между этими двумя механизмами является рост Странски-Крастанова (Stransky-Krastanov, SK, layer-plus-islandgrows), при котором первый слой полностью покрывает поверхность подложки, а на нем происходит рост трехмерных островков пленки. К этому механизму могут приводить многие факторы, в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

θ – Число монослоев пленки

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 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.