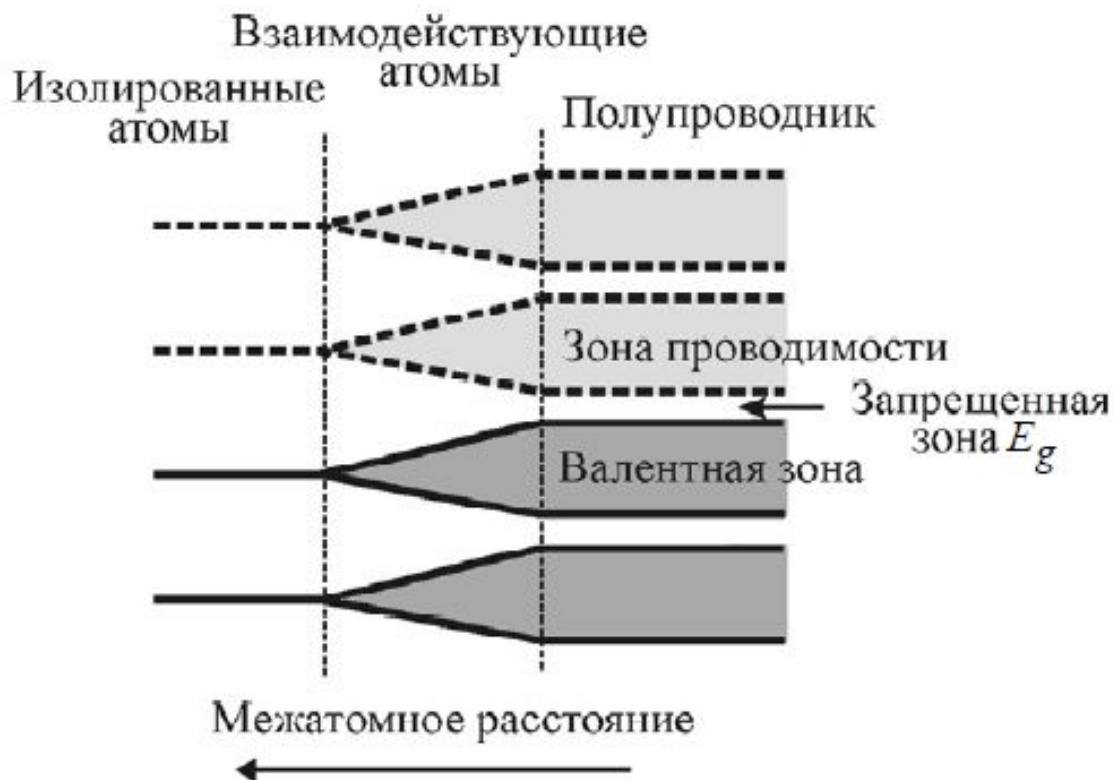


Ильдар Набиуллин  
Академический университет РАН

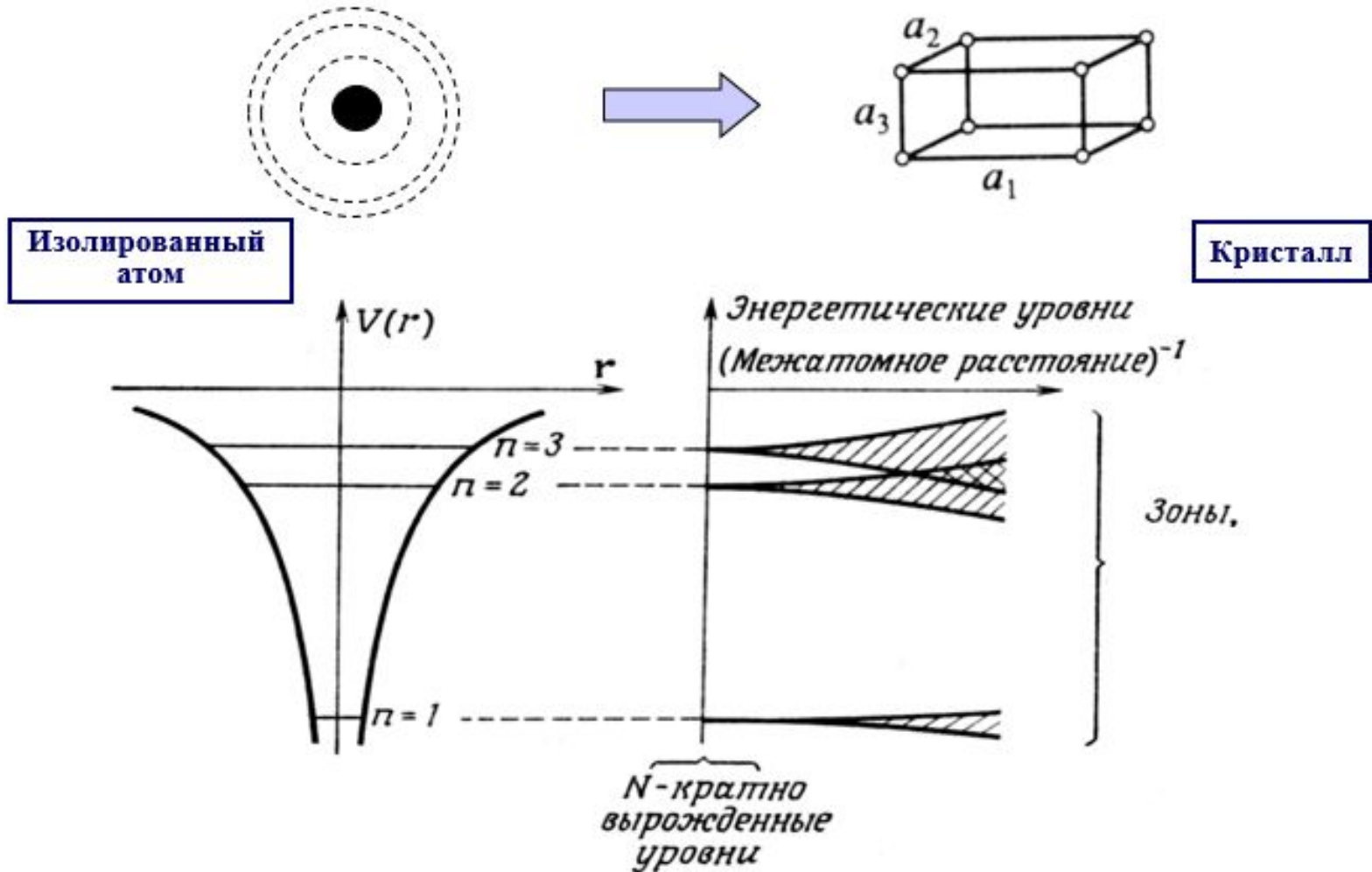
# Введение в эпитаксиальные технологии

# Зонная структура

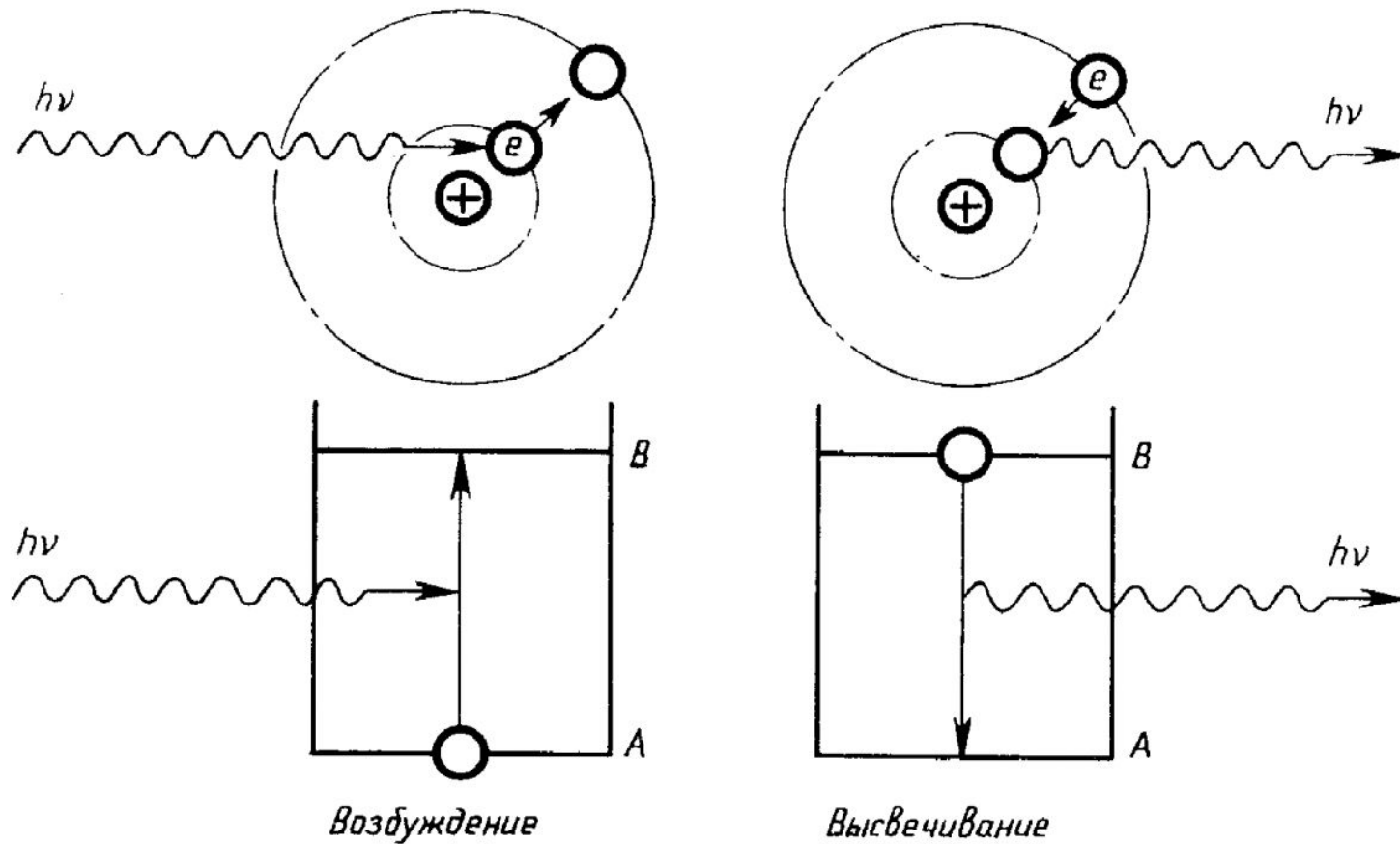


Формирование электронных зон в твердом теле из энергетических уровней изолированных атомов

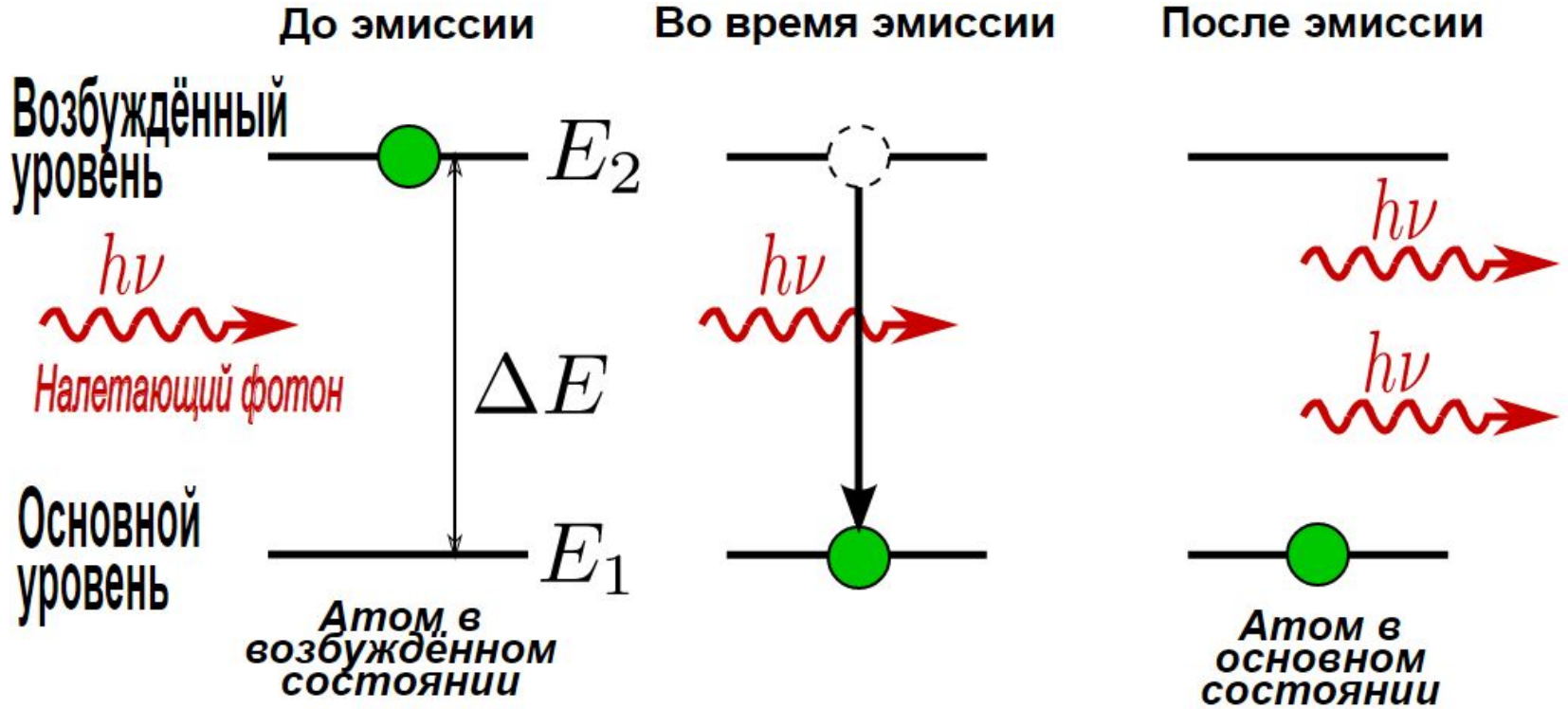
# Переход от атома к решётке



# Взаимодействие изолированного атома с квантом света

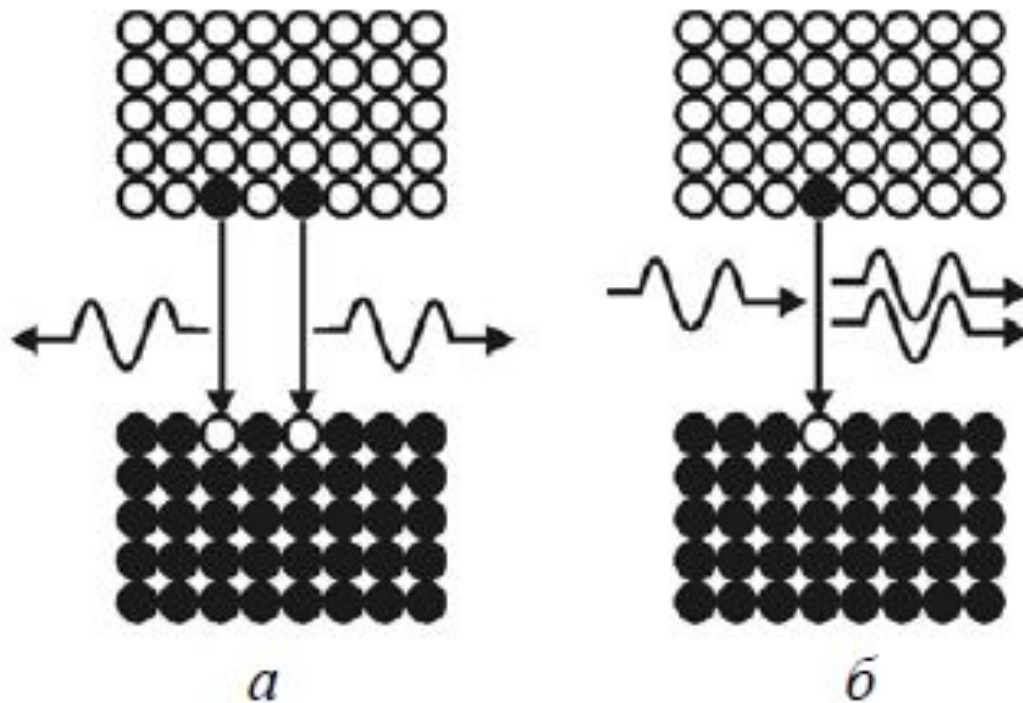


# Вынужденное излучение



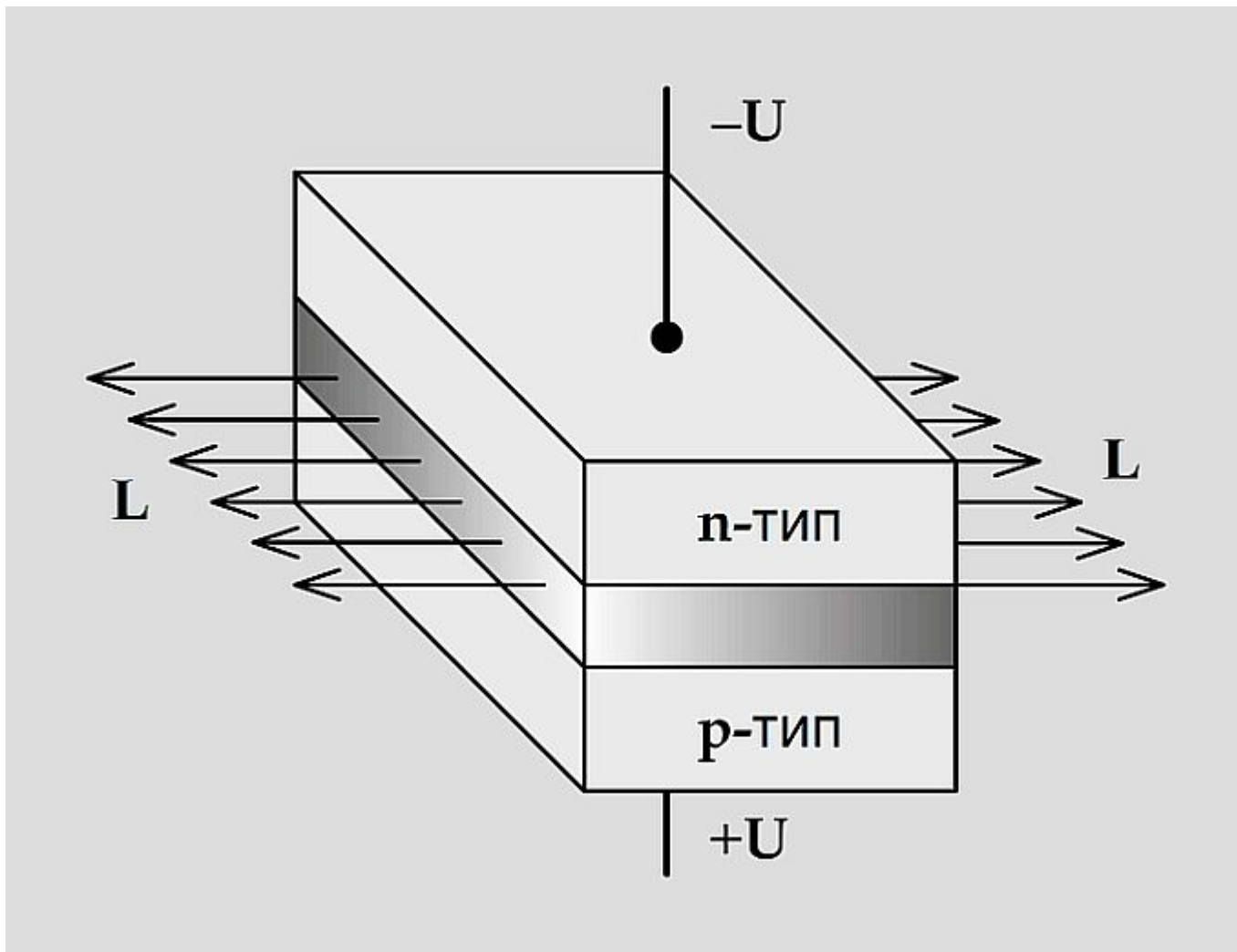
$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

# Излучательная рекомбинация электрона и дырки

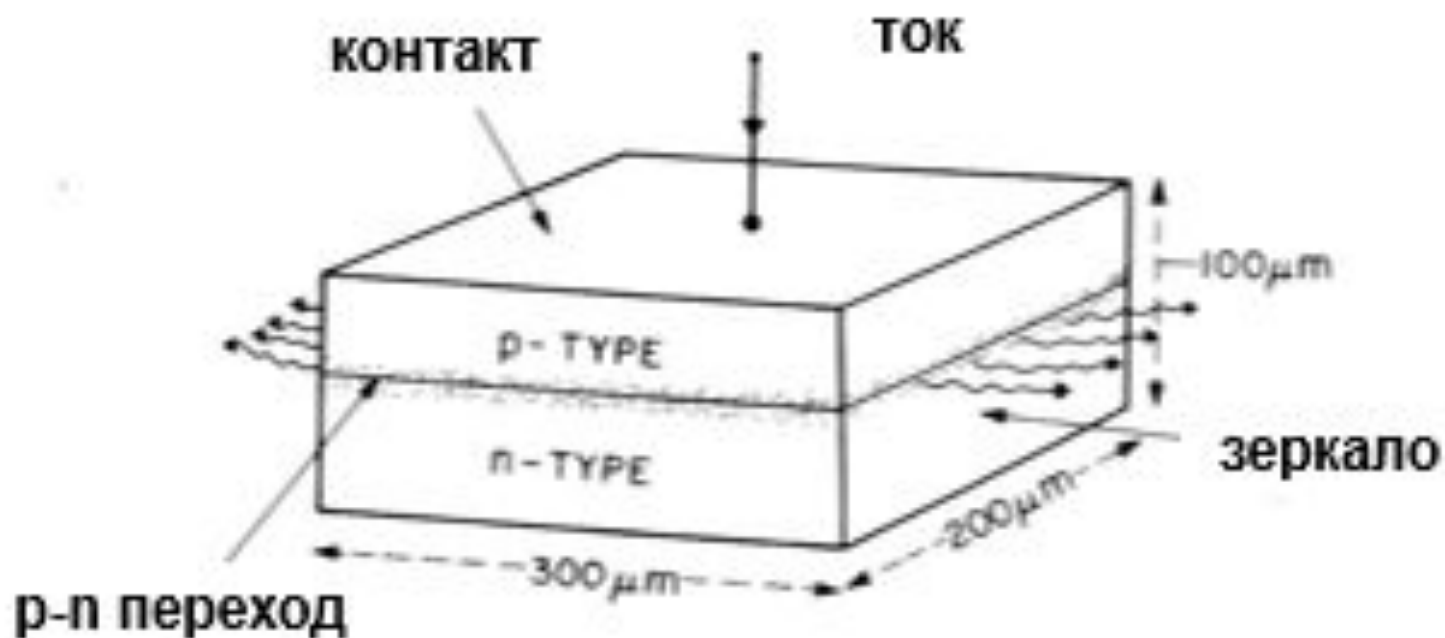


Излучательная рекомбинация электрона и дырки:  
*a* – спонтанное излучение; *б* – вынужденное

# Устройство инжекционного п/п лазера

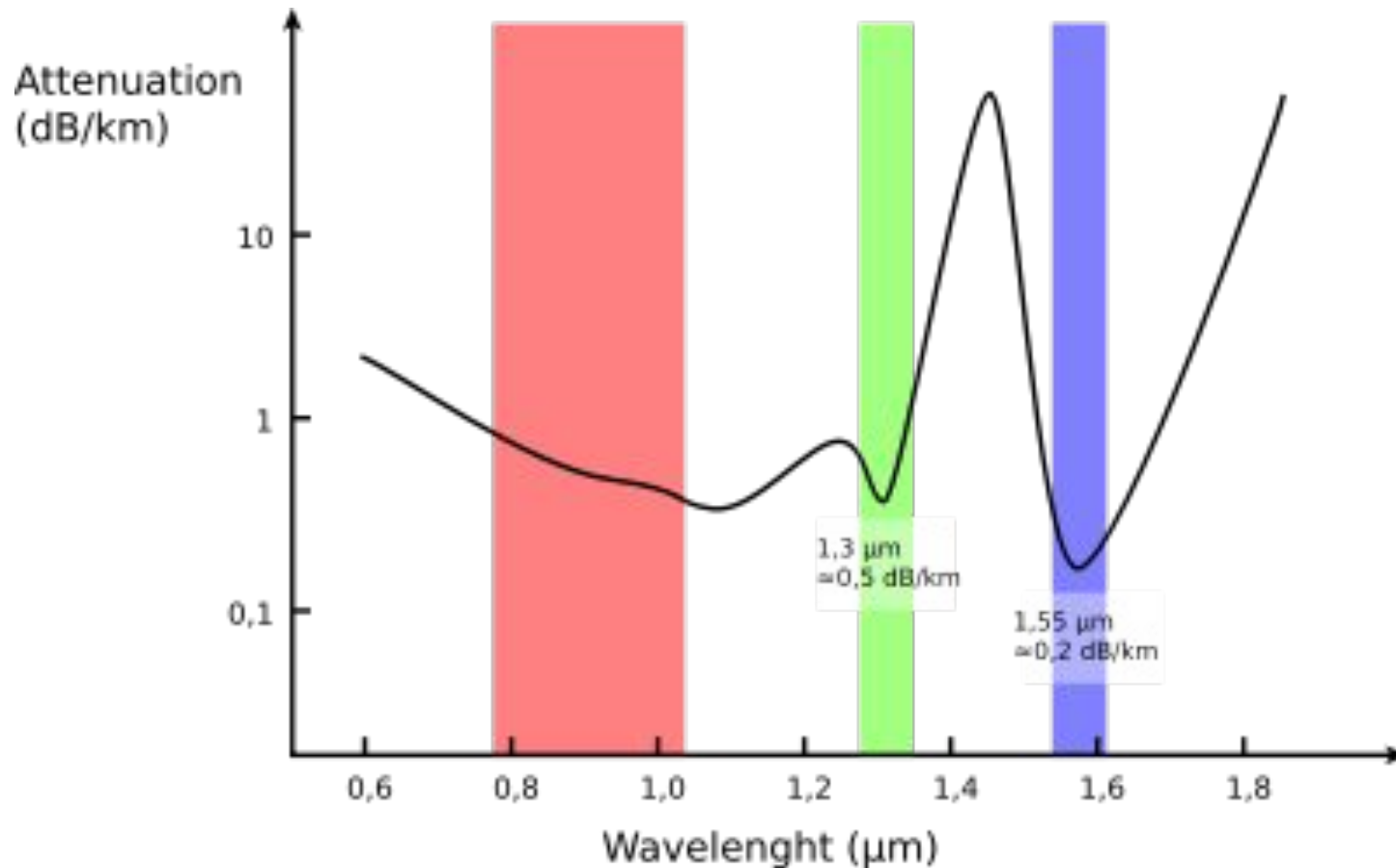


# Устройство инжекционного п/п лазера

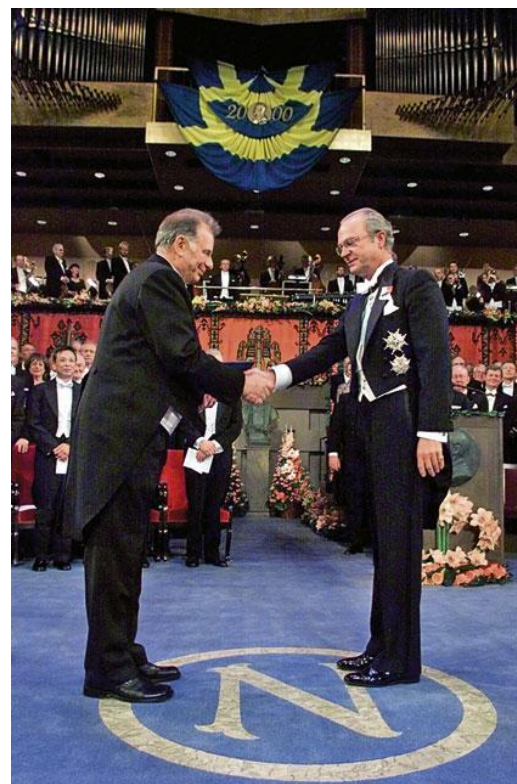




# Окна прозрачности оптического волокна



# Нобелевская премия 20 века

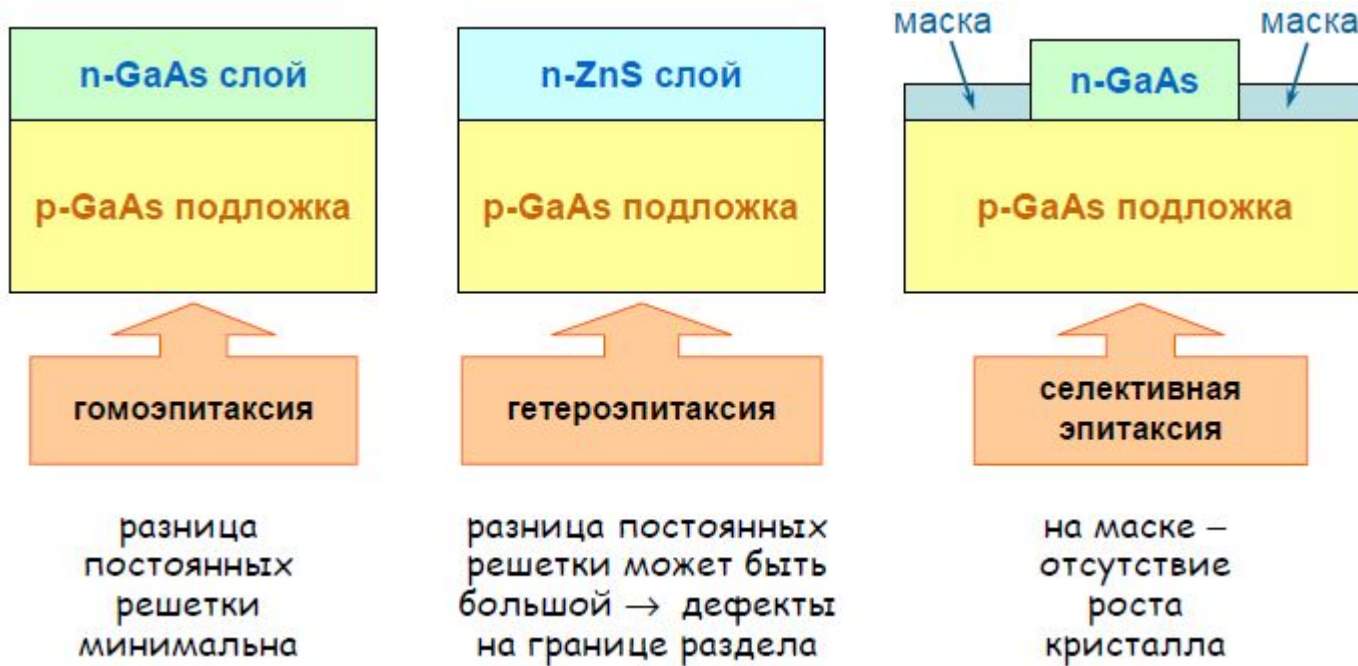


**Жорес Иванович Алфёров**

**Prize motivation:** "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics"

# Эпитаксия

- $\epsilon_{\text{ПП}}$  – на ,  $\alpha_{\text{ξ}}$ σ – упорядоченность



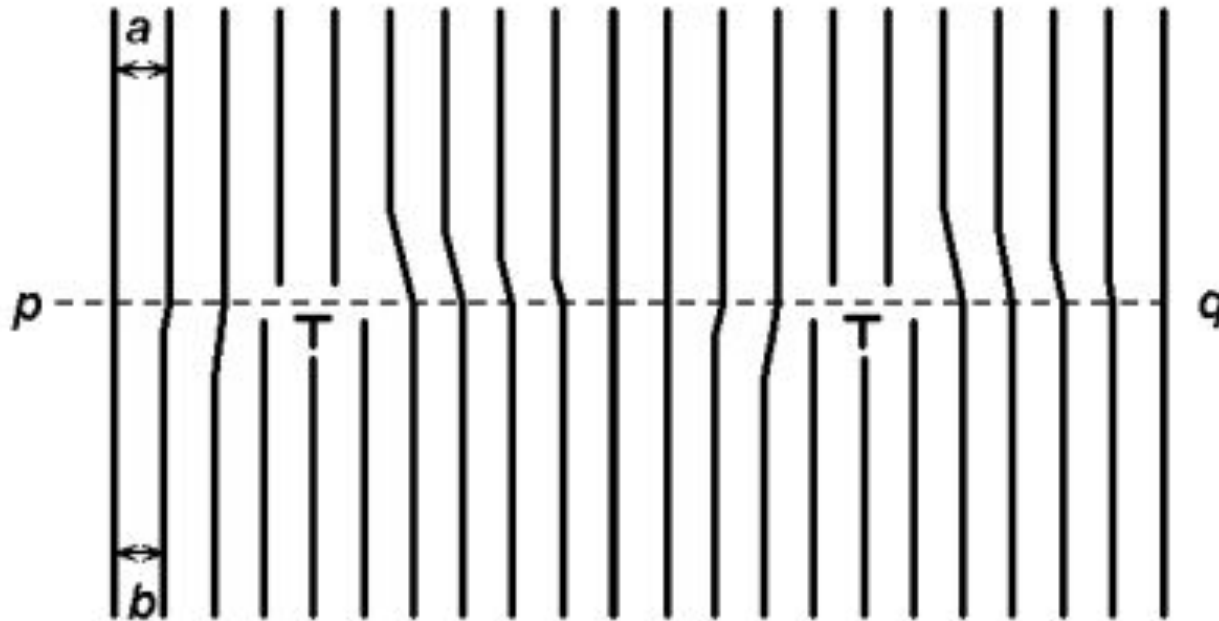
# Классификация эпитаксии по агрегатному состоянию среды

Фаза 2 - область снабжения  
материалом для роста.

**—————** Поверхность - граница раздела

Фаза 1 - растущий кристалл

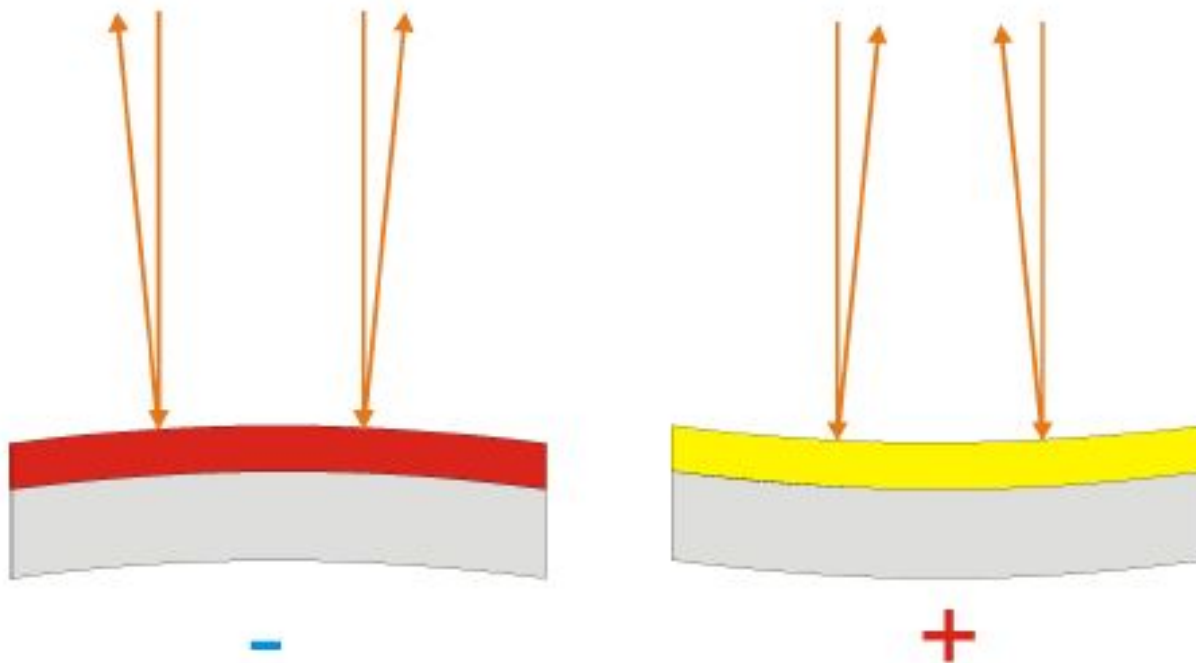
# Рассогласование по параметру решётки



\*допустимо не более 15%

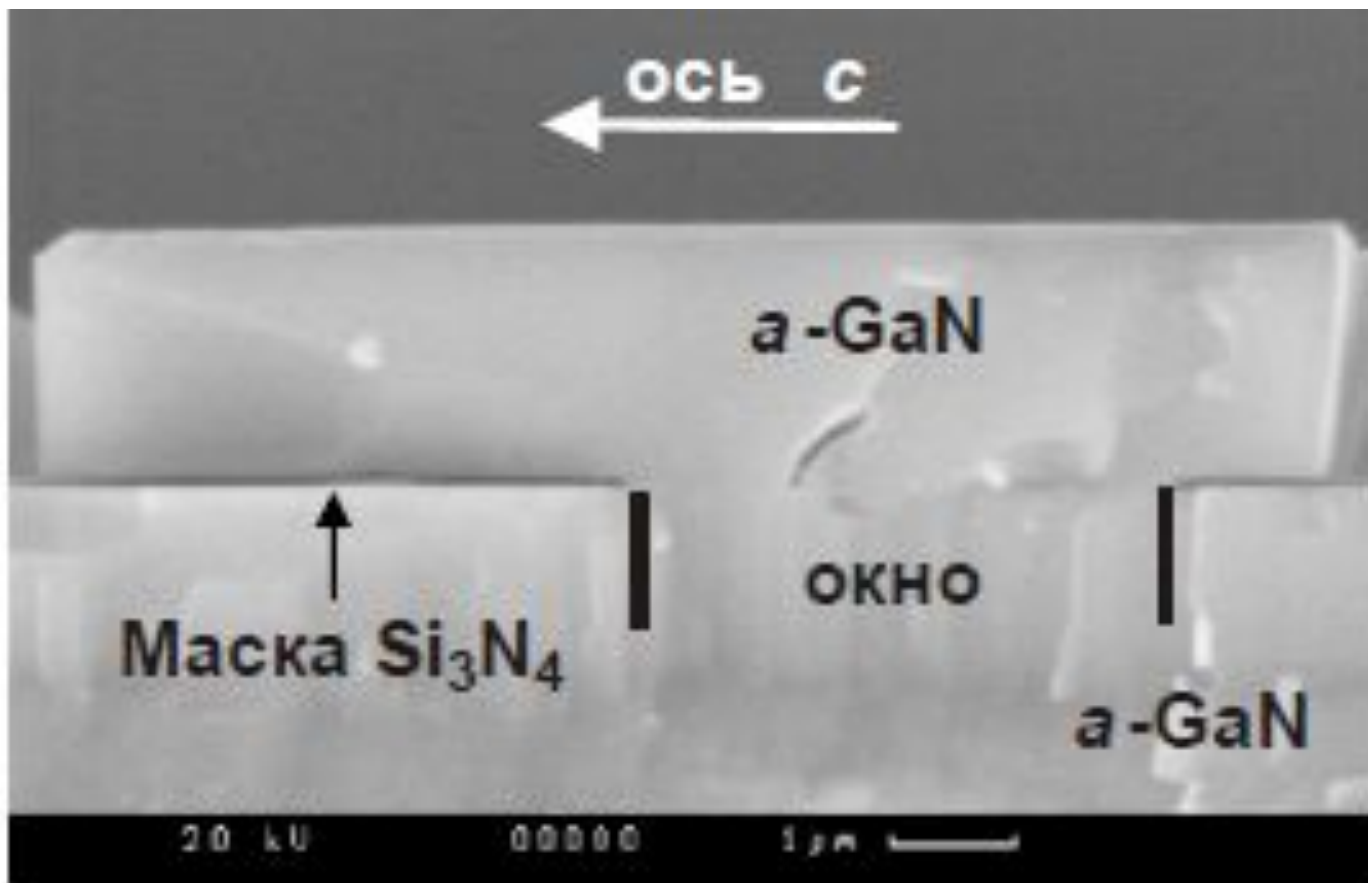
\*\*важно также, чтобы слой и подложка имели близкие значения коэффициентов термического расширения

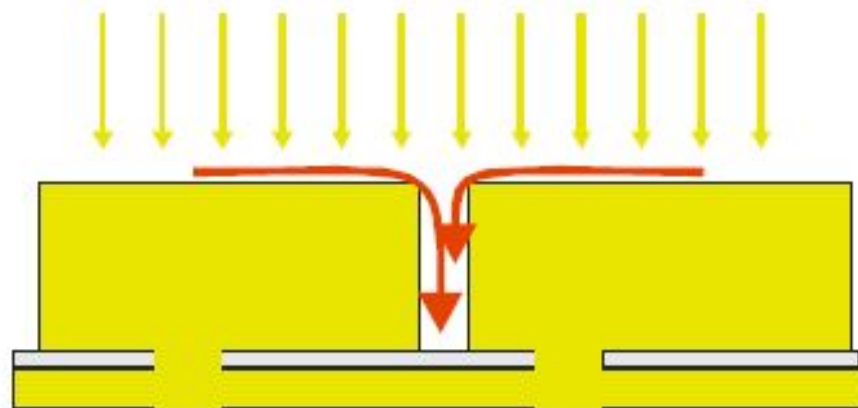
# Метод измерения кривизны растущей структуры



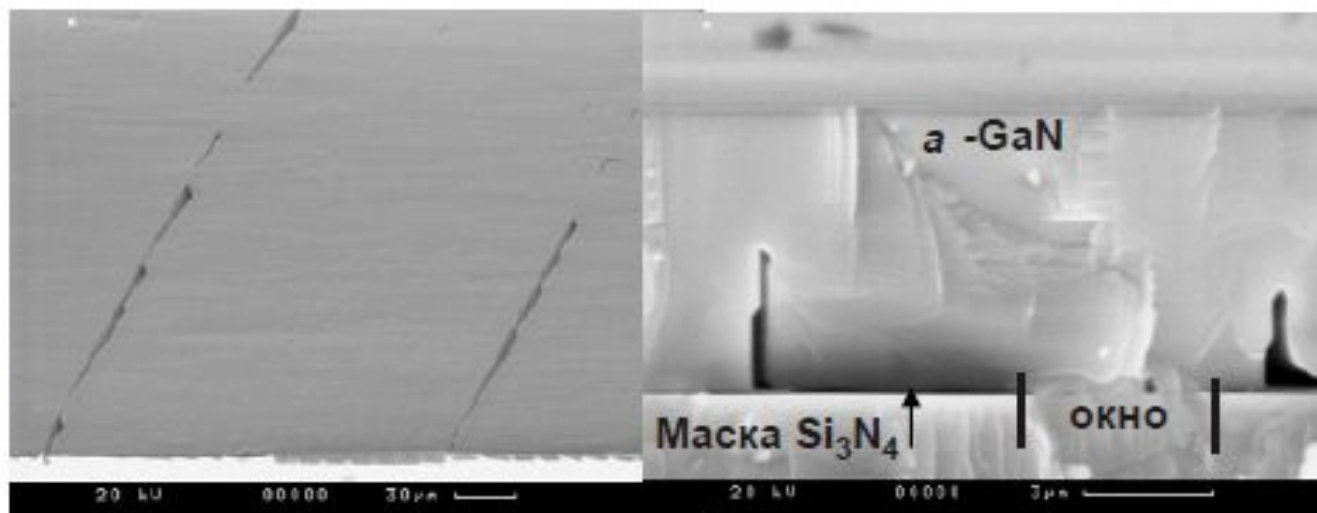
Напряжённый эпитаксиальный слой растягивает или сжимает подложку

# Латеральный рост





**Затекание в щель**







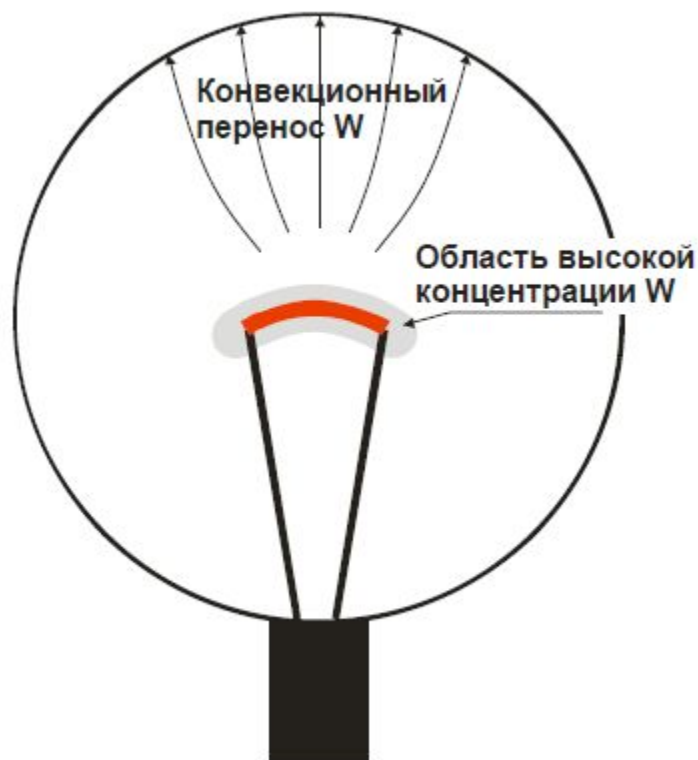
# Вакуумная лампа накаливания



↑ Температуры нити – ↑ КПД.  
↑ Температуры нити – ↑ испарения  $W$   
 $W$  создает непрозрачное покрытие  
Скорость осаждения  $W \sim 1/r^2 \Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  Увеличение  $r$

Аналог молекулярно-пучковой  
эпитаксии

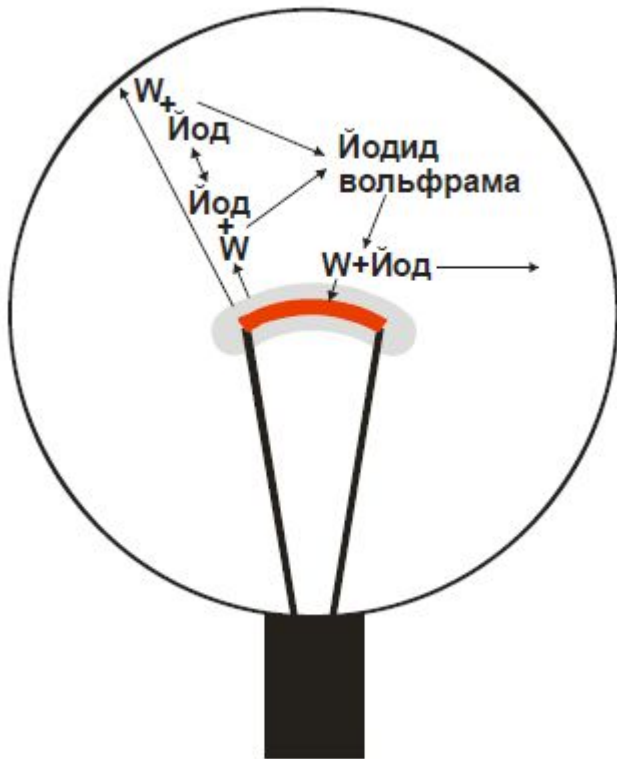
# Газонаполненная лампа накаливания



Газ меняет процесс массопереноса.  
Он препятствует свободному полету атомов  $W$ .  
Вокруг нити образуется область, обогащенная парами  $W$ .  
 $W$  частично переосаждается на нить накаливания.  
Не переосадившийся  $W$  диффундирует в газе к стенкам, в значительной степени увлекаясь вверх конвекционным потоком.  
Снижается скорость испарения  $W$ .  
 $W$  оседает преимущественно на верхней поверхности лампы.  
Размеры лампы по-прежнему большие.

Аналог физической газофазной эпитаксии

# Галогеновая лампа накаливания



Аналог химической  
ГФЭ

Испаряющийся  $W$  реагирует с йодом. Реакция идет и в газе, и на стенках (если они горячее  $300-400^{\circ}C$ ).

Йодиды вольфрама летучи.

Если нет холодных поверхностей, пары йодидов вольфрама заполняют лампу и разлагаются на поверхности раскаленной нити, тем самым «восстанавливая» ее.

При заданной температуре нити увеличивается срок службы лампы.

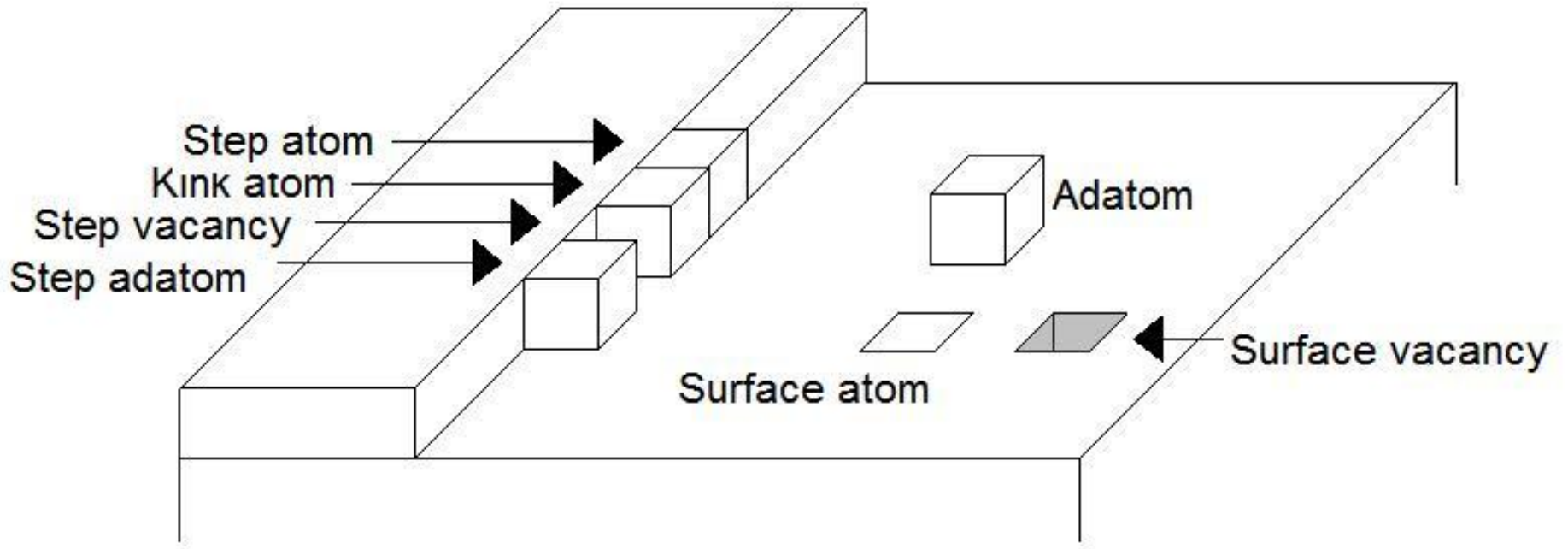
Не изменяя срок службы лампы, можно существенно повысить температуру нити, повысив КПД.

Стенки лампы очищаются – можно (и нужно для их разогрева) уменьшать размеры лампы.

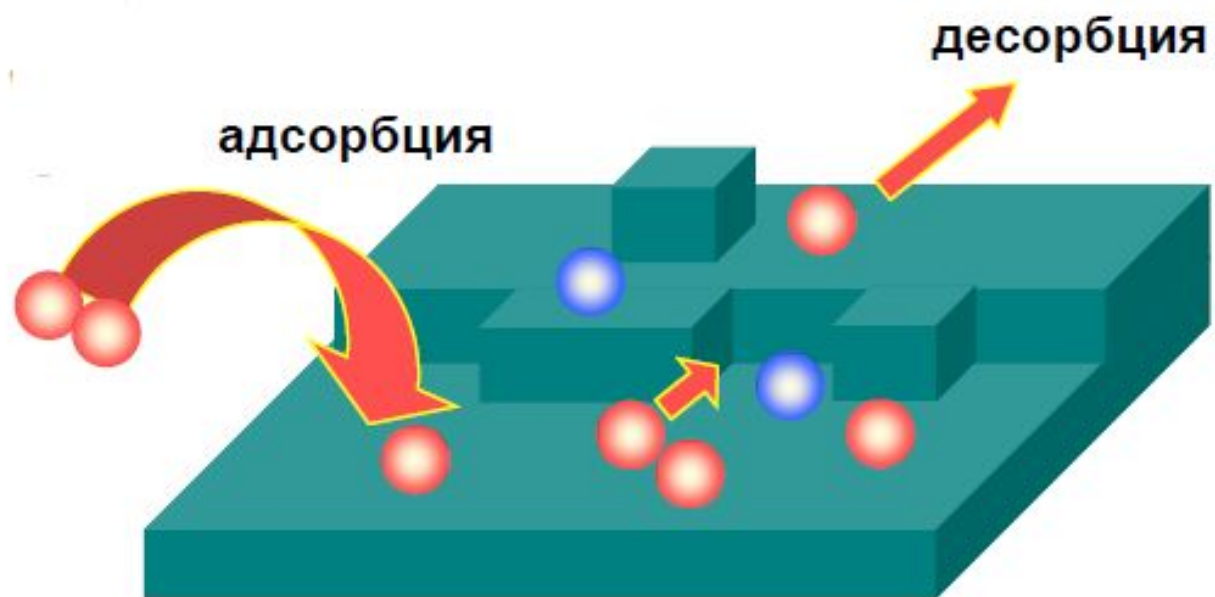




# Механизм роста

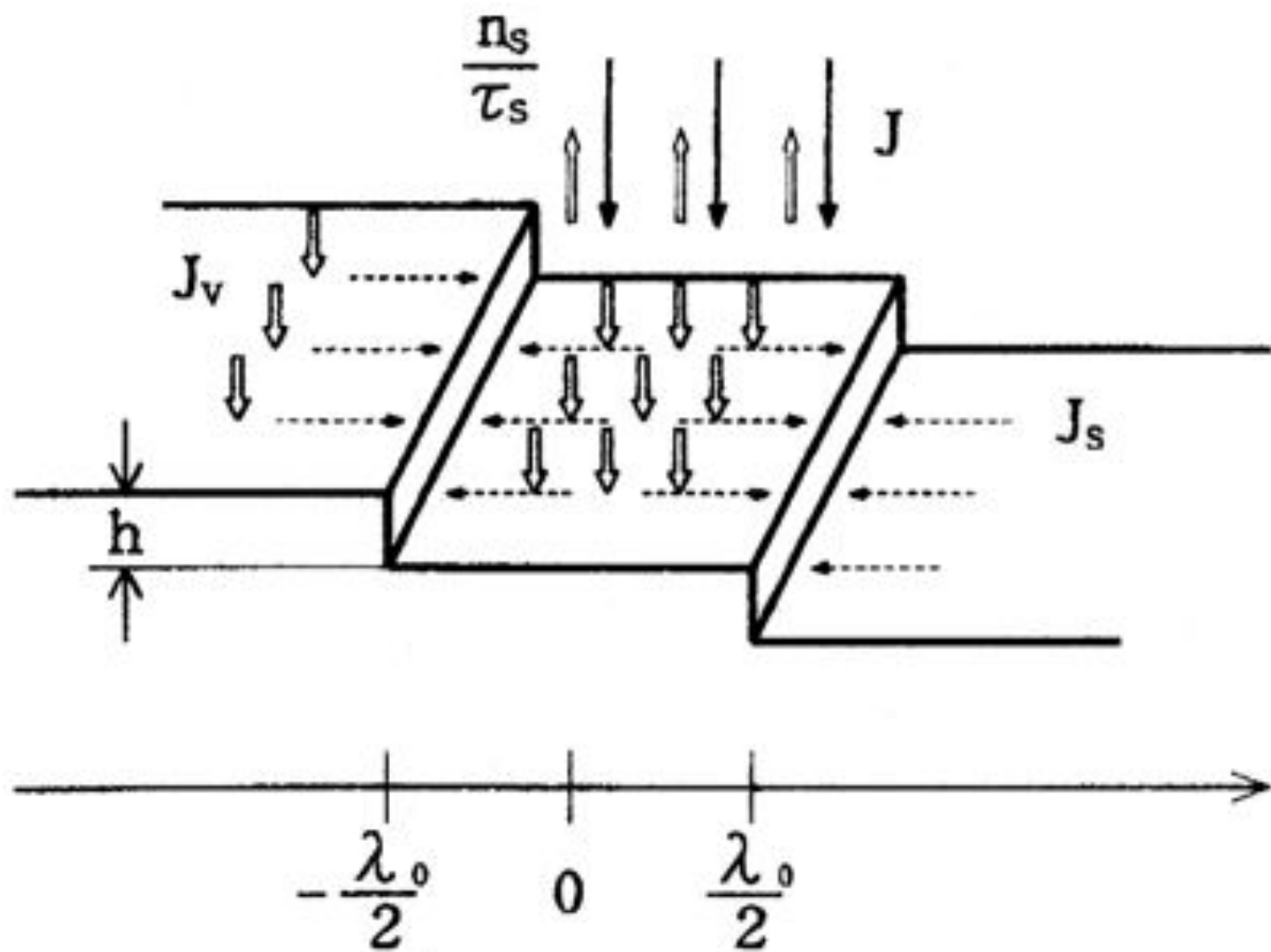


Встраивание происходит равномернее, если реакция адатомов с поверхностью обратимая (под действием температуры)



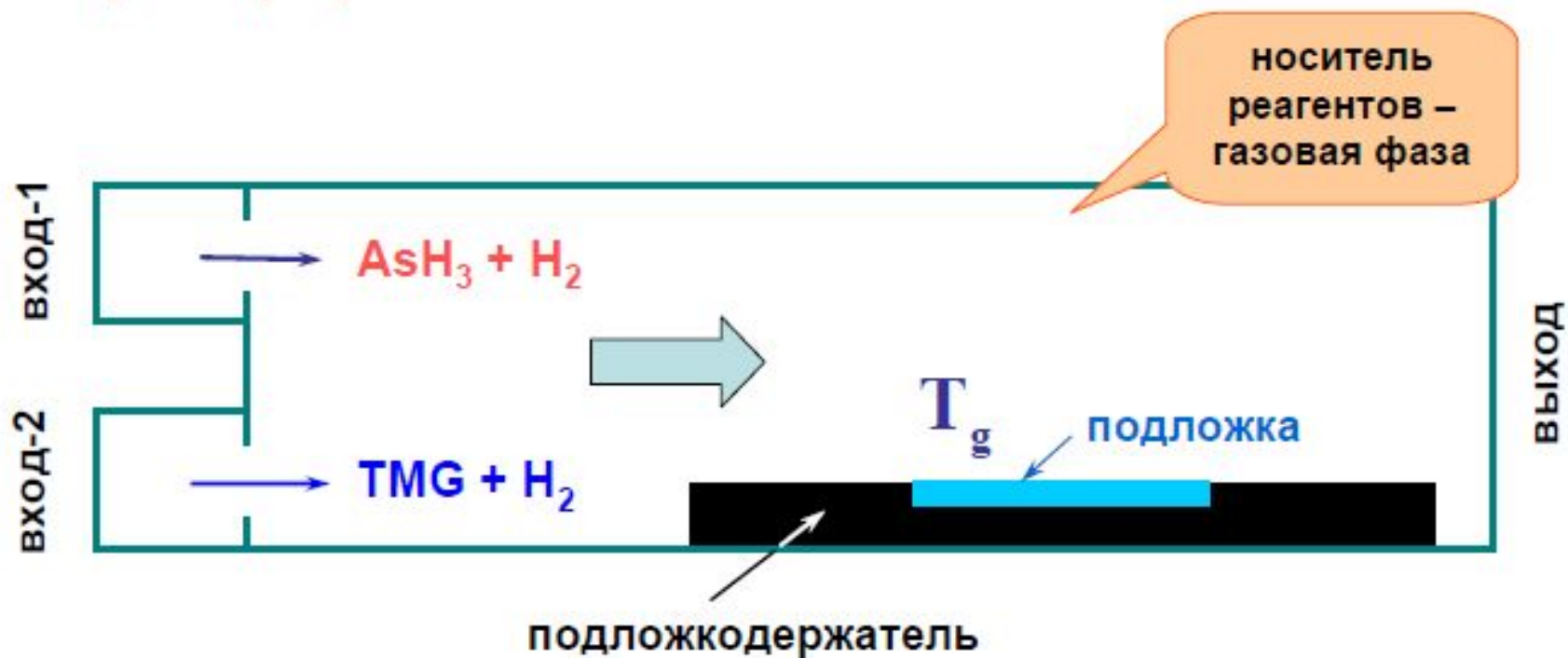
встраивание атомов в кристалл



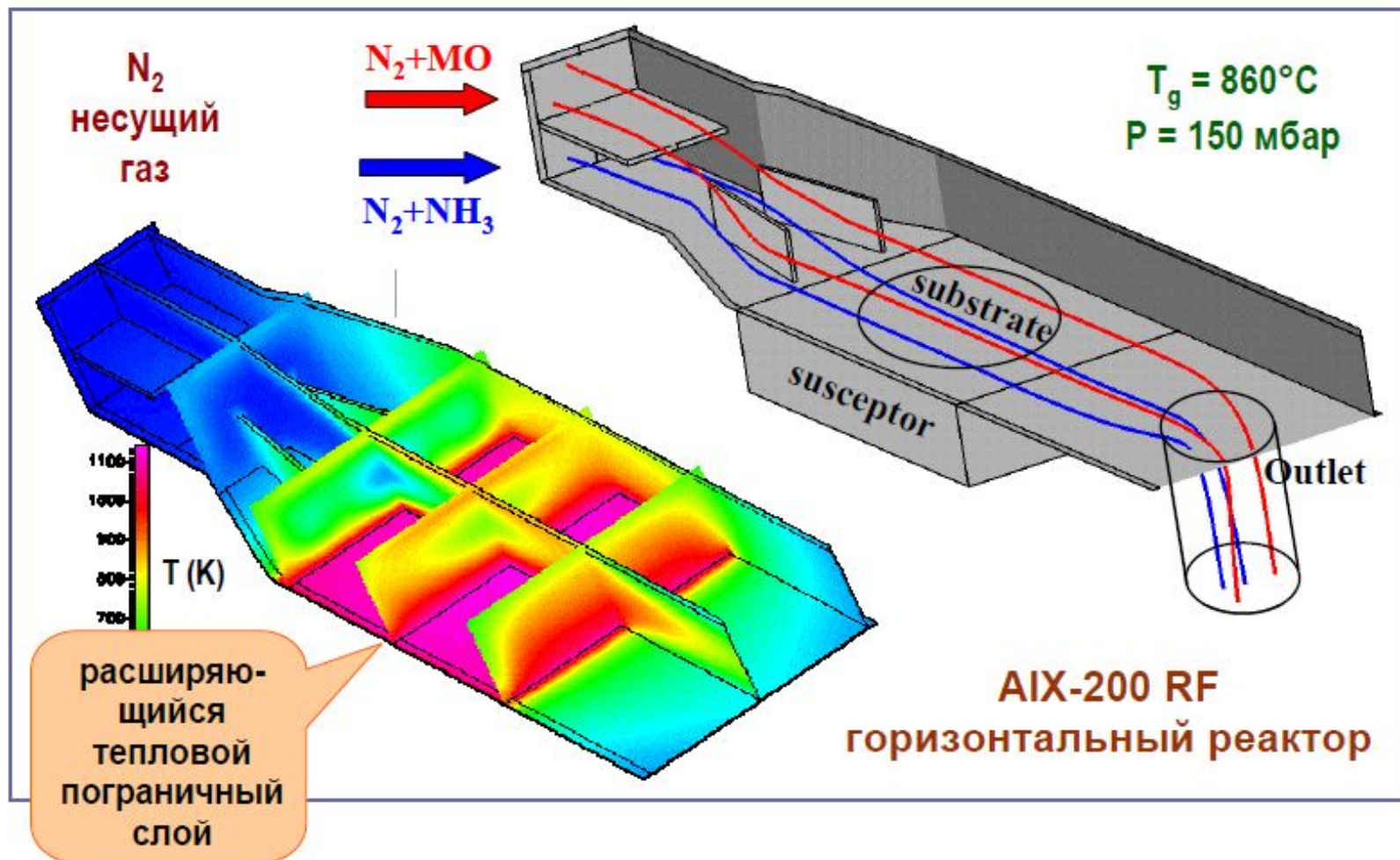


# Газофазная эпитаксия

конвекция и диффузия -  
основные механизмы  
транспорта реагентов



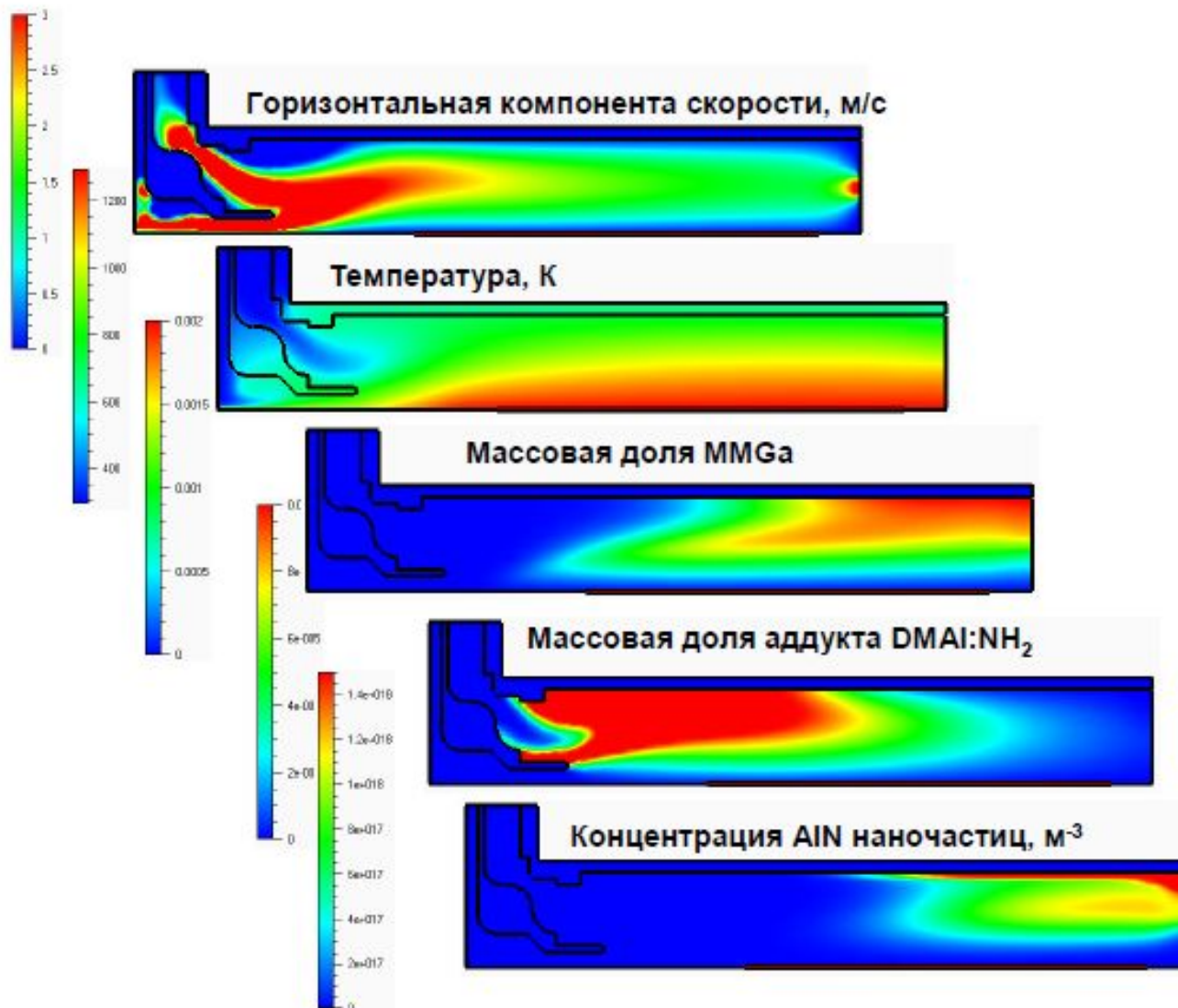
# Схема реактора



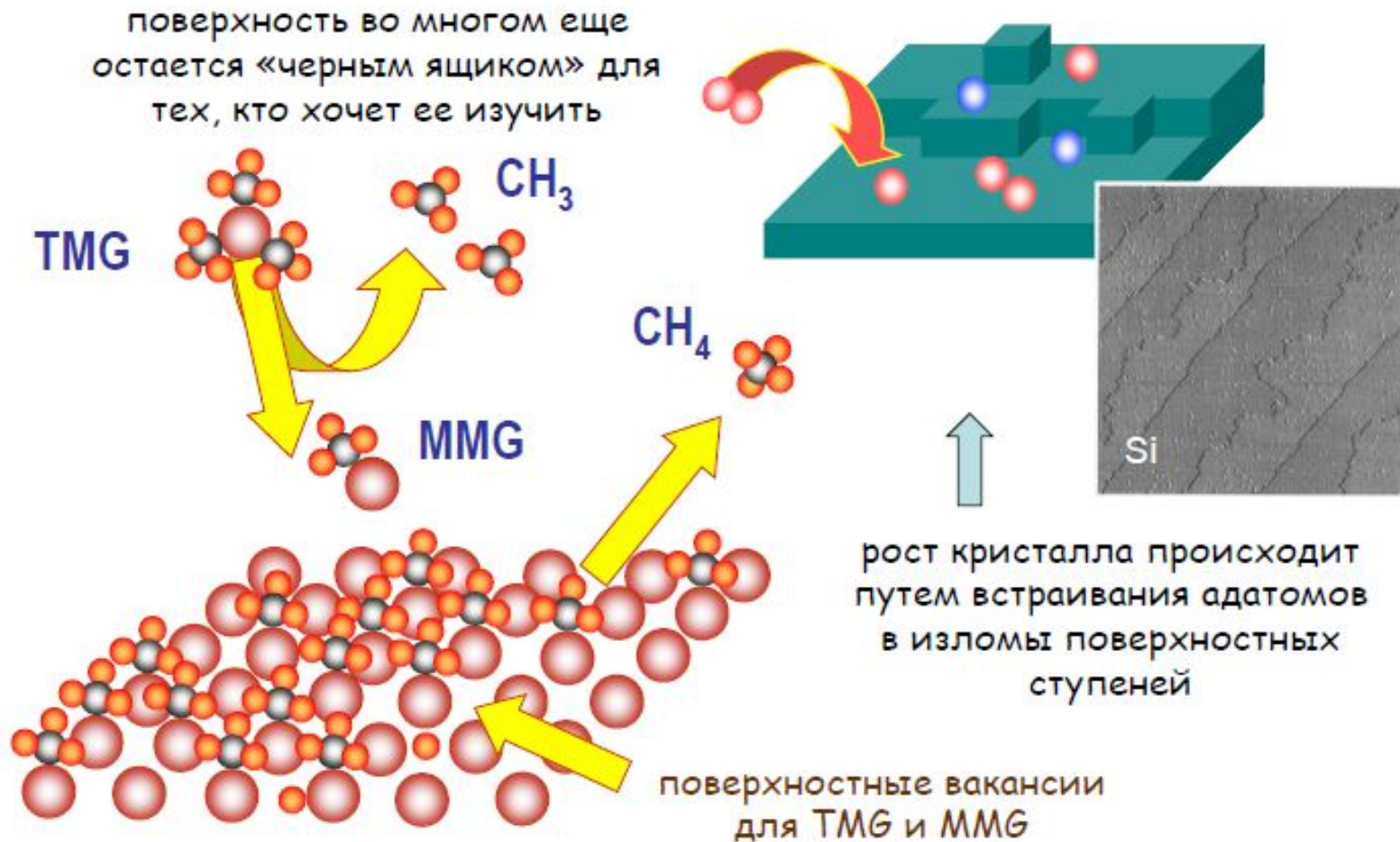
# Скоростной и концентрационный пограничные слои



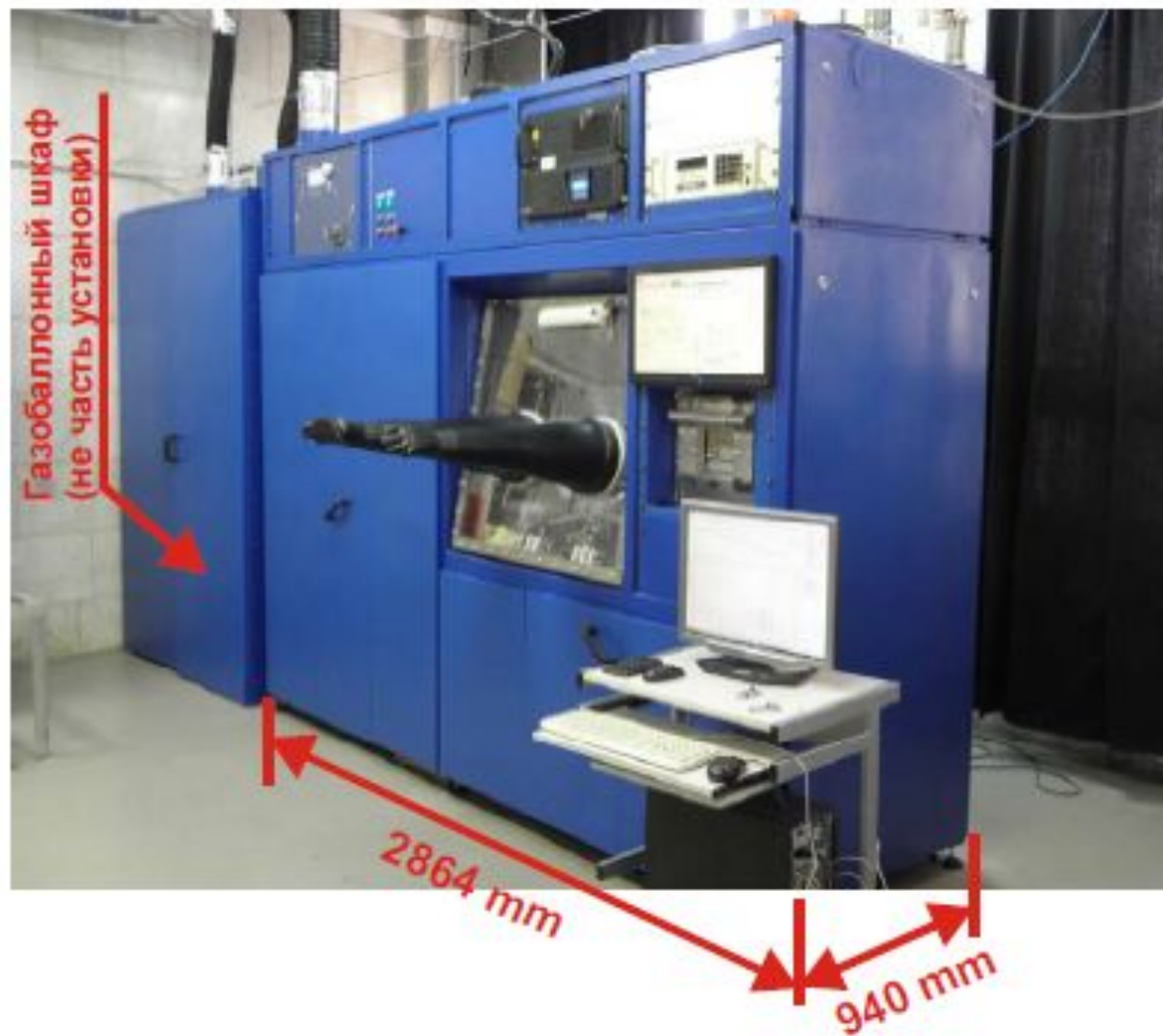
# Пограничный слой

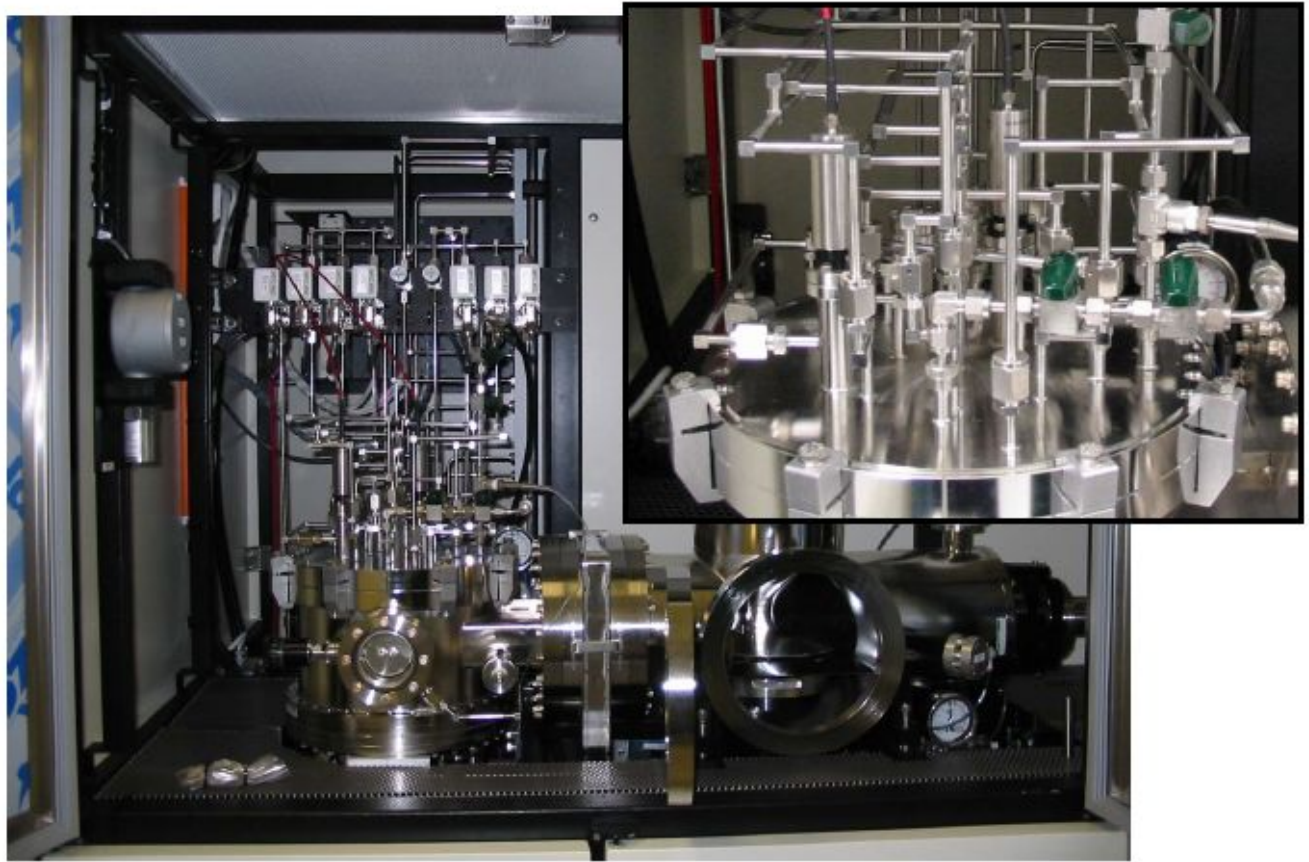


# Механизм роста



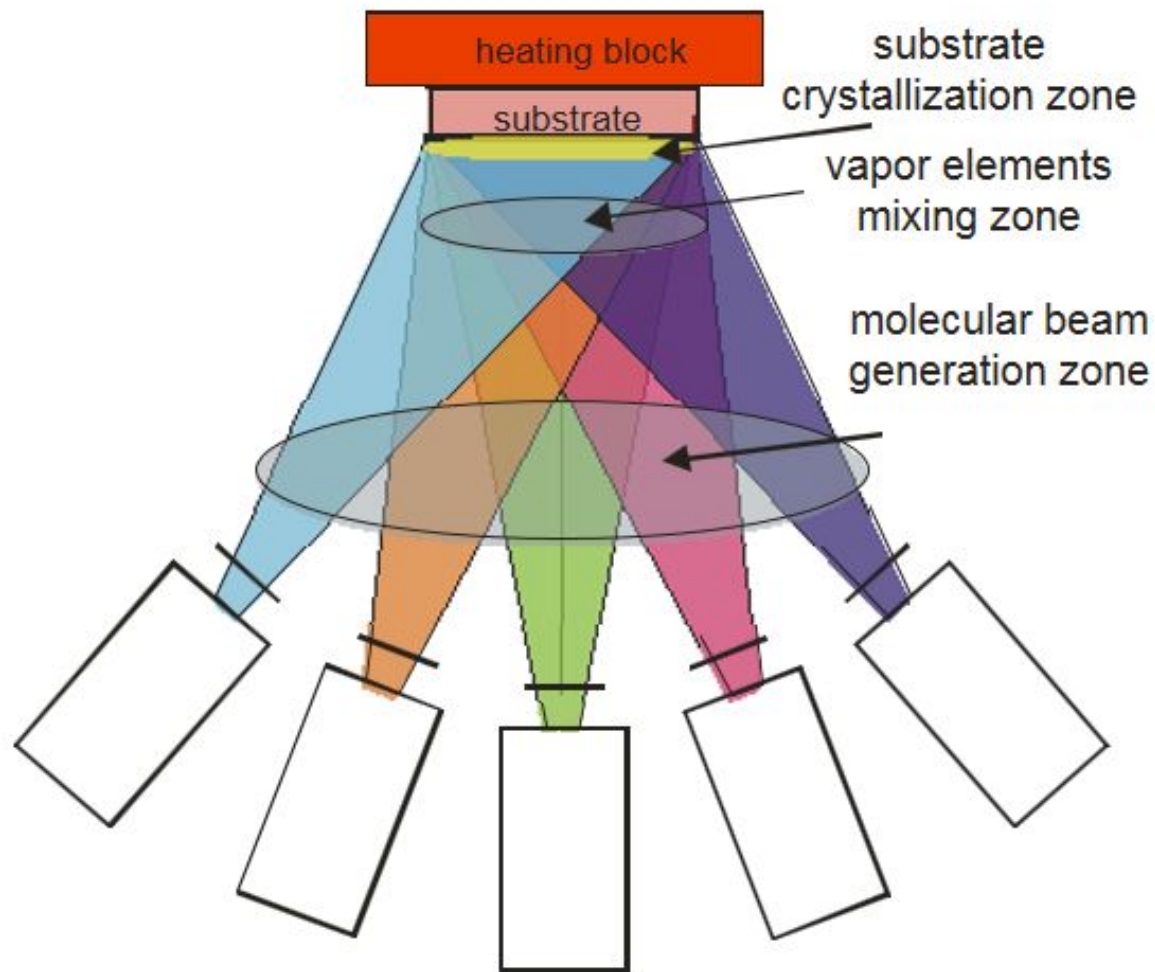
# Примеры установок



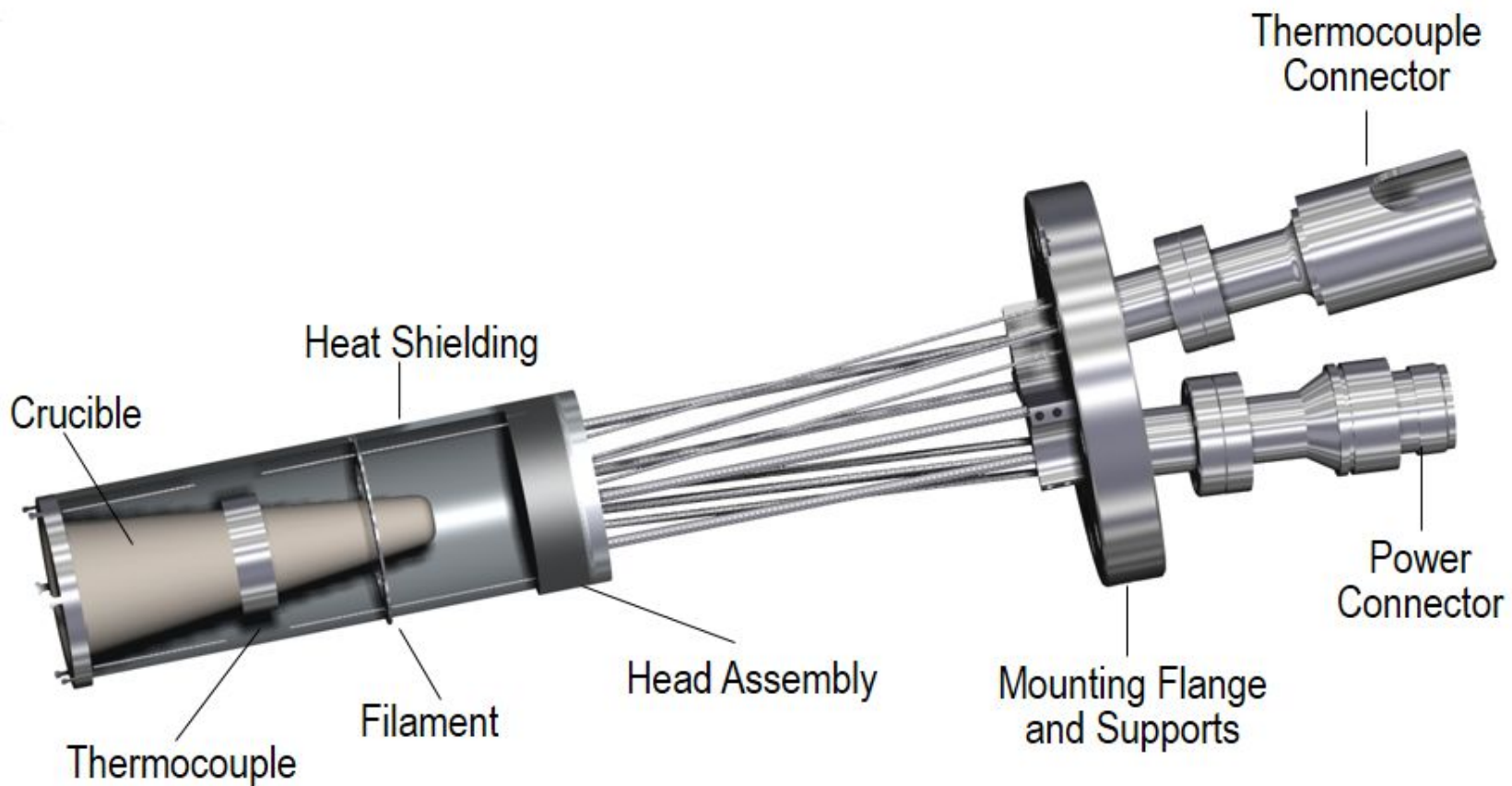




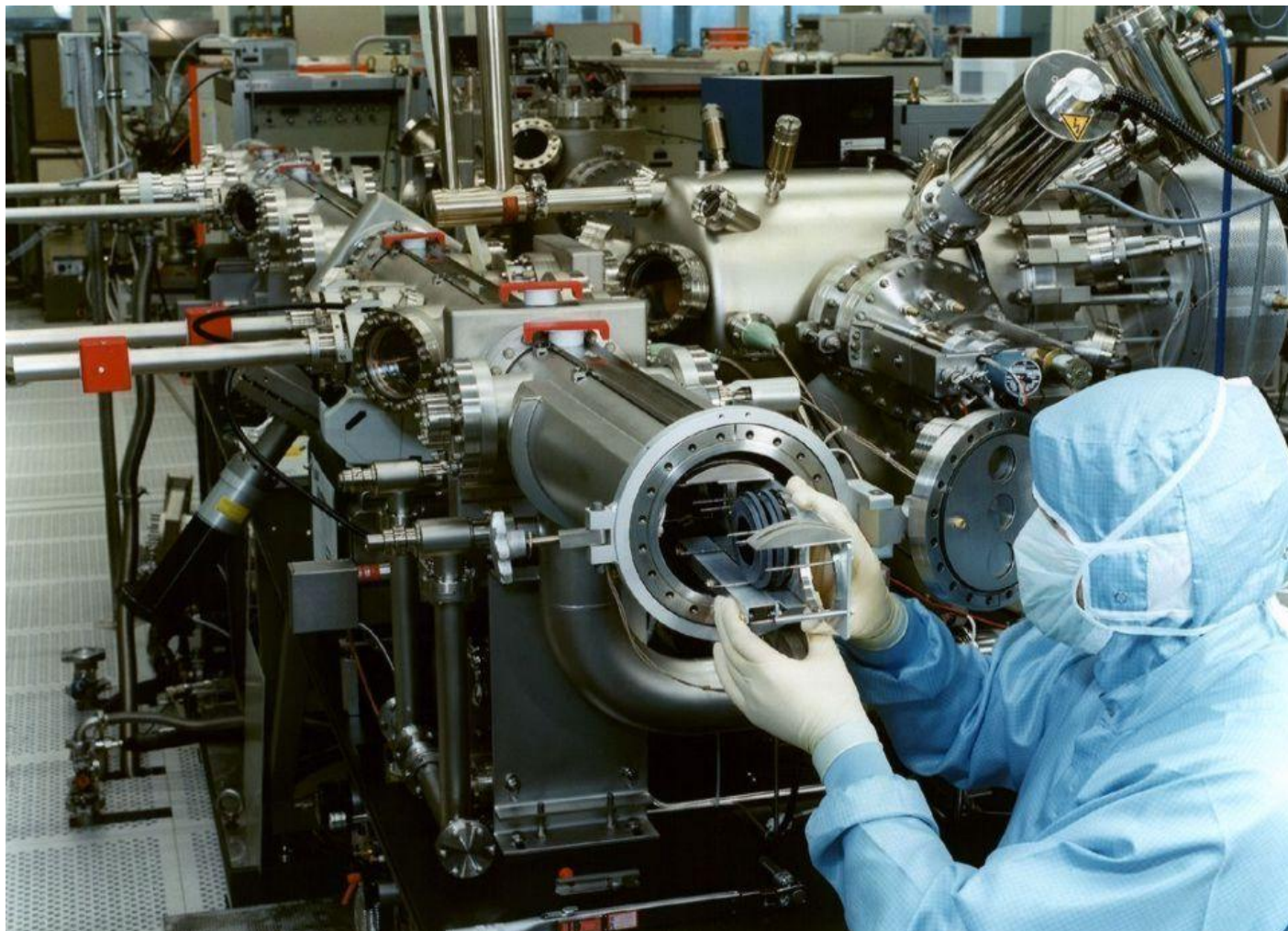
# Молекулярно-пучковая эпитаксия



# Ячейка Кнудсена



# Типичная МПЭ установка



# Другие виды эпитаксии

*Конденсация из паровой фазы в вакууме.* Метод заключается в испарении или распылении материала в вакууме и осаждении его на монокристаллическую подложку.

*Жидкофазная эпитаксия.* Заключается в наращивании монокристаллического слоя из металлического расплава, насыщенного полупроводниковым материалом.

*Твердофазная эпитаксия.* При нагреве многослойной структуры происходит перекристаллизация одной из фаз и ее ориентированный рост на монокристаллическую подложку.

# Контакты

**Ильдар Набиуллин**

Студент 1 курса магистратуры СПбАУ РАН

Телефон: **+7 912 596 91 36**

Эл. почта: **nabildar@yandex.ru**