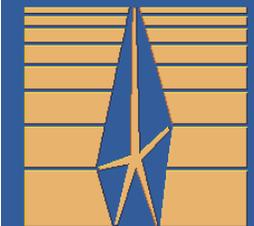


**МОЛОДЕЖНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
ЗИМНЯЯ ШКОЛА 2026**

Санкт Петербург, 25 февраля – 1 марта 2026

**Система квантовая точка-резонатор для однофотонных
источников, созданная молекулярно-лучевой
эпитаксией**

**С.В. Сорокин (лаб. квантовой фотоники, лаб. оптики
кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью)**



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук



РОСАТОМ

**ДК “КВАНТОВЫЕ
ВЫЧИСЛЕНИЯ”**



Российские
железные дороги

**ДК “КВАНТОВЫЕ
КОММУНИКАЦИИ”**

**МОЛОДЕЖНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ
ЗИМНЯЯ ШКОЛА 2026**

Санкт Петербург, 25 февраля – 1 марта 2026

**Система квантовая точка-резонатор для однофотонных
источников, созданная молекулярно-лучевой
эпитаксией**

**С.В. Сорокин (лаб. квантовой фотоники, лаб. оптики
кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью)**

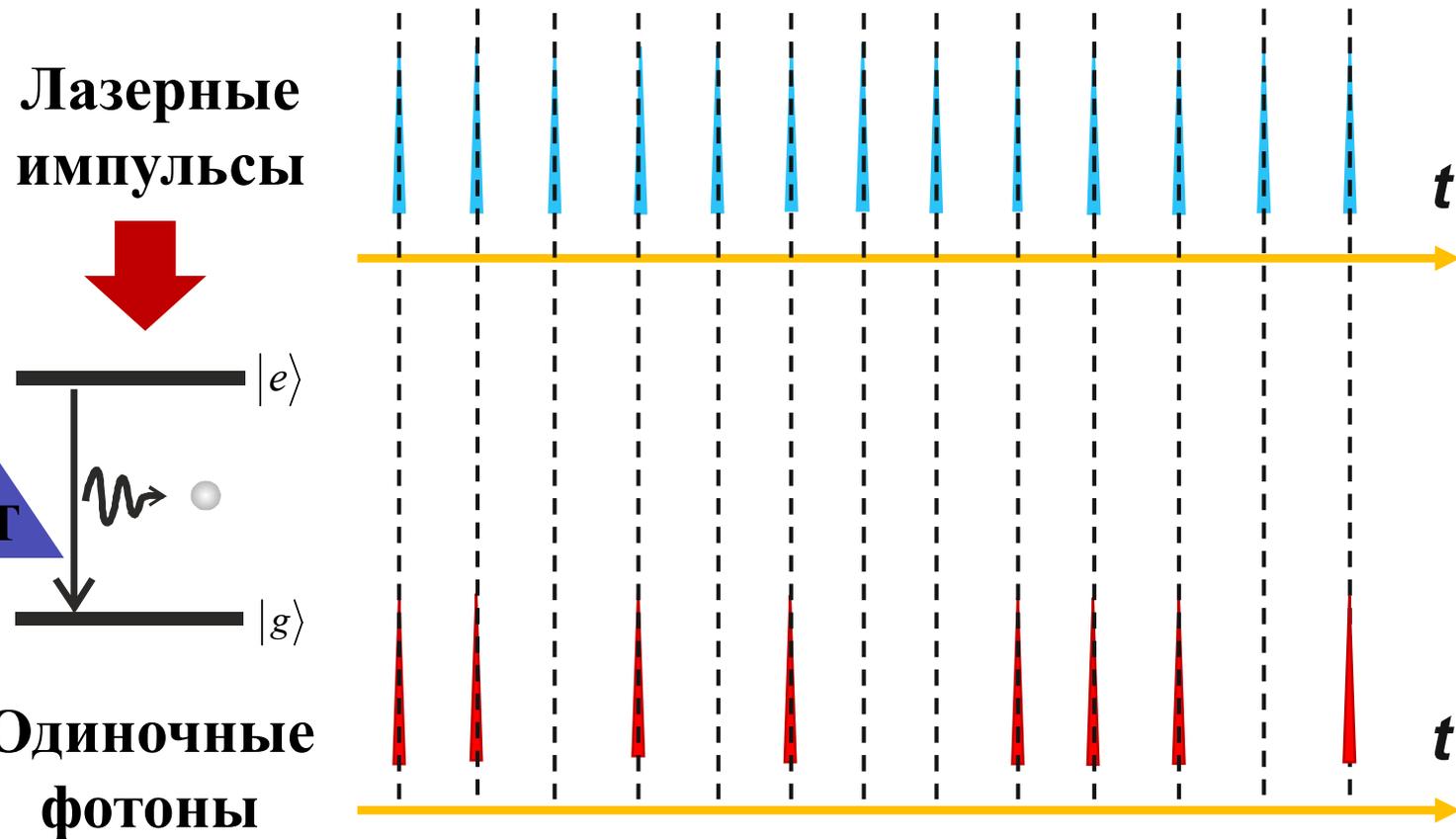
Руководитель НИР: А.А. Торопов

МПЭ: Г.В. Климко, О.Е. Лакунцева, И.В. Седова, С.В. Сорокин

**Пост-рост: Ю.А. Салий, Д.С. Березина, Д.М. Колесникова, М.А. Бобров, А.Г. Кузьменков,
Ю.М. Задиранов, М.М. Кулагина, Н.А. Малеев**

**Структурная характеристика: Н.А. Прасолов, А.Н. Семенов, А.В. Мясоедов,
С.И. Трошков**

**Спектроскопия: А.И. Галимов, Ю.М. Серов, А.И. Веретенников, Г.П. Вейшторт,
М.В. Рахлин, Т.В. Шубина**



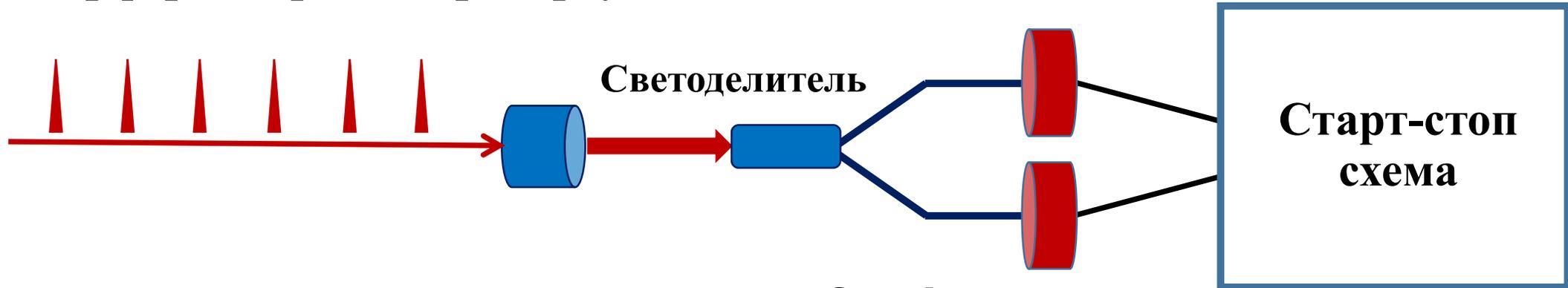
**2-уровневые
квантовые системы**

Одиночные:

- Атомы, ионы, молекулы
- Дефекты в кристаллах
- **Квантовые точки (КТ)**

Яркость – вероятность излучения фотона за один импульс накачки

Интерферометр Хэнбери Брауна – Твисса (НВТ)

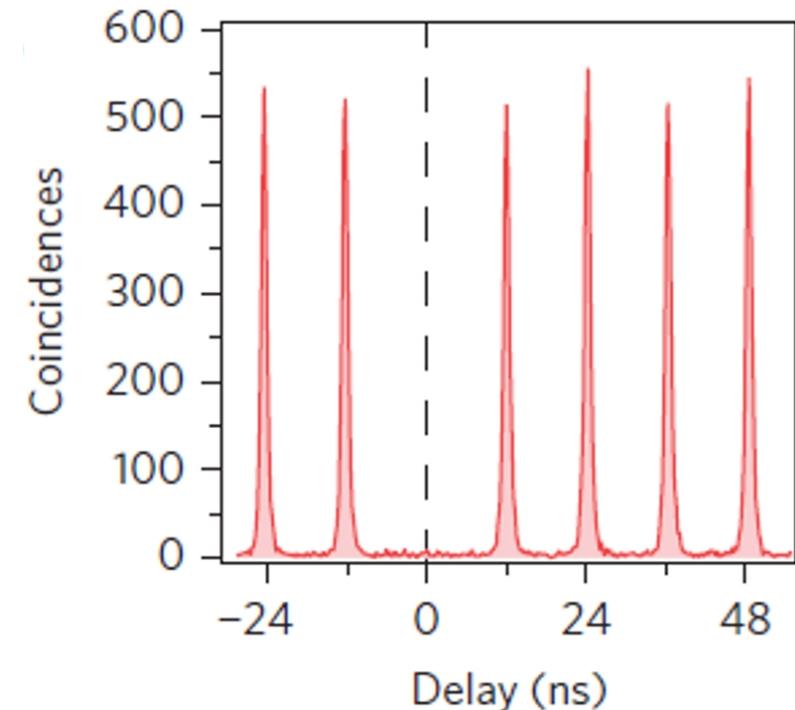


Корреляционная функция 2-го порядка:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle N(t)N(t+\tau) \rangle}{\langle N \rangle^2}$$

$N(t)$ - вероятность детектирования фотона

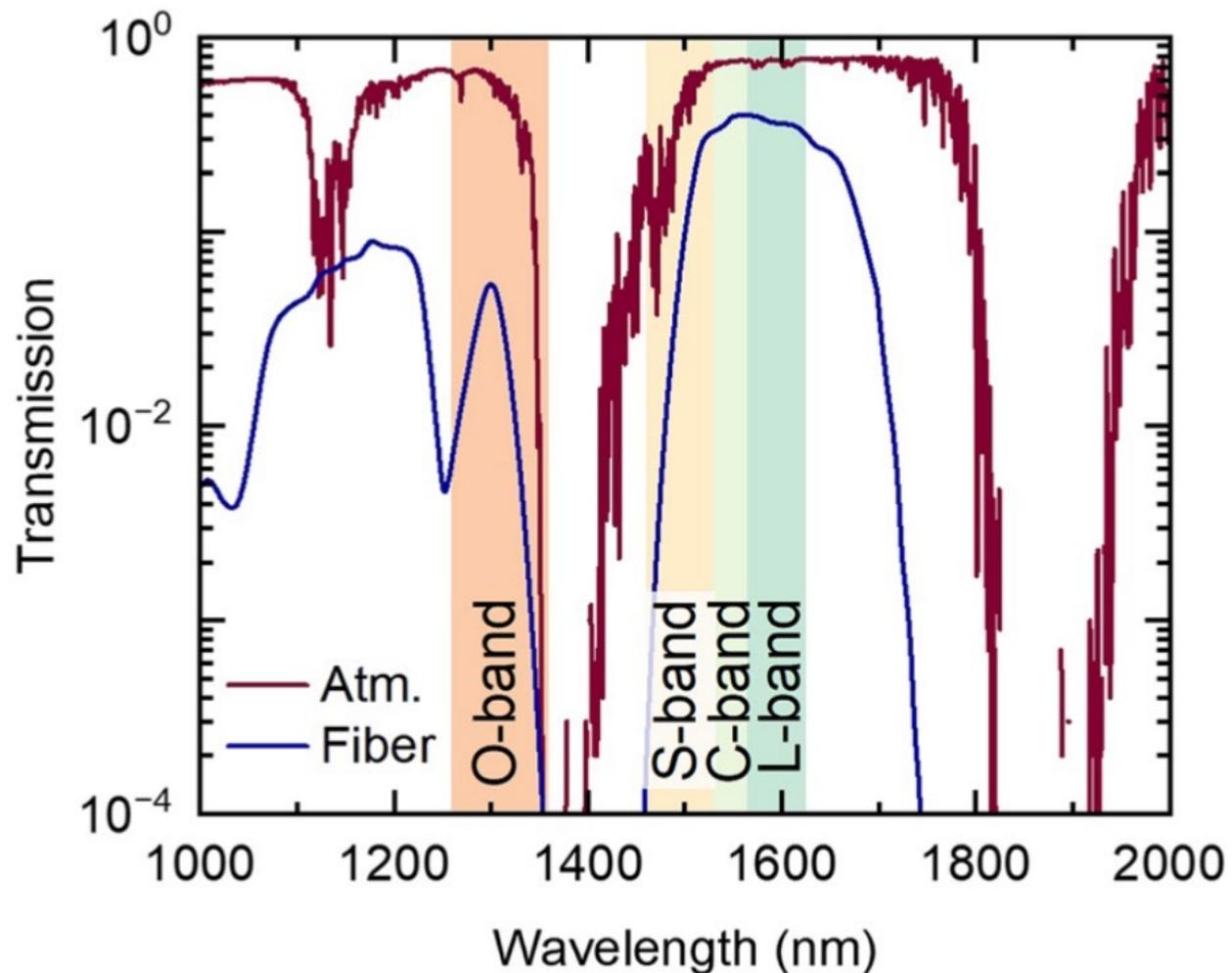
Однофотонные
детекторы



Чистое однофотонное излучение:

$$g^{(2)}(0) = 0$$

$$g^{(2)}(0) < 0.03 - 0.05$$



✓ Квантовое распределение ключей (КРК), глобальные «квантовые» сети, распределенные квантовые вычисления

□ С-диапазон (1530 - 1565 нм)

□ L-диапазон (1565 - 1625 нм)

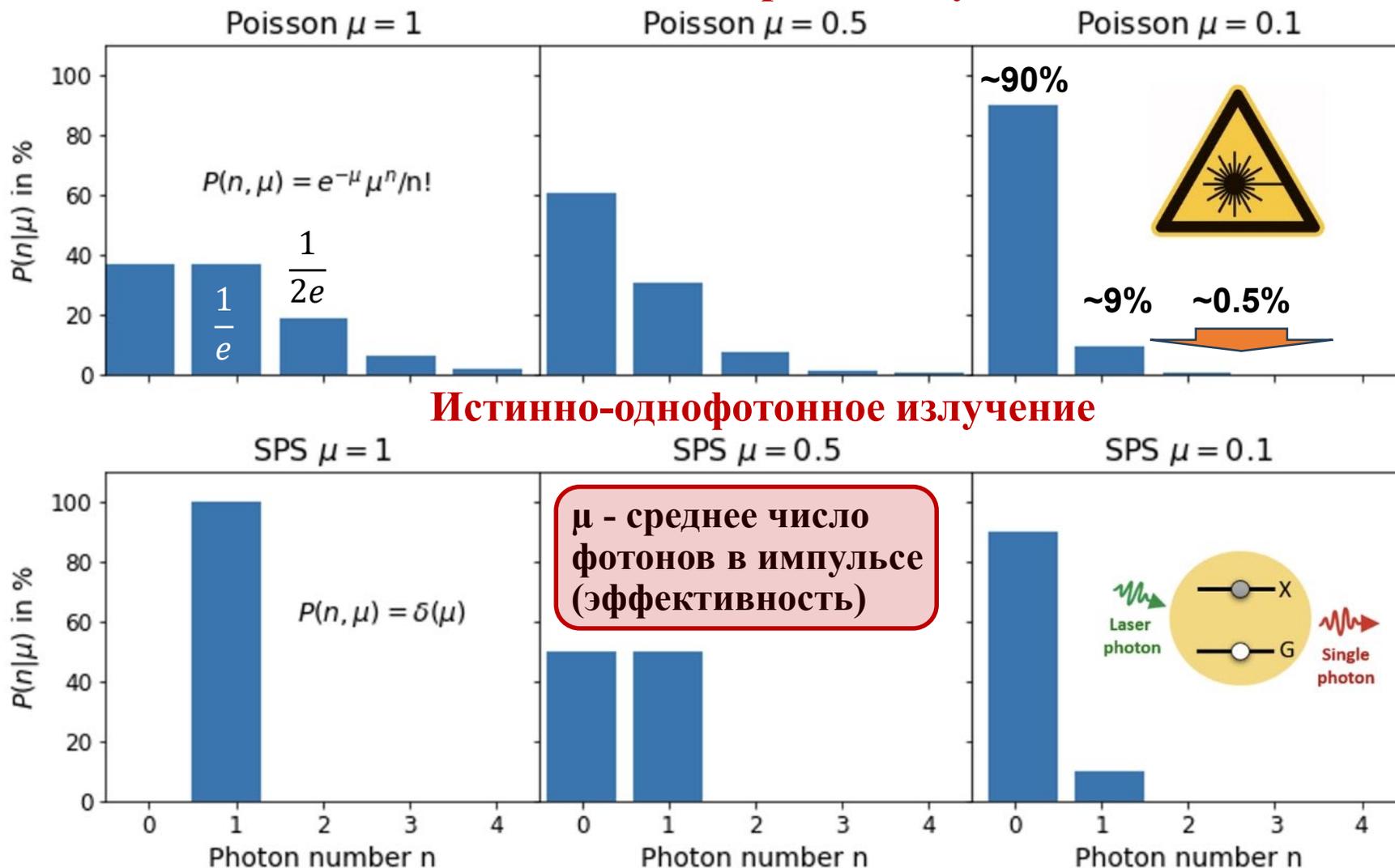
✓ Передача «квантовых» данных на большие расстояния по волоконно-оптическим и атмосферным линиям связи

✓ Интегральная квантовая фотоника на Si

[P. Holewa et al., Solid-state single-photon sources operating in the telecom wavelength range, *Nanophotonics* 14, 1729 (2025)]

Фотонная статистика: импульсные источники света

Ослабленные лазерные импульсы



Из-за сложностей в разработке близких к идеальным квантовых источников света, большинство реализаций квантового распределения ключей и все коммерческие продукты используют ослабленные лазерные импульсы с фазовой рандомизацией, также известные как слабые когерентные импульсы (СКП). СКП могут лишь приблизительно описывать однофотонное состояние, поскольку число фотонов по-прежнему подчиняется статистике Пуассона.

[D.A. Vajner et al., Quantum Communication Using Semiconductor Quantum Dots, *Adv. Quantum Technol.* **5**, 2100116 (2022)]

Зимняя школа 2026, Санкт-Петербург, 25 февраля - 01 марта 2026 г.

Источники одиночных фотонов: квантовые вычисления

7

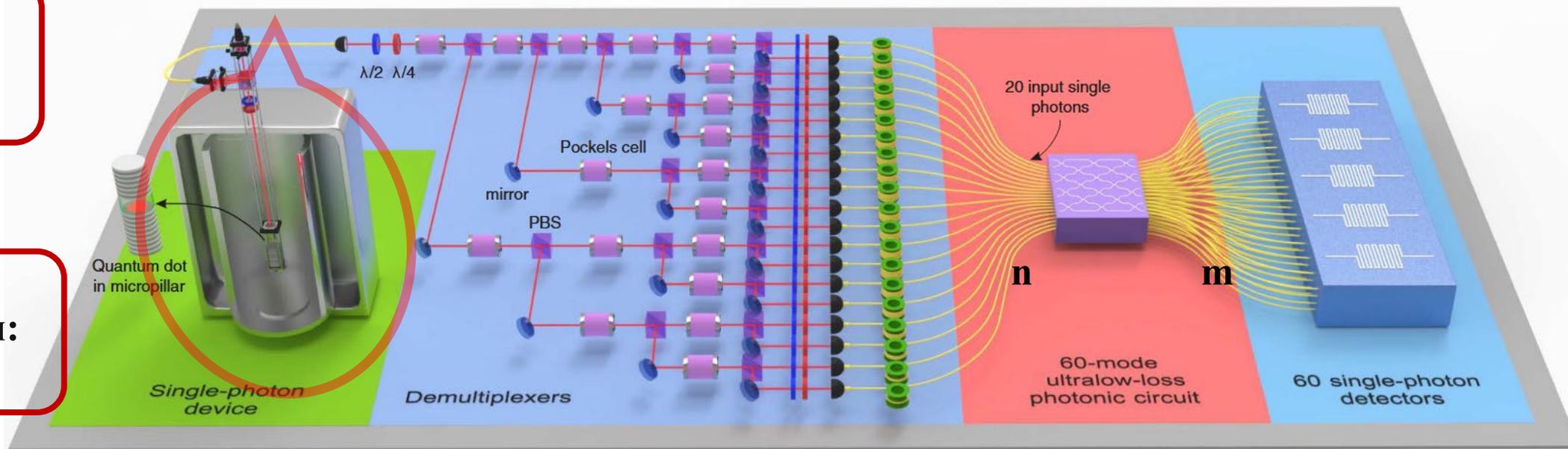
Квантовое вычислительное превосходство:

Источник неразличимых фотонов
(InAs/GaAs квантовая точка, $\lambda \sim 920$ нм):

«End-to-end»
эффективность
(яркость): 21%

$g^{(2)}(0): 0.025$

Степень
неразличимости:
95.4%

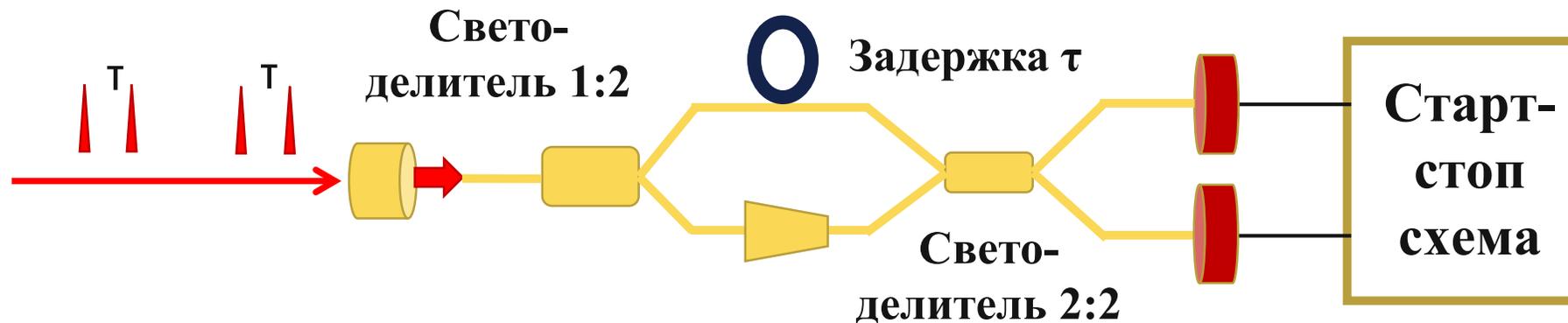


[H. Wang et al., **Boson Sampling** with 20 Input Photons and a 60-Mode Interferometer in a 10^{14} – Dimensional Hilbert Space, *Phys. Rev. Lett.* 123, 250503 (2019)]

- Расчет перманента матрицы $n \times m$
- Решение задач теории графов

Средняя частота: 16 МГц
(Оптическая накачка 76 МГц)

Интерферометр Хонга-У-Мандела (НОМ)



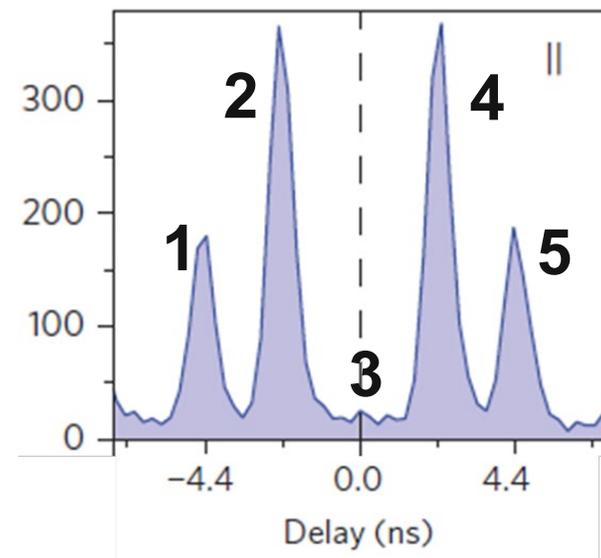
Видность двух-фотонной квантовой интерференции:

$$M(\Delta t) = \frac{A_3}{A_2 + A_4}$$

100% неразличимость:

$$M(0) = 0$$

$$V > 0.95$$



Квантовая криптография Защищенные оптические линии связи

- ✓ **Оптоволоконные линии связи**
- ✓ **Линии атмосферной и космической связи**
- ✓ **Использование квантовых протоколов передачи информации: максимальная защита от подслушивания**

Проблемы:

Реализация эффективных генераторов строго-одиночных фотонов “по требованию”, работающих в требуемом спектральном диапазоне

Критическое значение яркости («конечной» (end-to-end) эффективности) источника: $\langle n \rangle \sim 0.37$

Линейные оптические квантовые вычисления (квантовый компьютер)

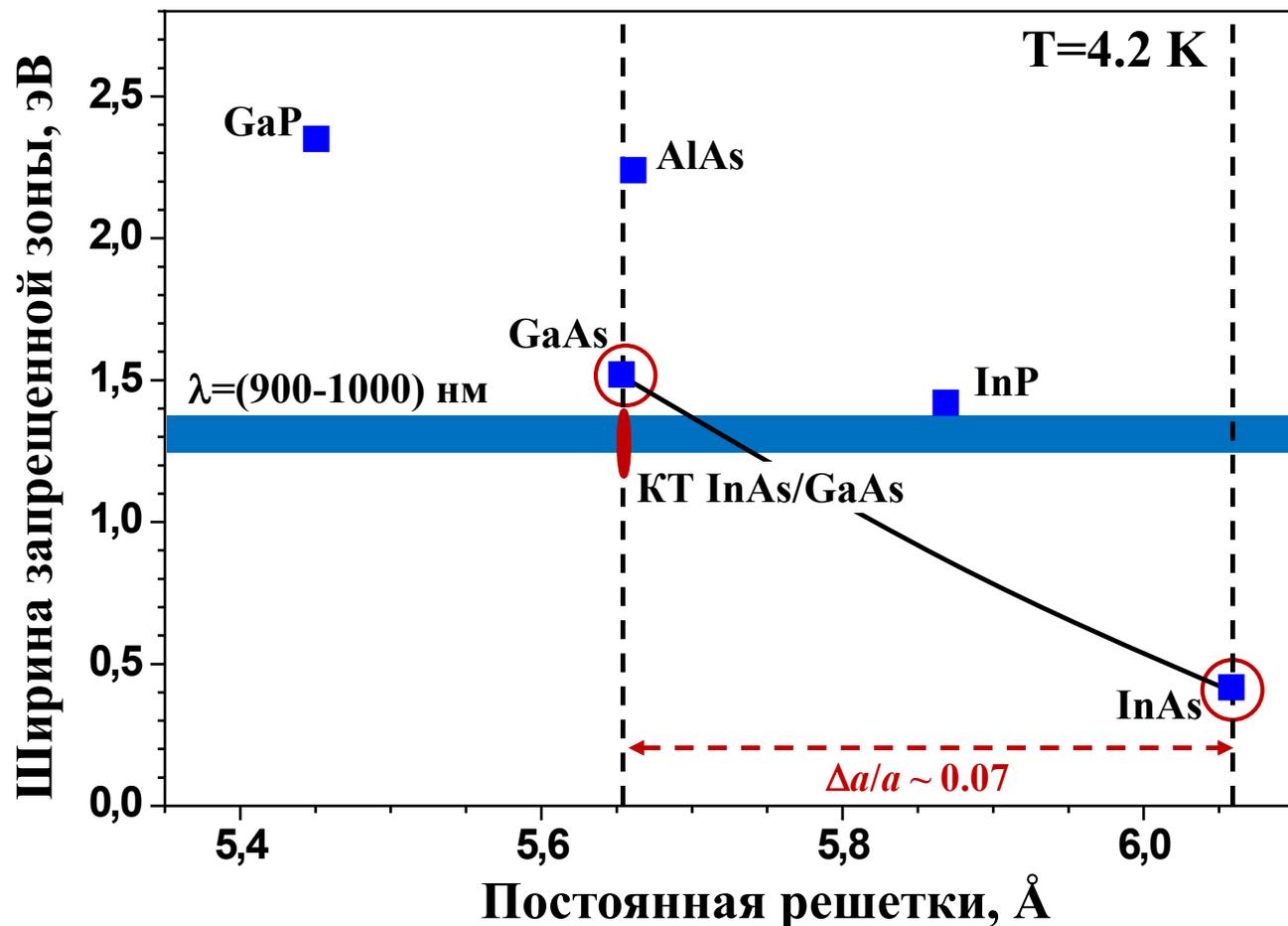
- ✓ **Стабильность “фотонных кубитов”**
- ✓ **Элементы – линейные оптические компоненты: зеркала, линзы и светоделители**
- ✓ **Взаимодействие фотонов – квантовая интерференция – сильный эффект, работающий при $T=300\text{K}$**

Проблемы:

Реализация эффективных генераторов неразличимых одиночных фотонов

Критическое значение яркости («конечной» (end-to-end) эффективности) источника: $\langle n \rangle \sim 0.7$

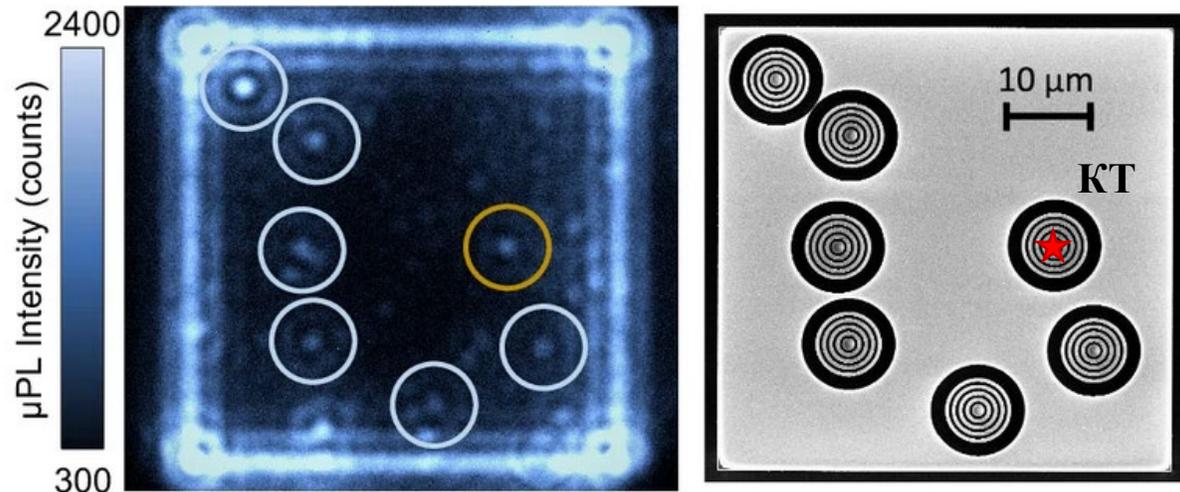
Источник одиночных фотонов диапазона (900-1000) нм на основе КТ InAs/GaAs.



- ✓ Рост на подложках GaAs
 - ✓ Наличие линейки решеточно-согласованных твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$: многослойные гетероструктуры распределенных брэгговских отражателей (РБО).
 - ✓ Слои структуры (кроме слоя КТ) согласованы по периоду решетки с подложкой \Rightarrow отсутствие высокой плотности прорастающих дислокаций
 - ✓ Оптимальное рассогласование параметров кристаллической решетки InAs и GaAs ($\Delta a/a \sim 7\%$): самоорганизованный рост КТ InAs/GaAs
- ✓ КТ InAs/GaAs естественным образом излучают фотоны в диапазоне 900–1000 нм

- ✓ Сбор фотонов в выделенную оптическую моду (направленный вывод излучения одиночной КТ)
- ✓ Ускорение спонтанной излучательной рекомбинации: эффект Парселла

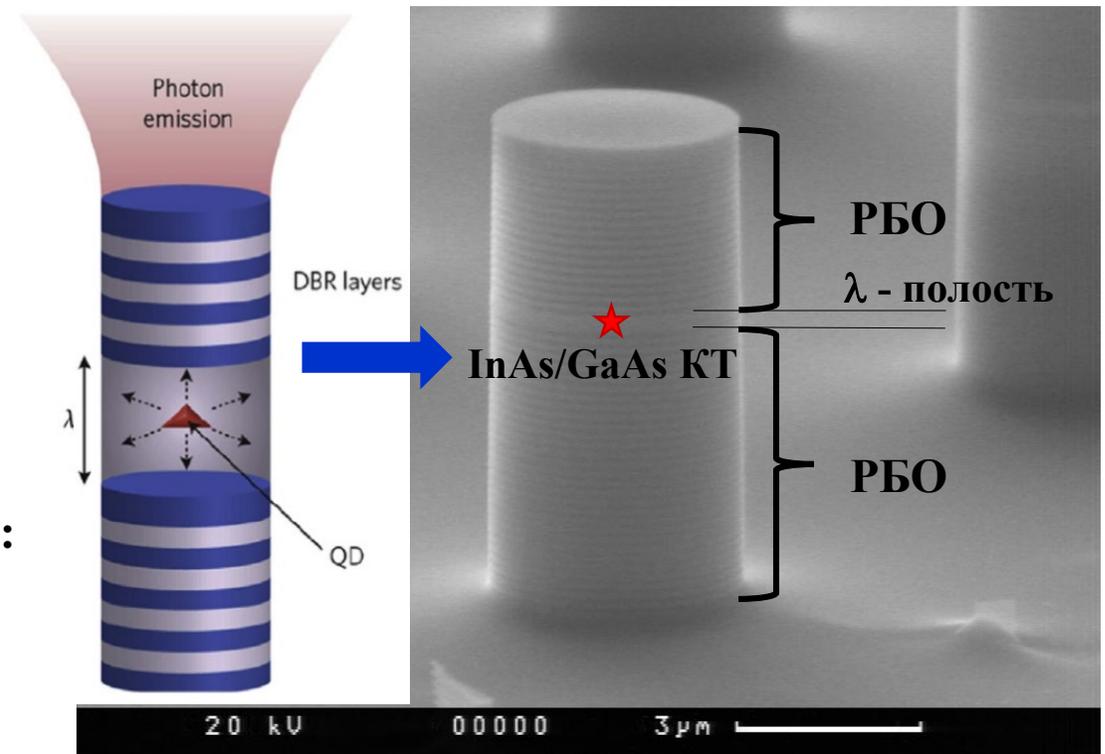
Кольцевой брэгговский резонатор



Построение микрорезонатора вокруг “оптимальной” КТ: криолитография

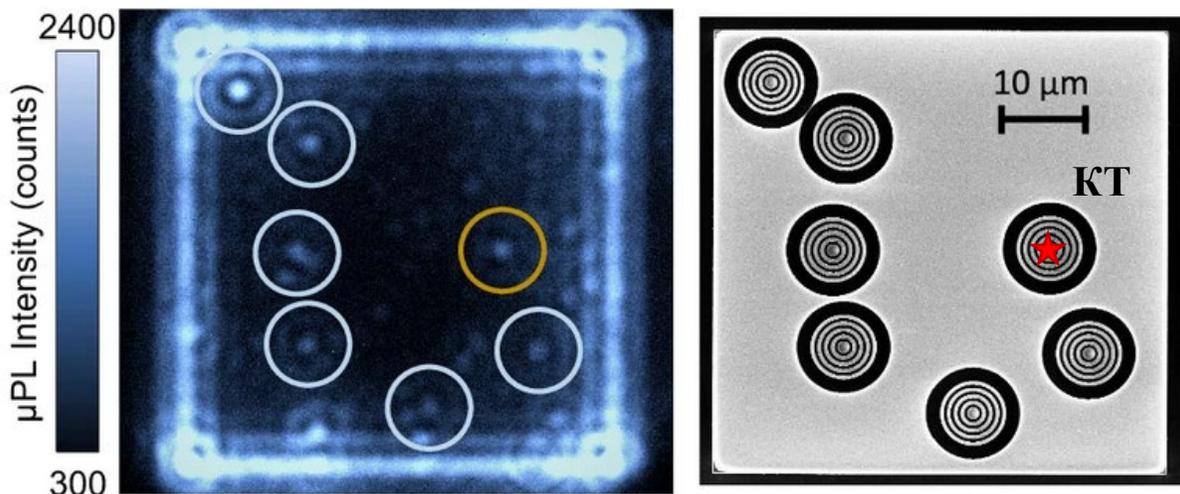
Построение микрорезонатора вокруг “случайной” КТ с последующим отбором однофотонных источников

Столбик с распределенными брэгговскими зеркалами (РБО) и одиночной КТ



- ✓ Сбор фотонов в выделенную оптическую моду (направленный вывод излучения одиночной КТ)
- ✓ Ускорение спонтанной излучательной рекомбинации: эффект Парселла

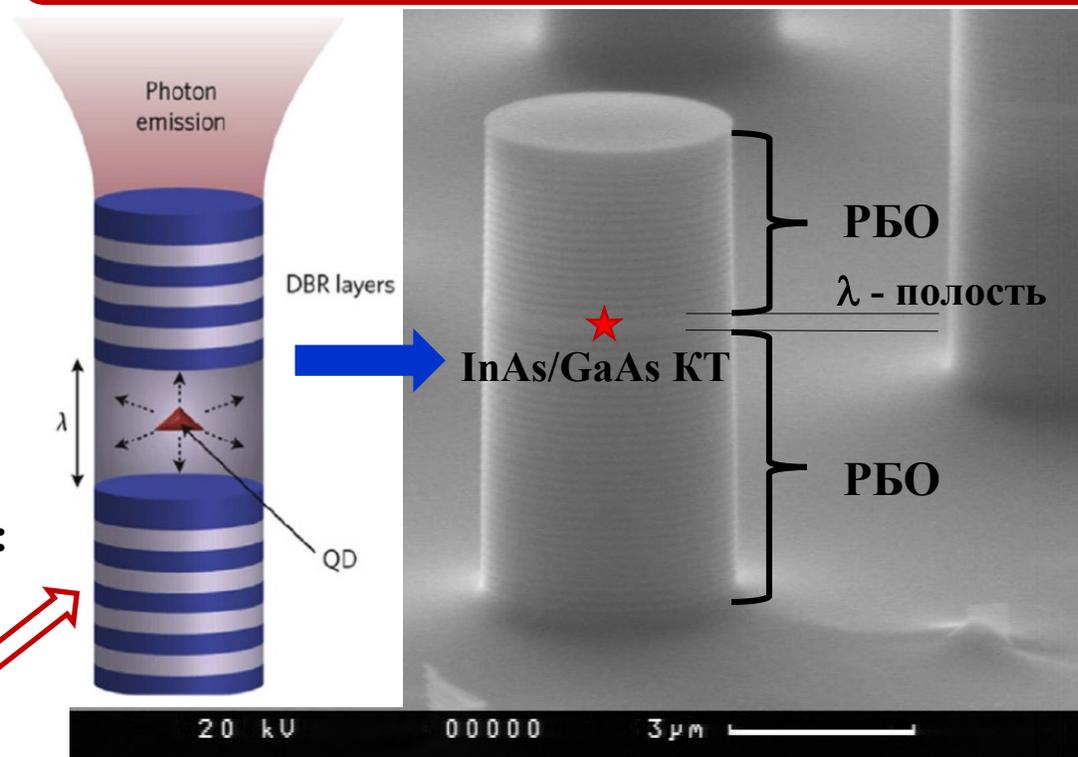
Кольцевой брэгговский резонатор



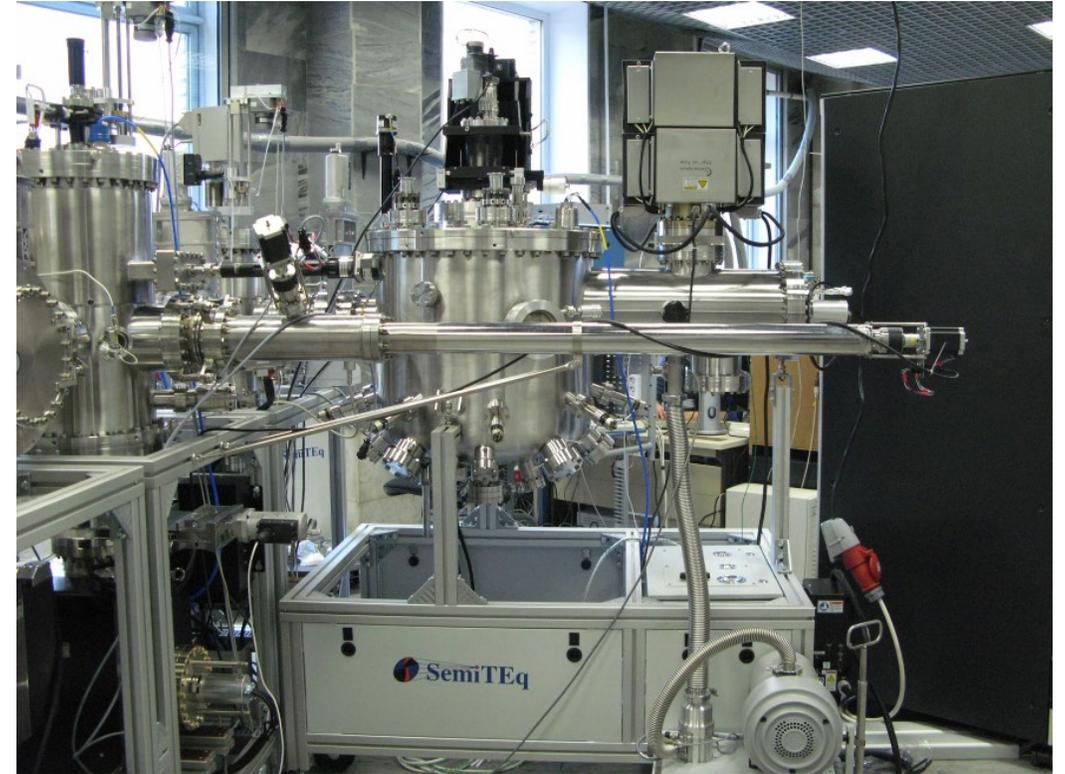
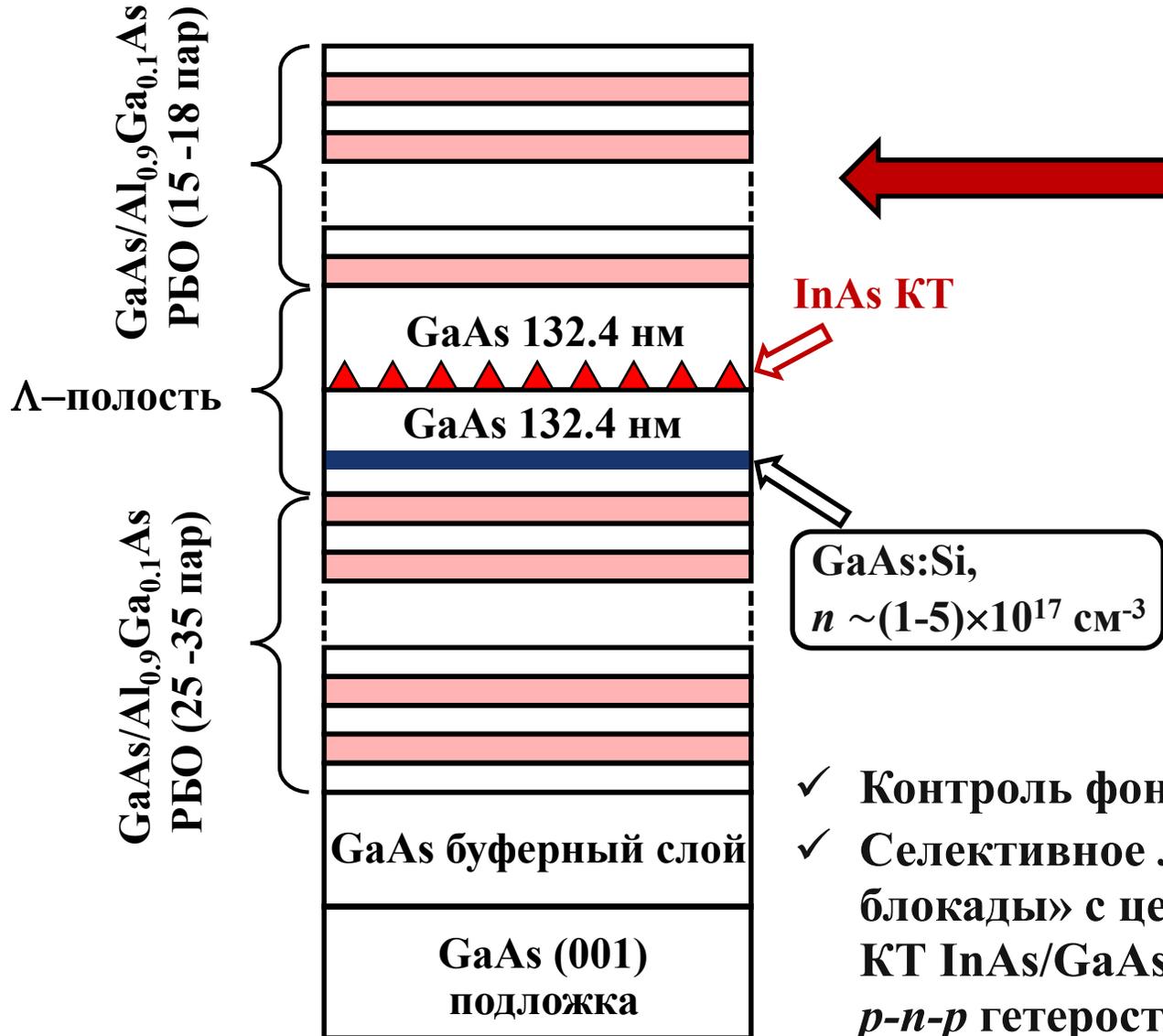
Построение микрорезонатора вокруг “оптимальной” КТ: криолитография

Построение микрорезонатора вокруг “случайной” КТ с последующим отбором однофотонных источников

Столбик с распределенными брэгговскими зеркалами (РБО) и одиночной КТ



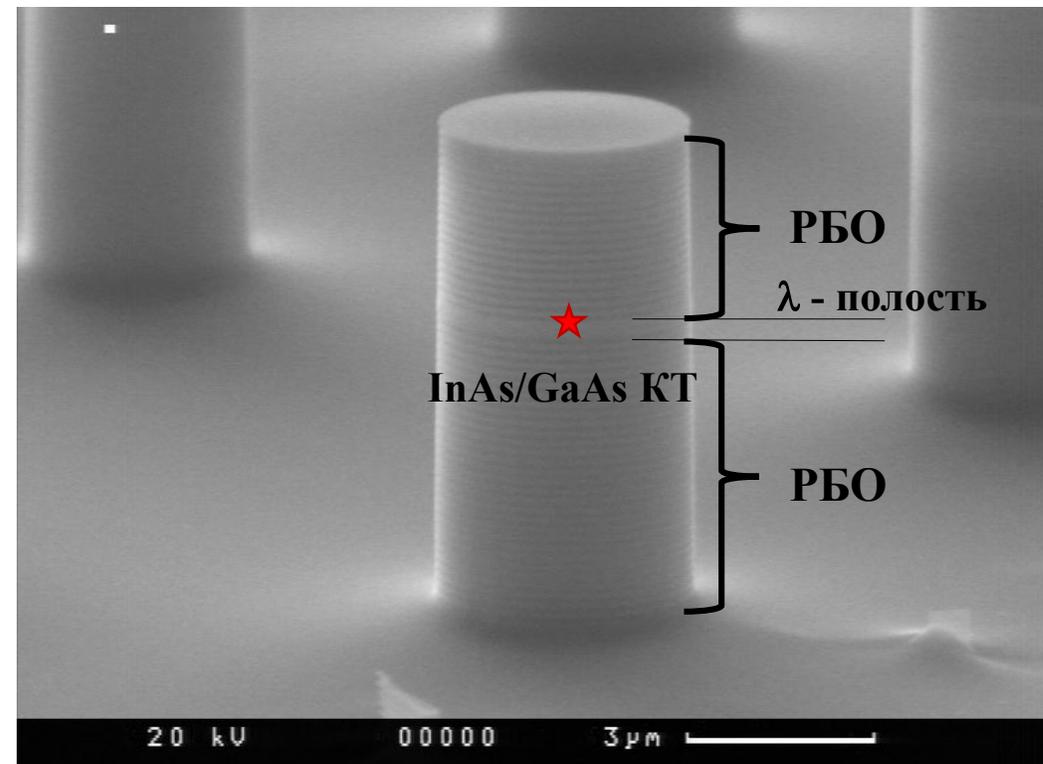
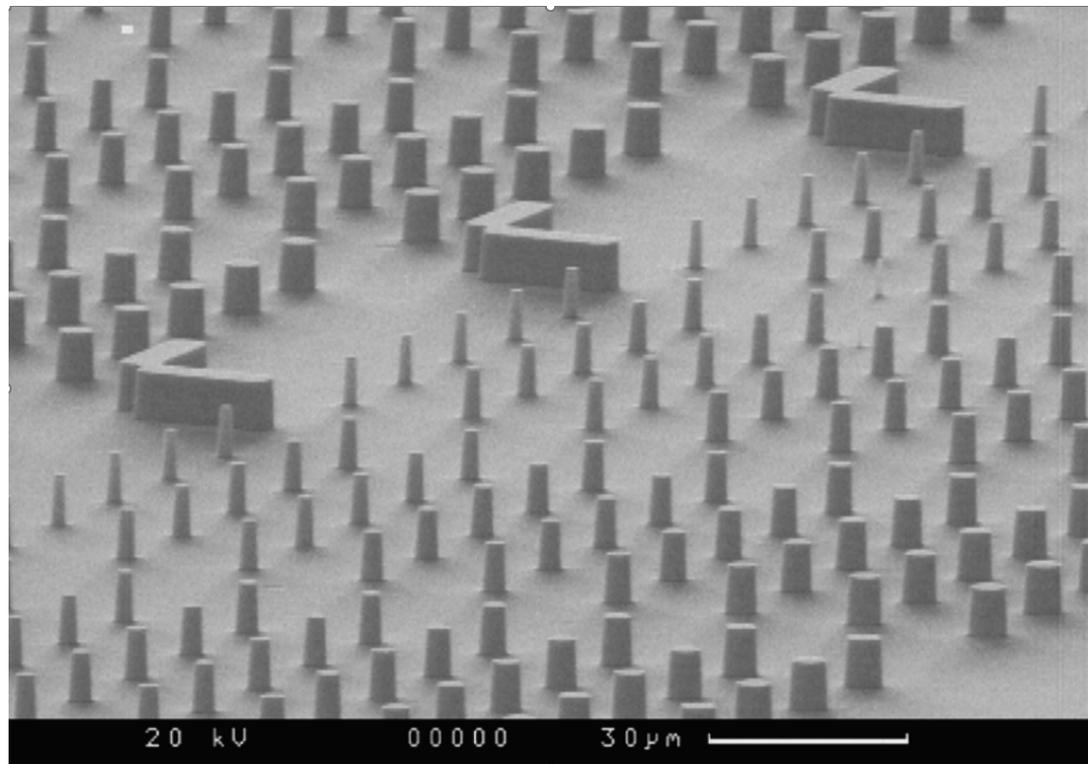
Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ)



- ✓ Контроль фонового *p*-легирования GaAs
- ✓ Селективное легирование *n*-типа: режим «кулоновской блокады» с целью контроля зарядового состояния одиночных КТ InAs/GaAs в процессе изготовления микрорезонаторных *p-n-p* гетероструктур

Формирование микрорезонаторных структур

- ✓ Фотолитография
- ✓ Реактивное ионное травление

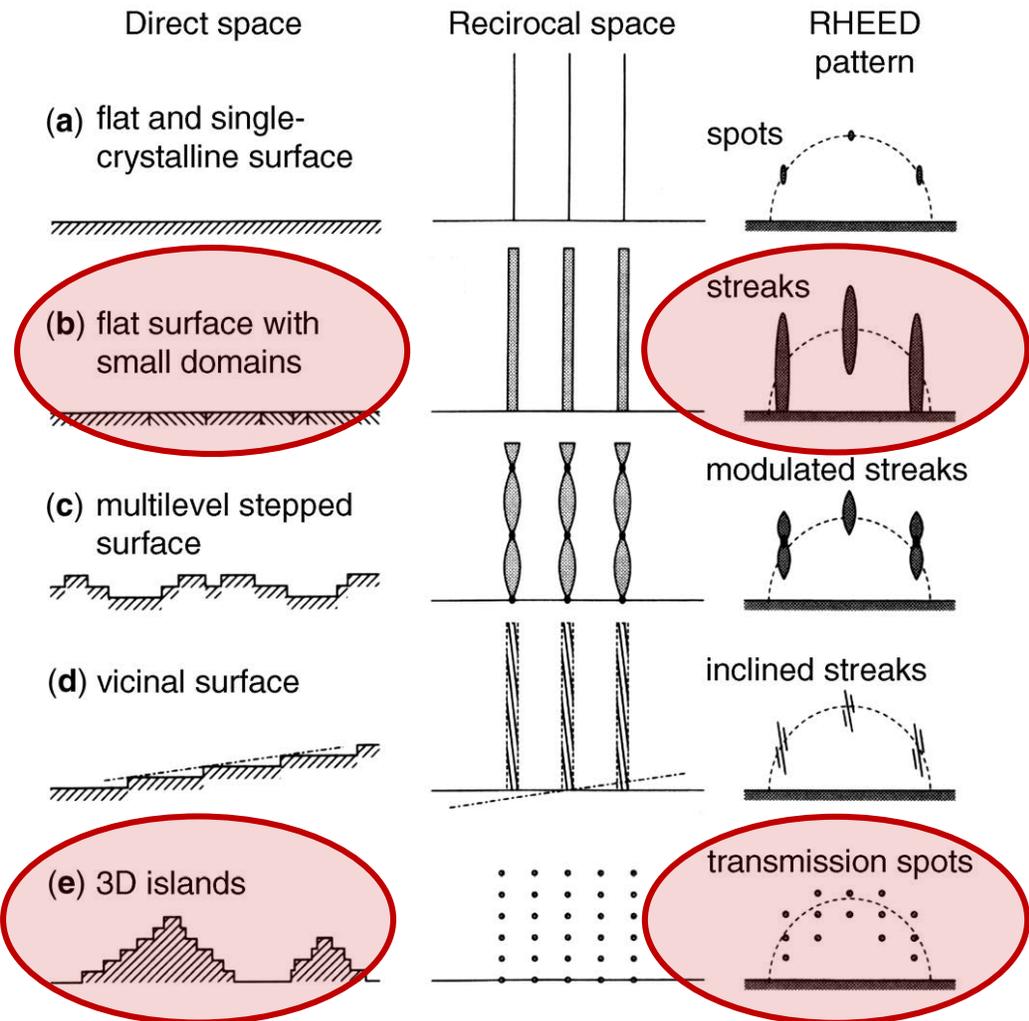
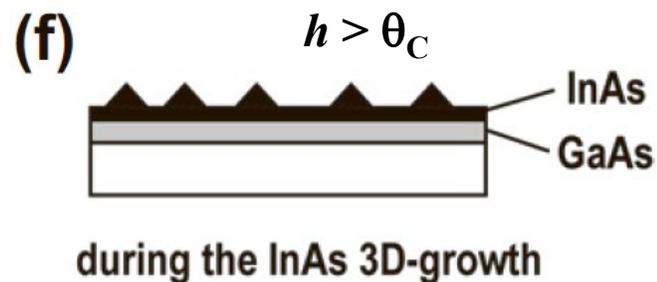
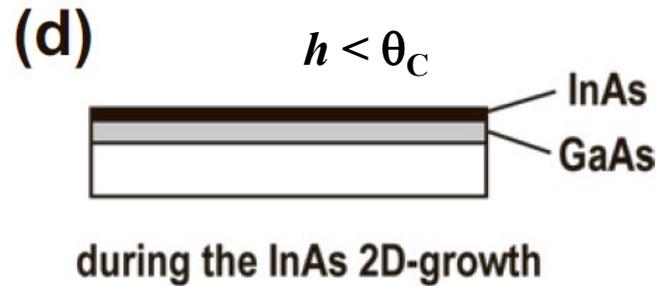
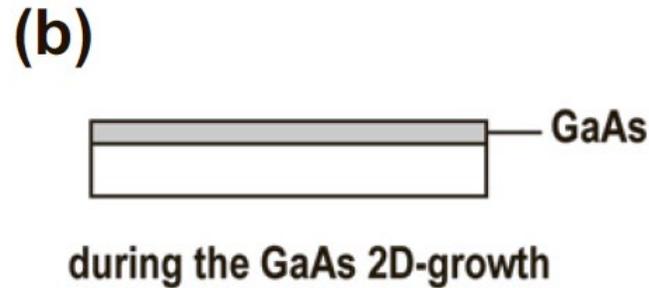
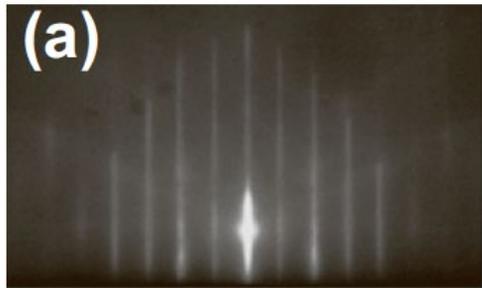


✓ Оптимальная поверхностная плотность КТ: $\rho_{\text{QD}} \sim (1-5) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$

**Особенности формирования ансамбля КТ
InAs/GaAs с низкой поверхностной
плотностью методом эпитаксии из
молекулярных пучков.**

Самоформирование наноструктур с КТ с низкой поверхностной плотностью (рост по механизму Странского-Крастанова)

Картини ДБЭО в процессе МПЭ КТ InAs/GaAs(001):

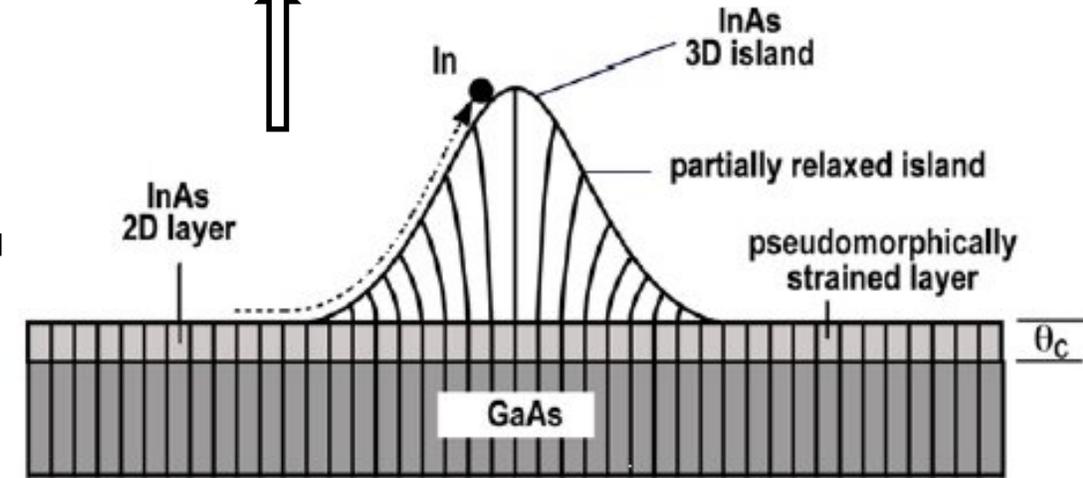
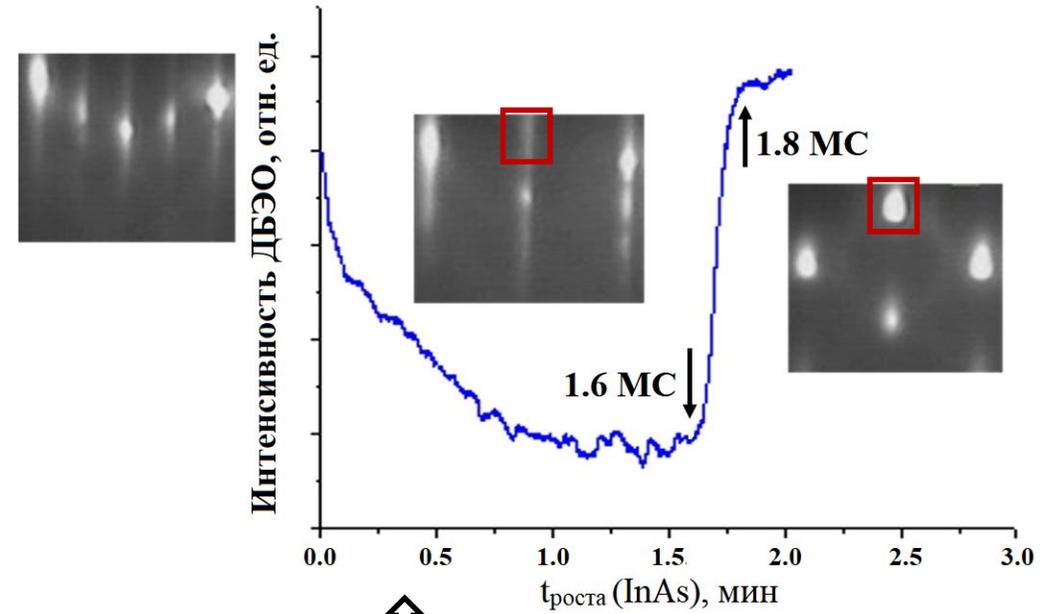
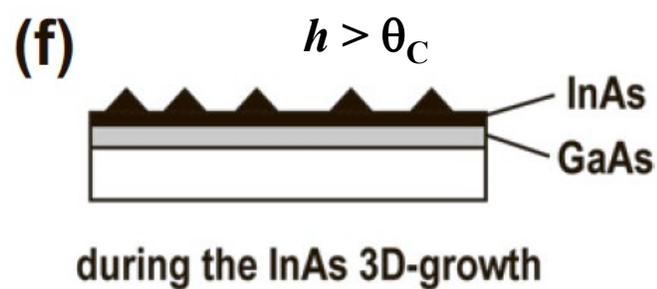
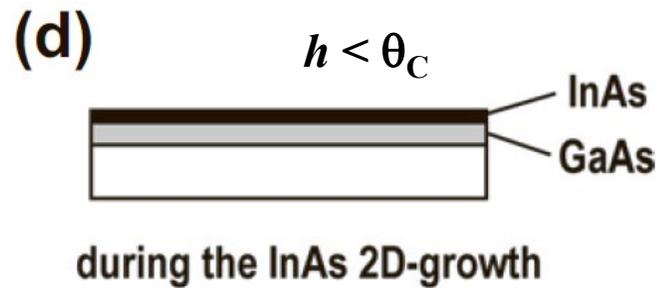
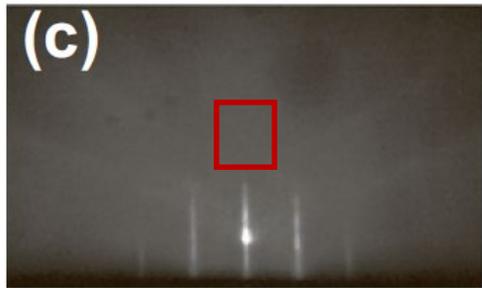
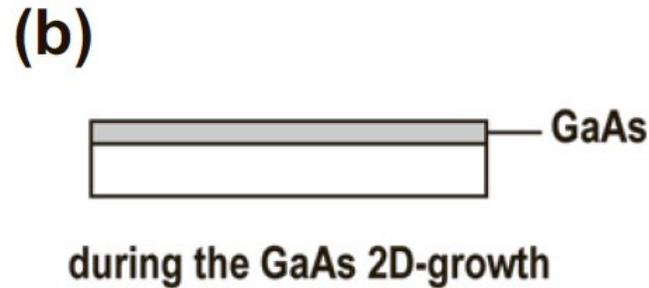
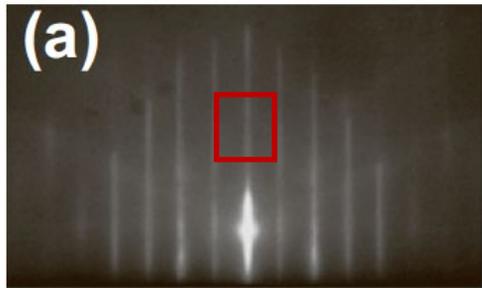


[S. Franchi. Molecular beam epitaxy: fundamentals, historical background and future prospects, in “Molecular beam epitaxy: from research to mass production”, ed. by M. Henini, 1st Edition, Elsevier Inc., 2013]

[Sh. Hasegawa. Characterization of Materials (2nd Edition), chapter "Reflection High-Energy Electron Diffraction", pp. 1925–1938 (2012); <https://doi.org/10.1002/0471266965.com139>]

Самоформирование наноструктур с КТ с низкой поверхностной плотностью (рост по механизму Странского-Крастанова)

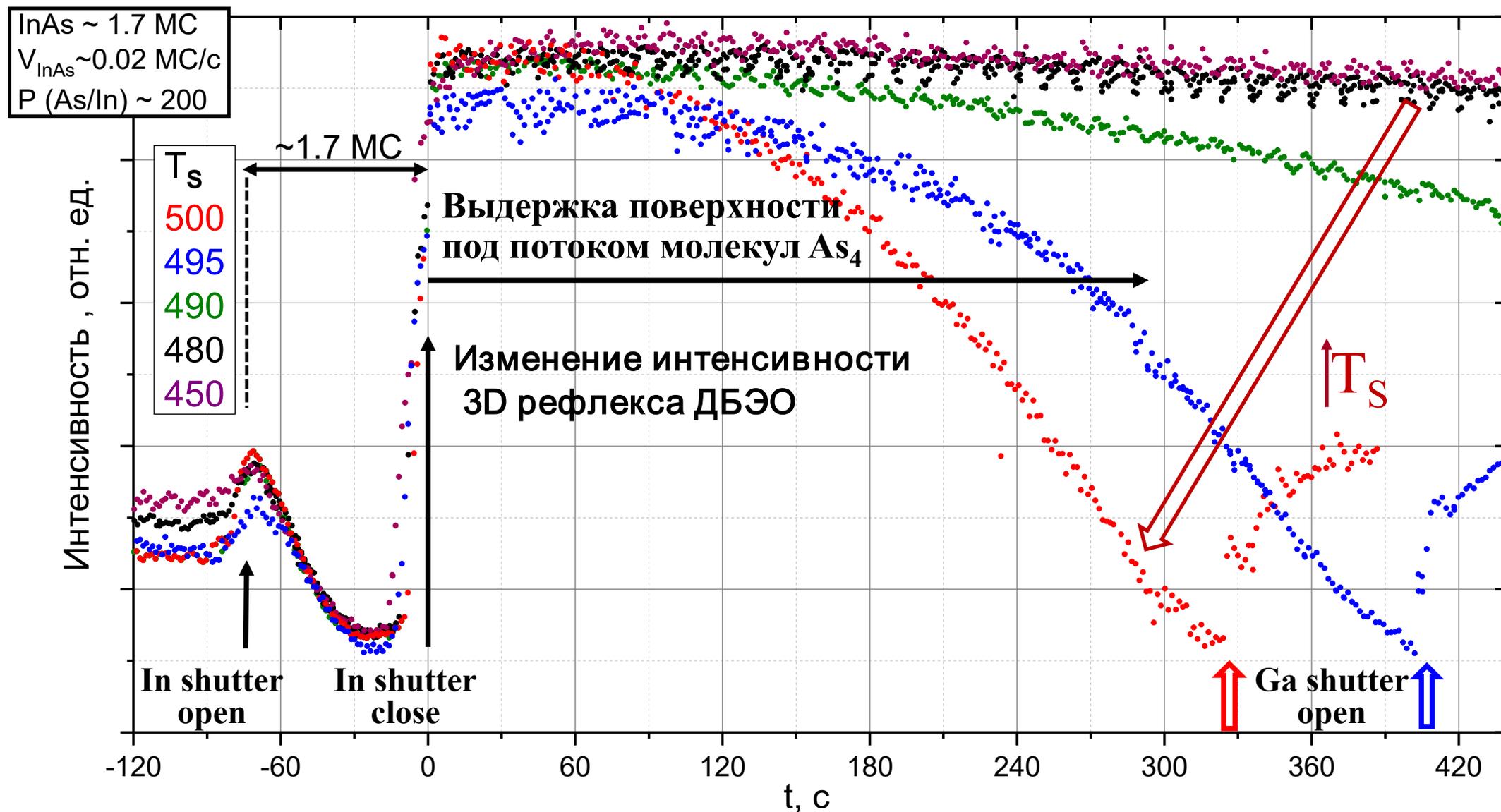
Картинки ДБЭО в процессе МПЭ КТ InAs/GaAs(001):



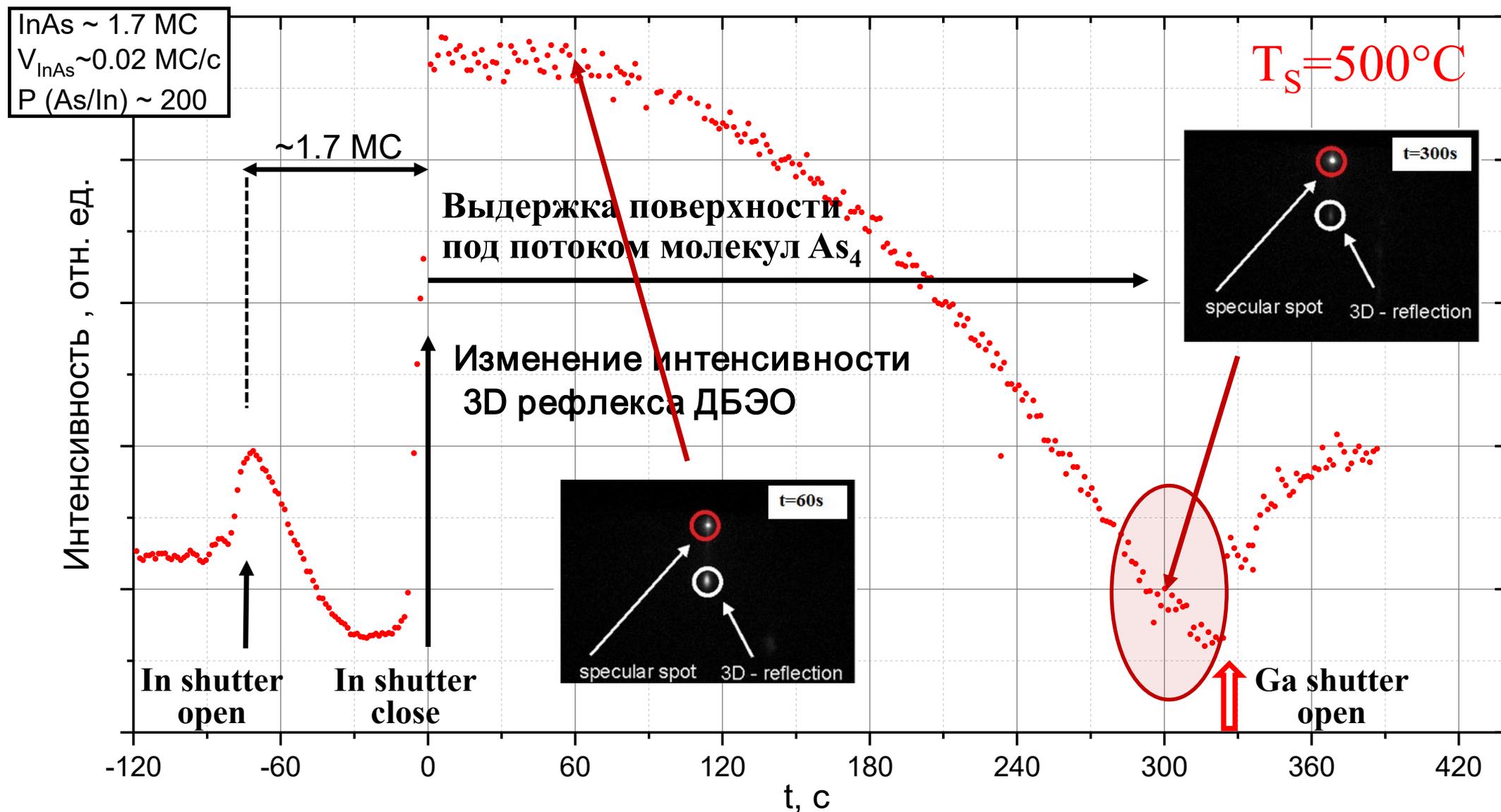
3D growth mechanisms

[S. Franchi. Molecular beam epitaxy: fundamentals, historical background and future prospects, in “Molecular beam epitaxy: from research to mass production”, ed. by M. Henini, 1st Edition, Elsevier Inc., 2013]

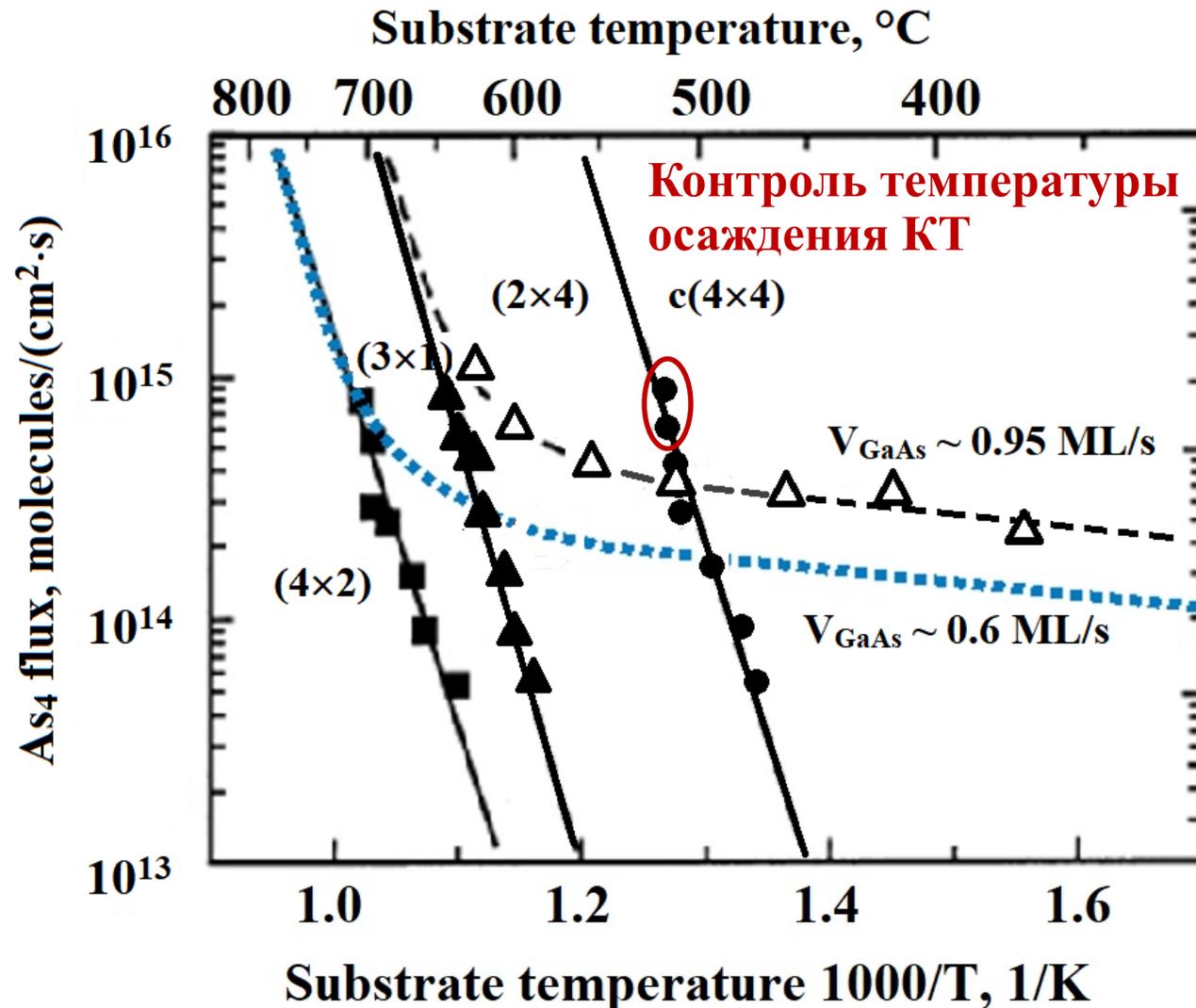
Самоформирование наноструктур с КТ с низкой поверхностной плотностью (рост по механизму Странского-Крастанова)



Самоформирование наноструктур с КТ с низкой поверхностной плотностью (рост по механизму Странского-Крастанова)



Самоформирование наноструктур с КТ с низкой поверхностной плотностью (рост по механизму Странского-Крастанова)

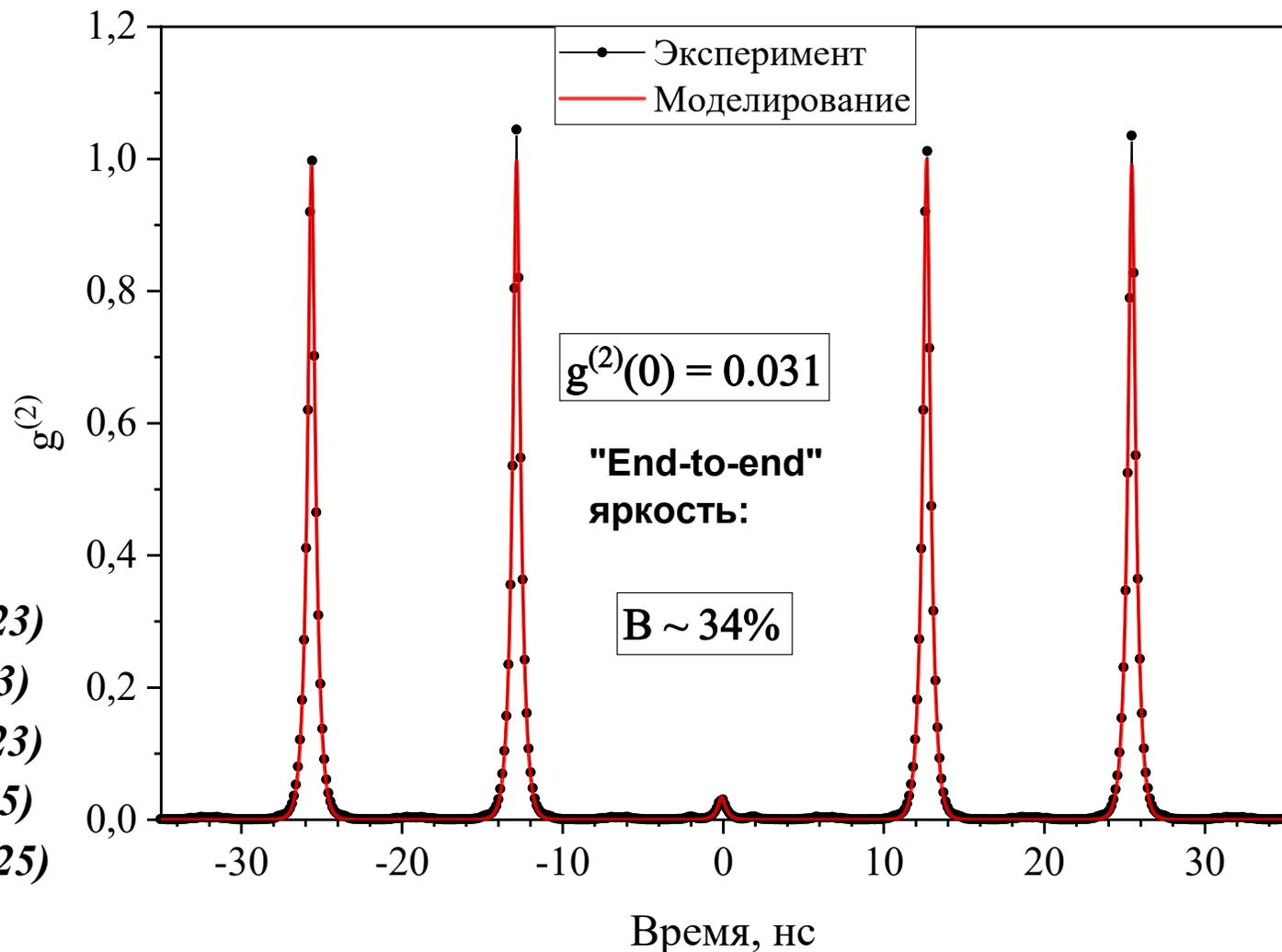
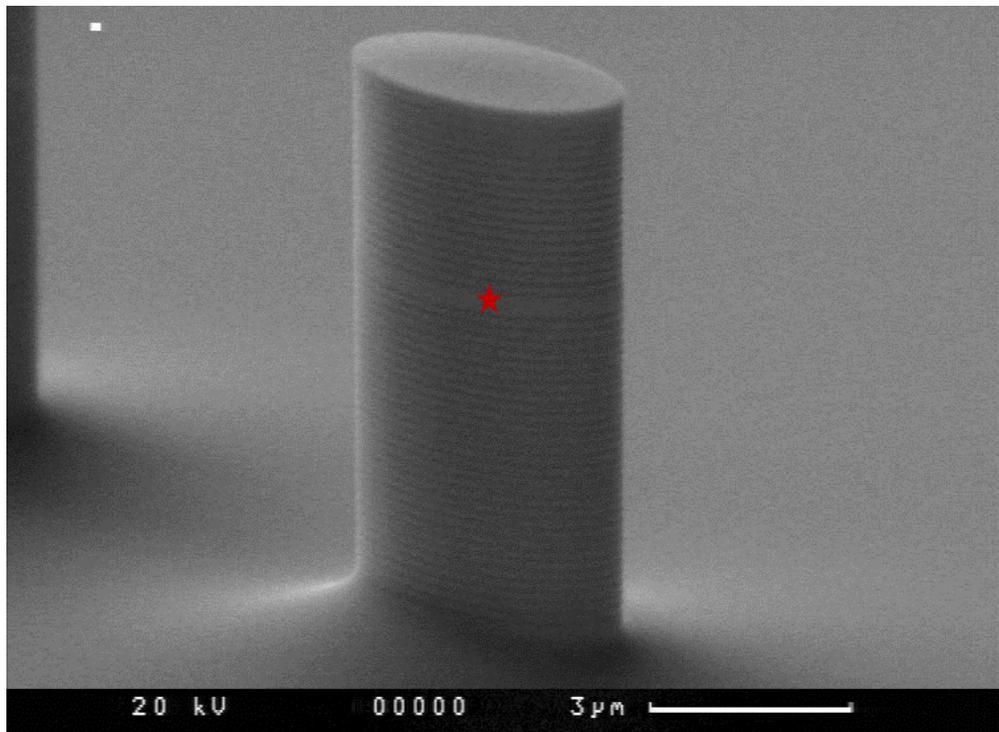


[V.V. Preobrazhenskii et al., Journal of Crystal Growth 201/202, 166 (1999)]

**ИОФ на основе КТ InAs/(In)GaAs
($\lambda \sim 920$ нм).**

Достигнутые результаты.

- Режим кулоновской блокады: X^+ трион
- Асимметричный микрорезонатор
- Когерентное возбуждение π -импульсом



Rakhlin et al, J. of Lumin. 253, 119496 (2023)

Dryazgov et al. Optica Quantum 1, 14, (2023)

Galimov et al, Nanomaterials 13, 1572, (2023)

Skryabin et al. Optica Quantum 3, 162 (2025)

Serov et al. Phys. Rev. Appl. 23, 044019 (2025)



Comparison of single-photon sources based on QDs

Reference	end-user efficiency	$g^{(2)}(0)$	HOM visibility
Ding <i>et al.</i> , <i>Nature Photonics</i> 19, 387 (2025)	0.712	0.0205	0.9856
Tomm <i>et al.</i> , <i>Nature Nanotechnol.</i> 16, 399 (2021)	0.57	0.021	0.975
Wang <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. Lett.</i> 125, 153601 (2020)	0.263	0.025	0.935
Wang <i>et al.</i> , <i>Nature Photonics</i> 13, 770 (2019)	0.237	0.025	0.975
Ding <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. Lett.</i> 116, 020401 (2016)	0.138	0.009	0.985
Thomas <i>et al.</i> , <i>Phys. Rev. Lett.</i> 126, 233601 (2021)	0.107	0.046	0.909
Liu <i>et al.</i> , <i>Nature Nanotechnol.</i> 14, 586 (2019)	0.082	0.001	0.901
Gazzano <i>et al.</i> , <i>Nature Comm.</i> 4, 1425 (2013)	0.078	0.15	0.53
Somaschi <i>et al.</i> , <i>Nature Photonics</i> 10, 340 (2016)	0.012	0.0028	0.9956
Ioffe Institute	0.34	0.031	0.93-0.95

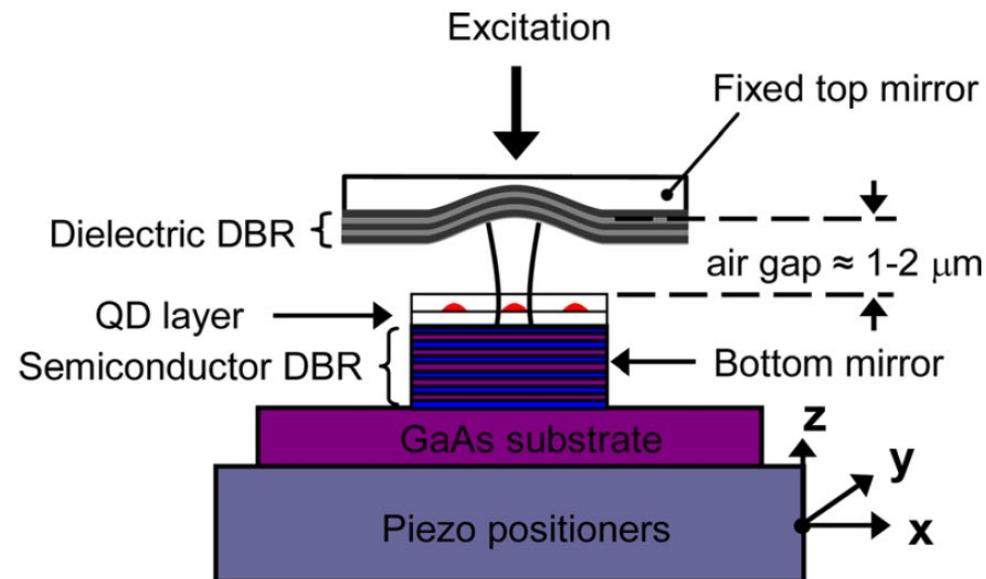
X. Ding et al., Nature Photonics 19, 387 (2025)

A bright and fast source of coherent single photons

N. Tomm et al., Nature Nanotechnology 16, 399 (2021)

- ✓ Асимметричный дихроичный микрорезонатор в режиме Парселла
- ✓ Пьезо-настраиваемое фокусирующее внешнее верхнее зеркало микрорезонатора:
 - настройка моды резонатора под выбранную оптимальную КТ
 - малые потери в резонаторе

End-to-end яркость $V=57\%$
Неразличимость $V=97.5\%$



R.J. Barbour et al. J. Appl. Phys. 110, 053107 (2011)
D. Najer et al. Nature 575, 622 (2019)

X. Ding et al., Nature Photonics 19, 387 (2025)

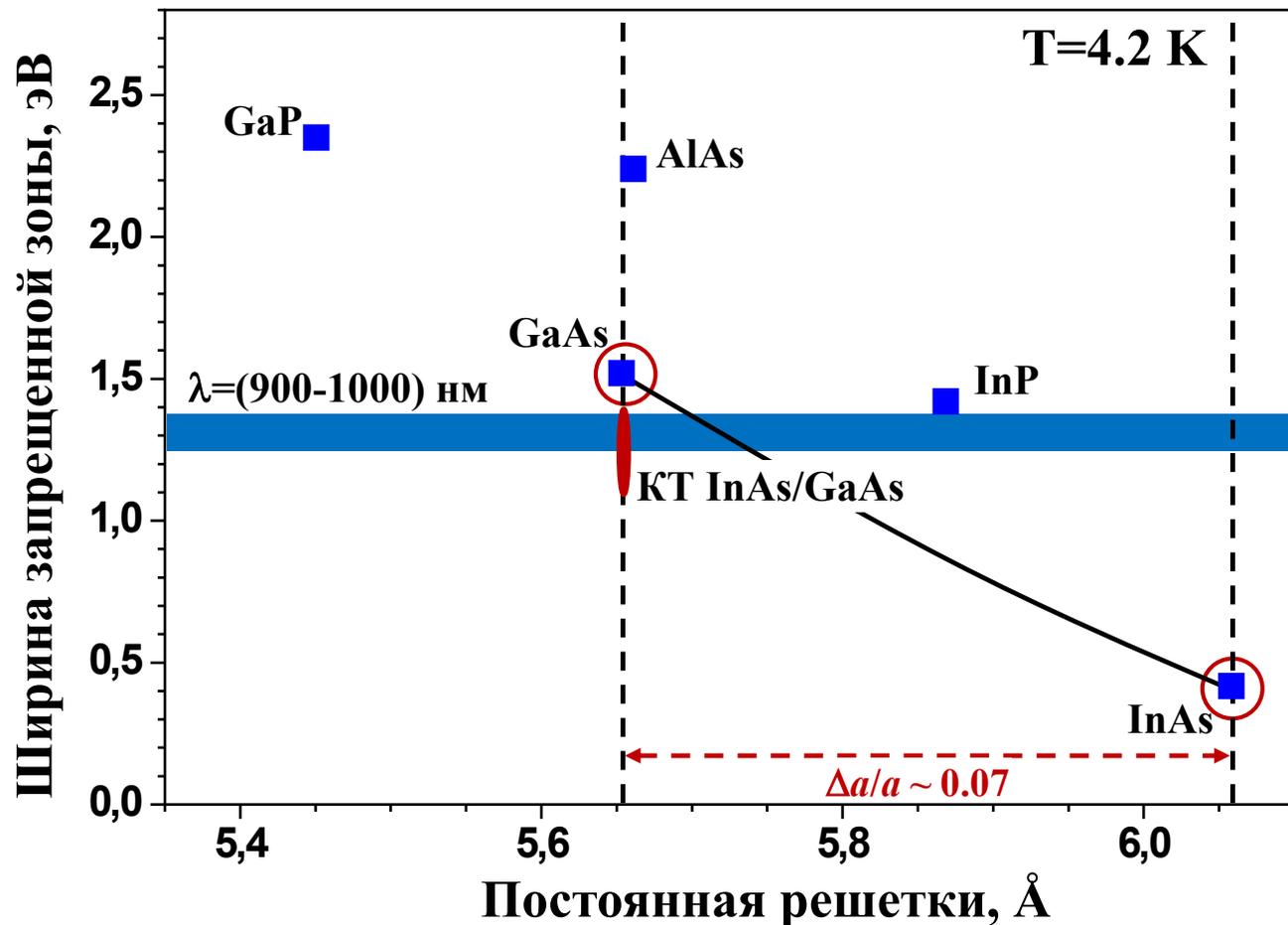
$V=71.2\%$

Вибрационно нестабильная конструкция!

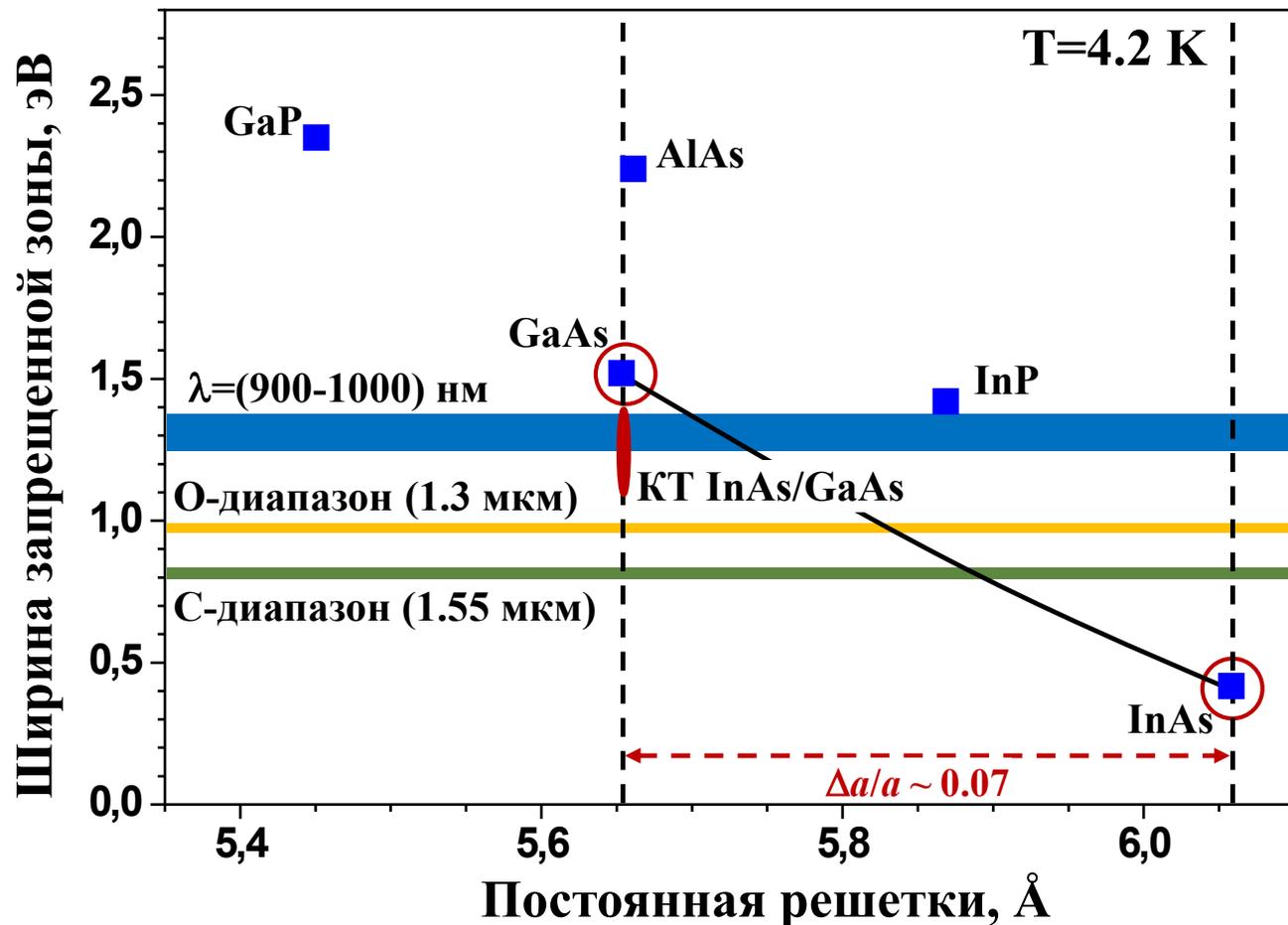
Выше критического значения яркости для систем квантовых вычислений и коммуникаций

Источник одиночных фотонов на $\lambda \sim 1550$ нм для телекоммуникационного С-диапазона.

Цель: Реализация ИОФ, излучающих в телекоммуникационном С-диапазоне длин волн ($\lambda = 1530\text{-}1565\text{ нм}$), т.е., в пределах спектрального диапазона современных систем волоконно-оптической связи, для осуществления возможности передачи квантовой информации на большие расстояния



Цель: Реализация ИОФ, излучающих в телекоммуникационном С-диапазоне длин волн ($\lambda = 1530\text{-}1565\text{ нм}$), т.е., в пределах спектрального диапазона современных систем волоконно-оптической связи, для осуществления возможности передачи квантовой информации на большие расстояния



Большая длина волны излучения КТ

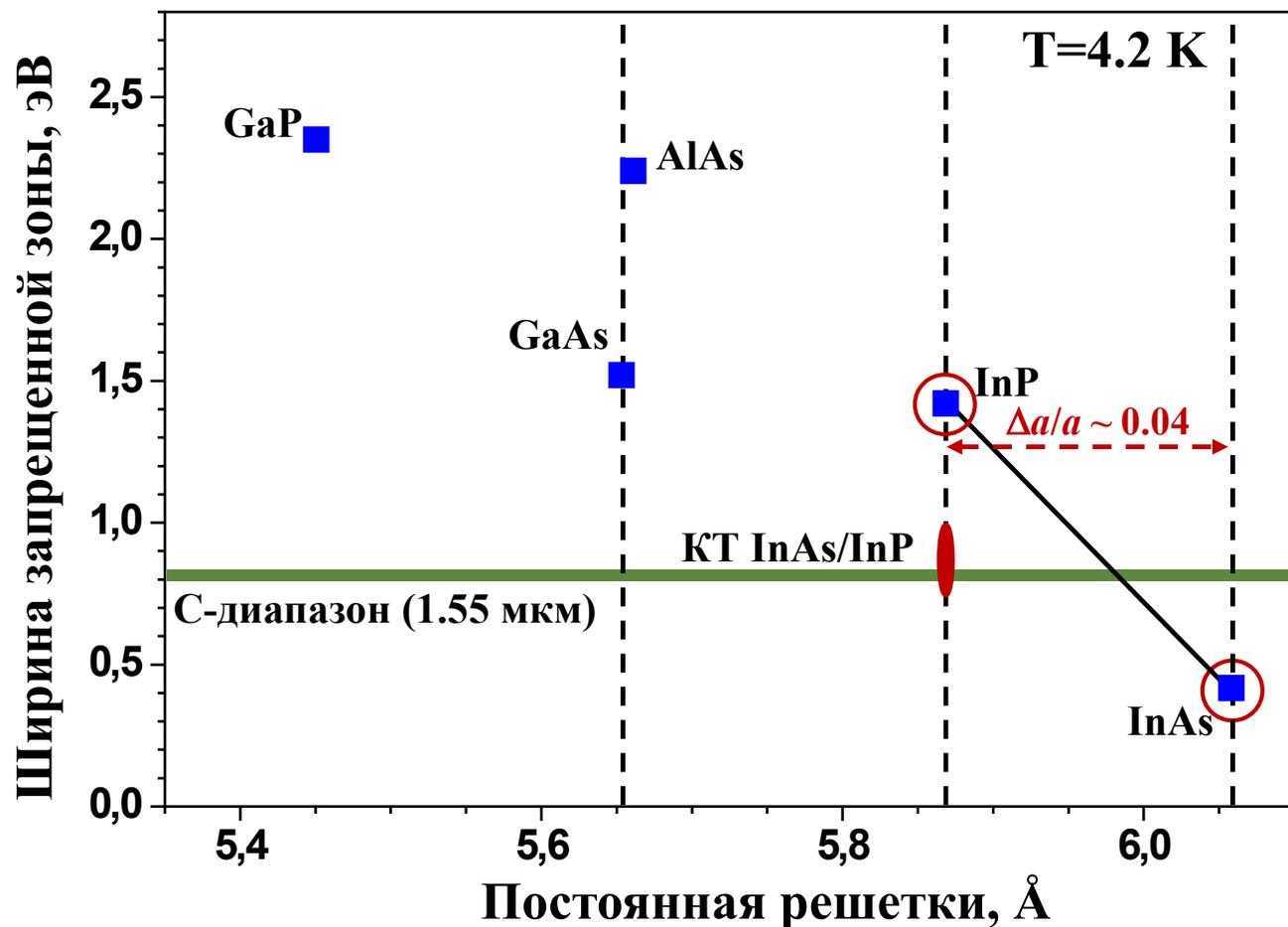


Большой размер КТ



Меньшее рассогласование параметров решетки при самоорганизации КТ

Цель: Реализация ИОФ, излучающих в телекоммуникационном С-диапазоне длин волн ($\lambda = 1530\text{-}1565\text{ нм}$), т.е., в пределах спектрального диапазона современных систем волоконно-оптической связи, для осуществления возможности передачи квантовой информации на большие расстояния



✓ Подложка InP
КТ InAs/InP

Большая длина волны излучения КТ

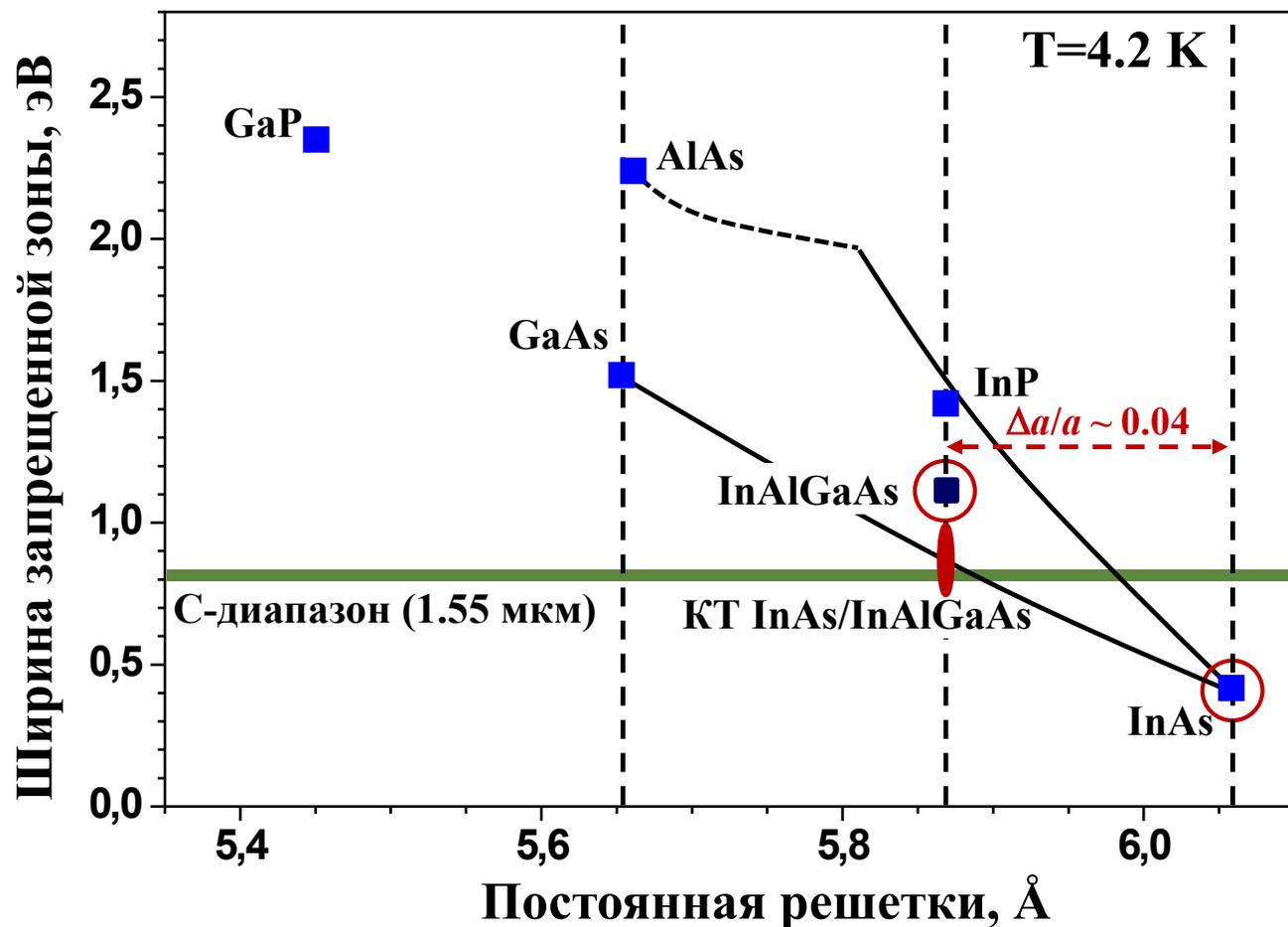


Большой размер КТ



Меньшее рассогласование параметров решетки при самоорганизации КТ

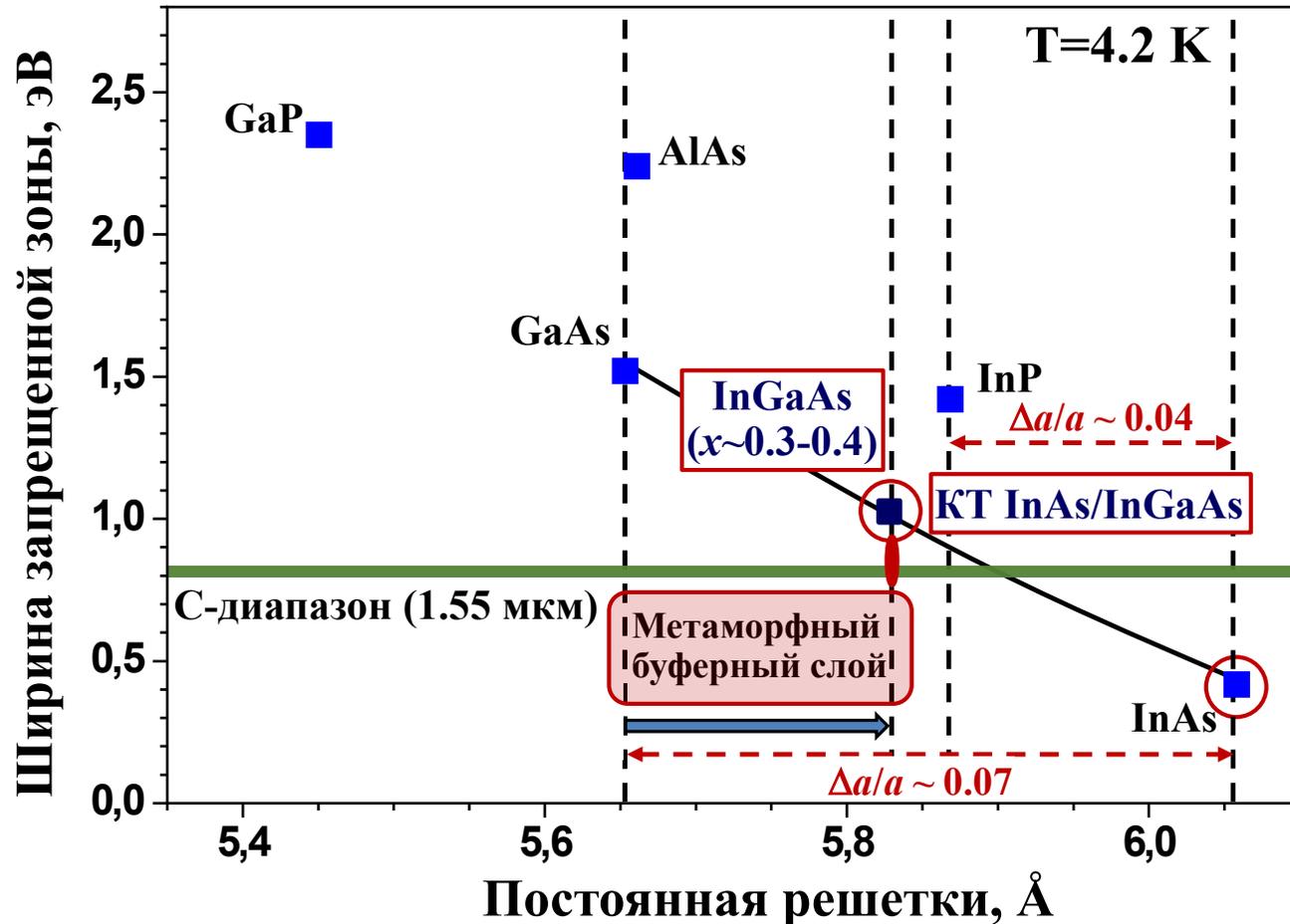
Цель: Реализация ИОФ, излучающих в телекоммуникационном С-диапазоне длин волн ($\lambda = 1530\text{-}1565\text{ нм}$), т.е., в пределах спектрального диапазона современных систем волоконно-оптической связи, для осуществления возможности передачи квантовой информации на большие расстояния



✓ Подложка InP
 КТ InAs/InP или КТ InAs/In(Al)GaAs

- ✓ Слои структуры (кроме слоя КТ) согласованы по периоду решетки с подложкой
- ✓ Отсутствие высокой плотности пронизывающих дислокаций
- ✓ Проблемы выращивания P-содержащих соединений методом МПЭ (КТ InAs/InP)
- ✓ Выраженная тенденция к формированию квантовых штрихов (Quantum Dashes), а не КТ → необходимость применения при МПЭ клапанного источника As в режиме разложения молекул (As_2) (КТ InAlGaAs/InAs)
- ✓ Низкий оптический контраст слоёв РБО InP/InAlGaAs

Цель: Реализация ИОФ, излучающих в телекоммуникационном С-диапазоне длин волн ($\lambda = 1530\text{-}1565\text{ нм}$), т.е., в пределах спектрального диапазона современных систем волоконно-оптической связи, для осуществления возможности передачи квантовой информации на большие расстояния

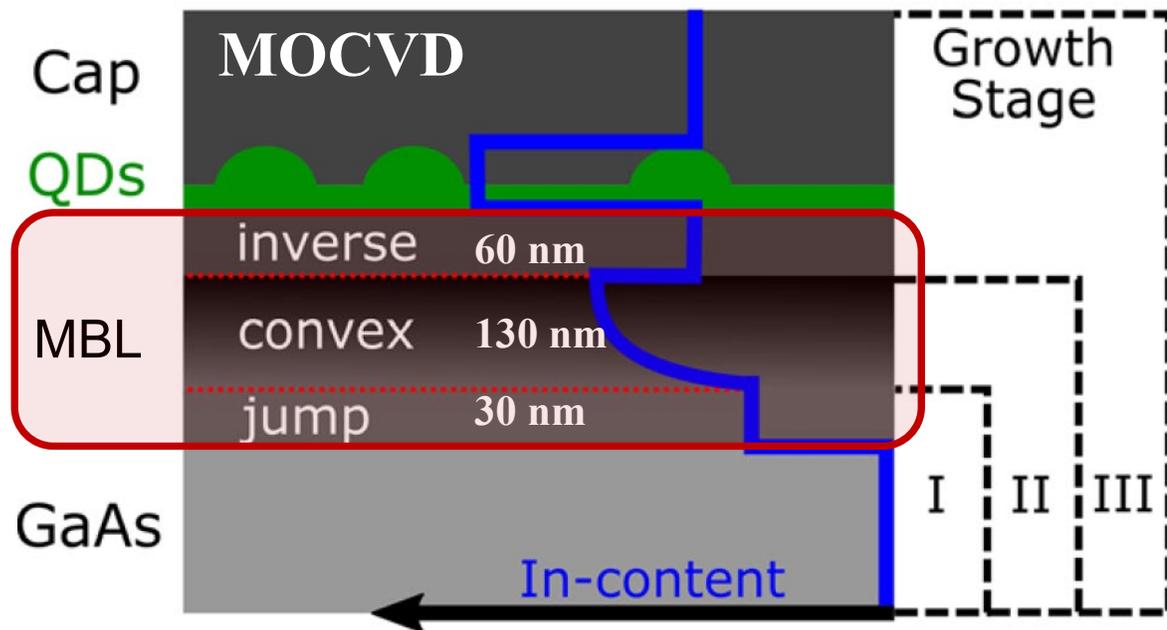


- ✓ Дополнительный элемент – метаморфный буферный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$
- ✓ Сложность реализации резонаторной полости толщиной 1λ – необходима малая толщина МБС
- ✓ Большая плотность пронизывающих дислокаций
- ✓ Рост на относительно недорогих подложках GaAs(001)
- ✓ Возможность использовать в конструкции гетероструктур эффективные зеркала на основе РБО $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$, а также включать в конструкцию стоп-слои / «жертвенные» слои на основе твердых растворов AlGaAs

Метаморфные структуры

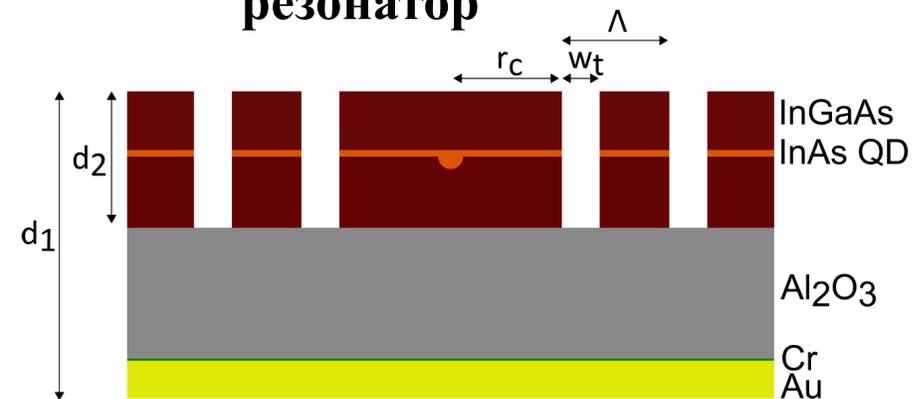
Рост на подложках GaAs с использованием МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

Формирование КТ InAs в матрице InGaAs



[R. Sittig et al., Thin-film InGaAs metamorphic buffer for telecom C-band InAs quantum dots and optical resonators on GaAs platform, Nanophotonics 11(6), 1109 (2022)]

□ Кольцевой брэгговский резонатор



Конечная эффективность (неполяризованные фотоны): 6.3%
 $g^{(2)}(0)=0.0052$

[C. Nawrath et al, Bright source of purcell-enhanced, triggered, single photons in the telecom C-band, Adv. Quantum Technol. 6(11), 2300111 (2023)]

Метаморфный буфер.

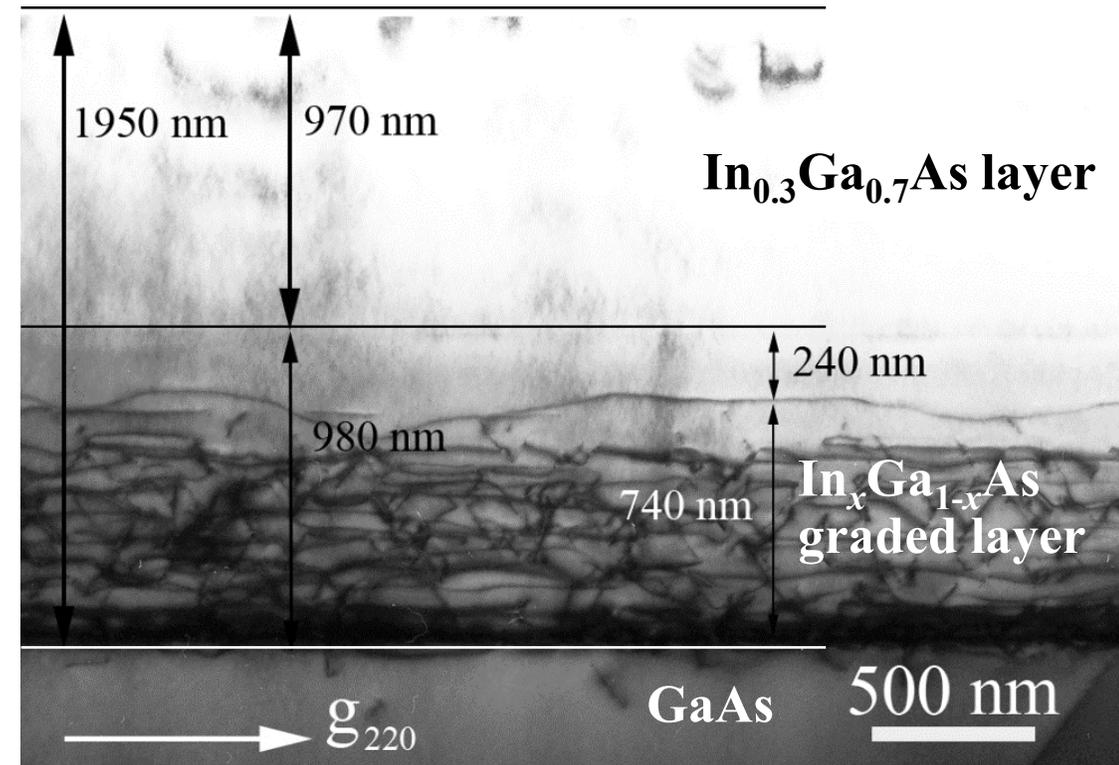
Для чего? Как он работает? Как реализовать?

Метаморфный буферный слой. Его функции и требования к нему. 34

Метаморфный буферный слой (МБС) – это промежуточный слой, который выращивается между подложкой и активной областью структуры.

Метаморфные буферные слои играют роль согласующего буфера между подложкой и функциональным материалом.

Суть метаморфного буфера заключается в резком или плавном переходе от постоянной решётки одного материала (подложки) к постоянной решётки материала, который применяется в активной области (или последующих областях) многослойной структуры.



Метаморфный буферный слой. Его функции и требования к нему. 35

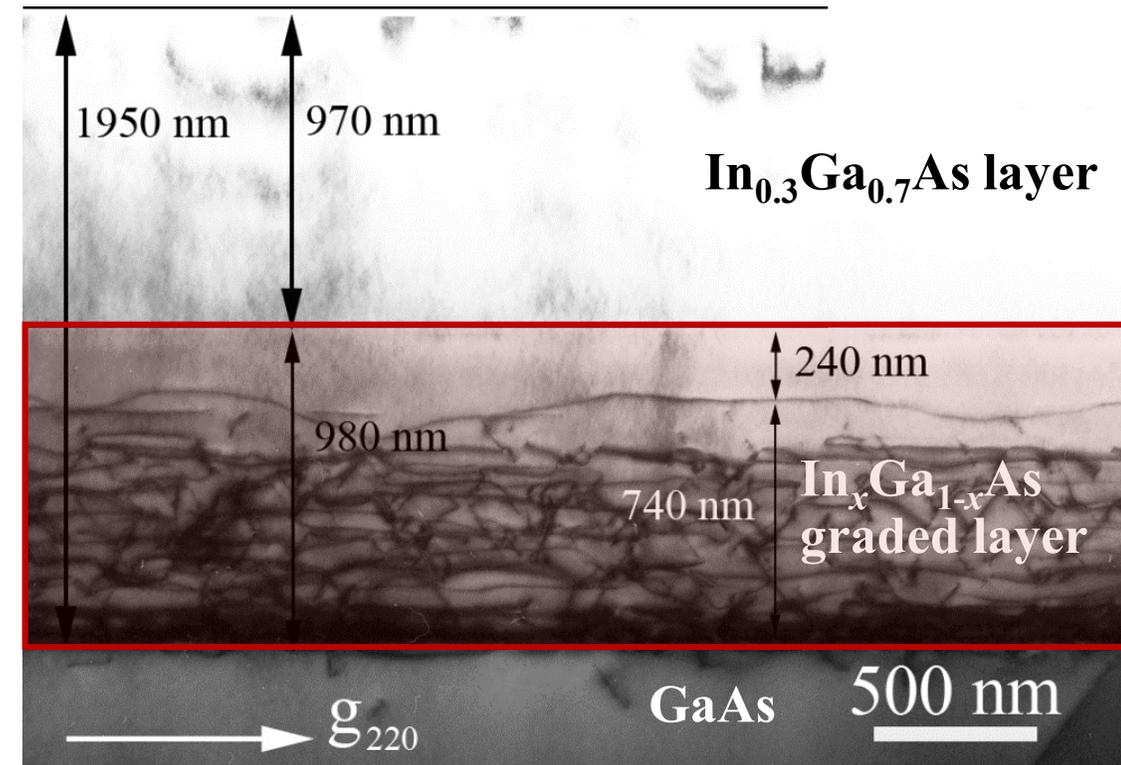
Метаморфный буферный слой (МБС) – это промежуточный слой, который выращивается между подложкой и активной областью структуры.

Метаморфные буферные слои играют роль согласующего буфера между подложкой и функциональным материалом.

Суть метаморфного буфера заключается в резком или плавном переходе от постоянной решётки одного материала (подложки) к постоянной решётки материала, который применяется в активной области (или последующих областях) многослойной структуры.

Требования к метаморфному буферному слою:

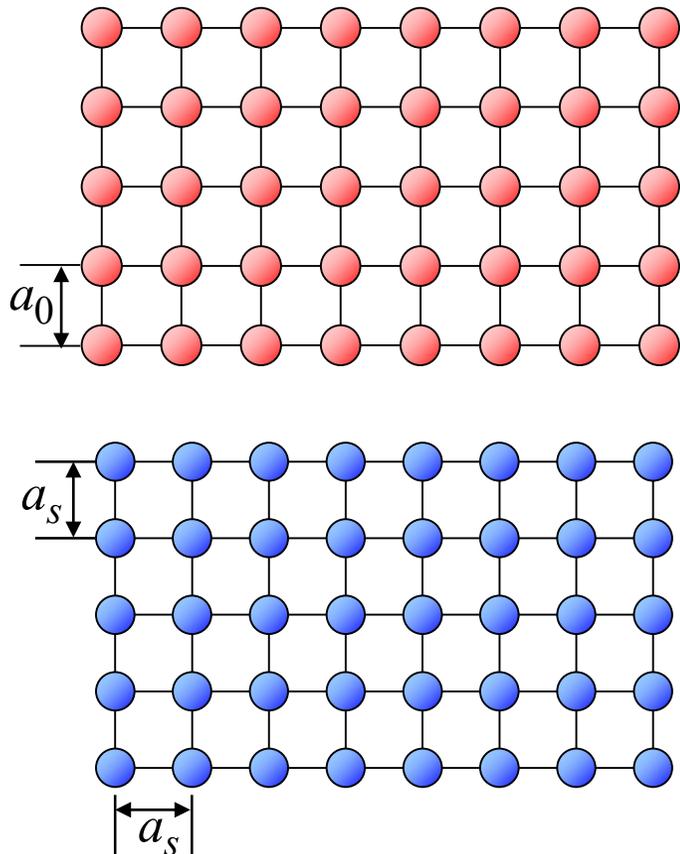
- обеспечение низкой плотности пронизывающих дислокаций (ПД) в вышележащих слоях структуры: чем меньше – тем лучше (в идеале – менее 10^5 см^{-2});
- обеспечение зеркально-гладкой морфологии поверхности;
- относительно малая толщина (не более 2 мкм).



Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

Misfit
(несоответствие
периодов решеток)

$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$

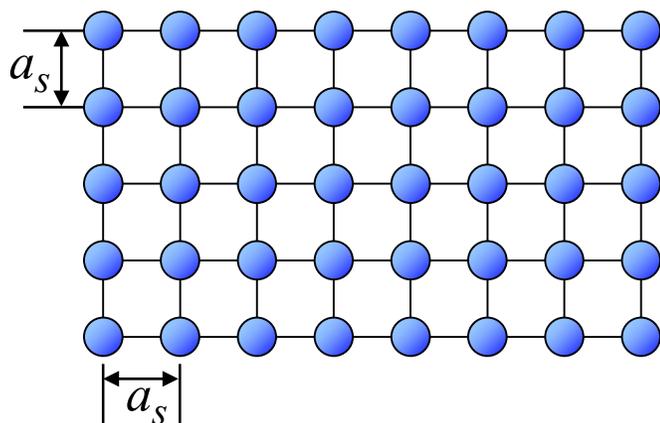
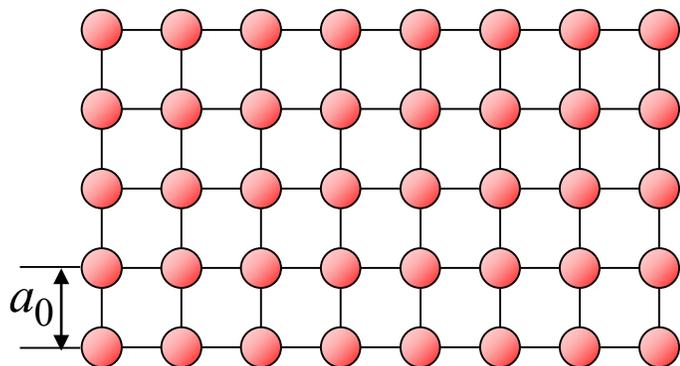


Кристаллические решётки слоёв
соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)

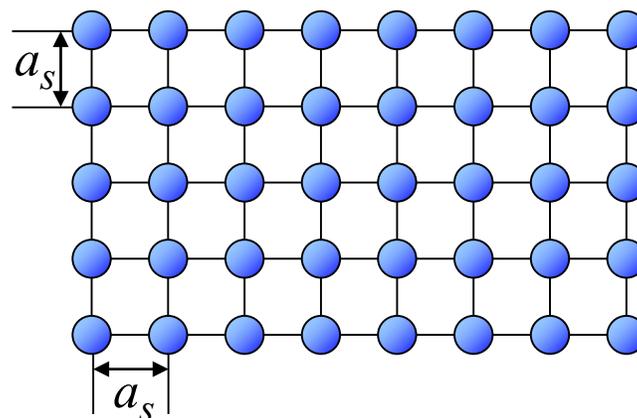
Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

Misfit
(несоответствие периодов решеток)

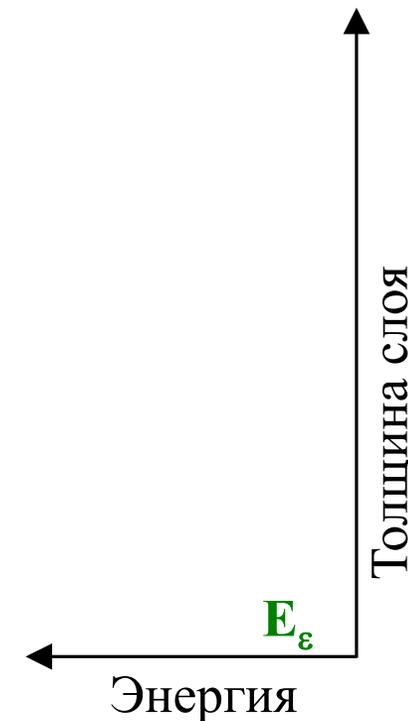
$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$



Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)



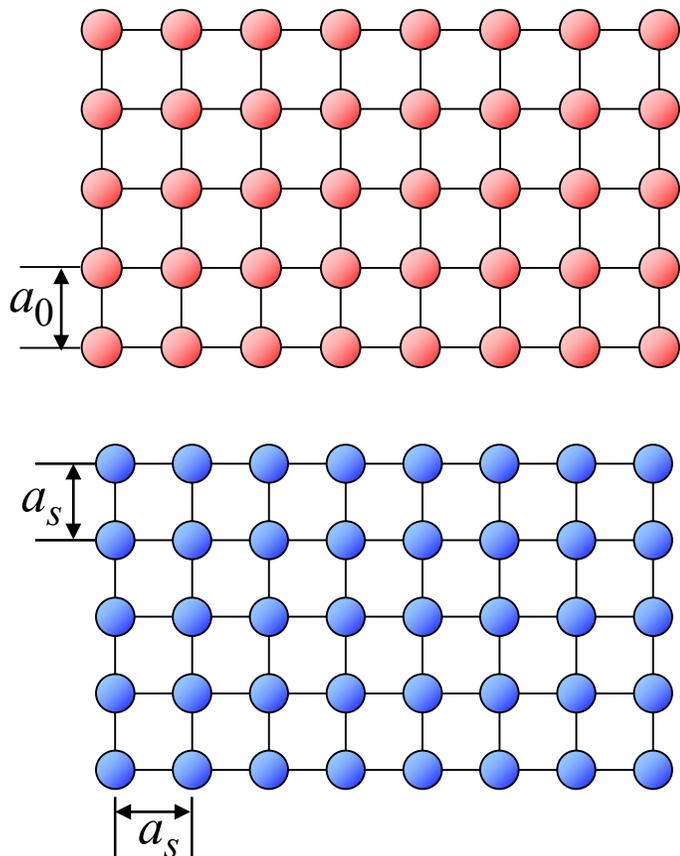
Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.



Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

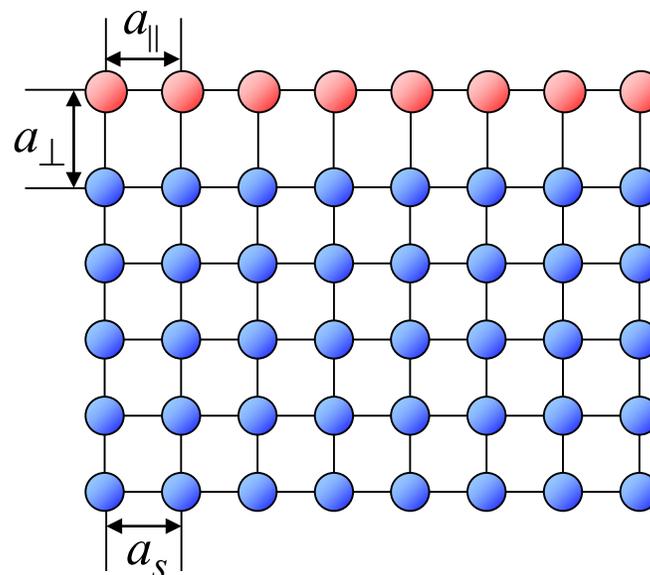
Misfit
(несоответствие периодов решеток)

$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$



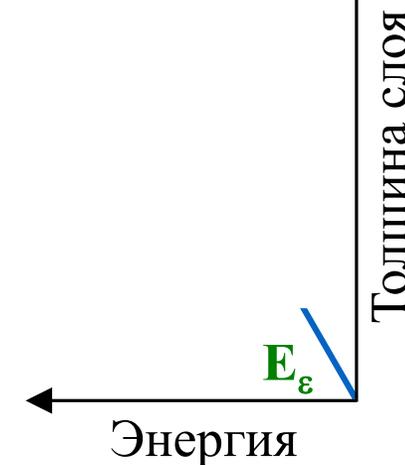
Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)

$h < h_c$
Псевдоморфный рост



Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.

$$f_{\perp} = \frac{a_{\perp} - a_s}{a_0} \neq f_0$$



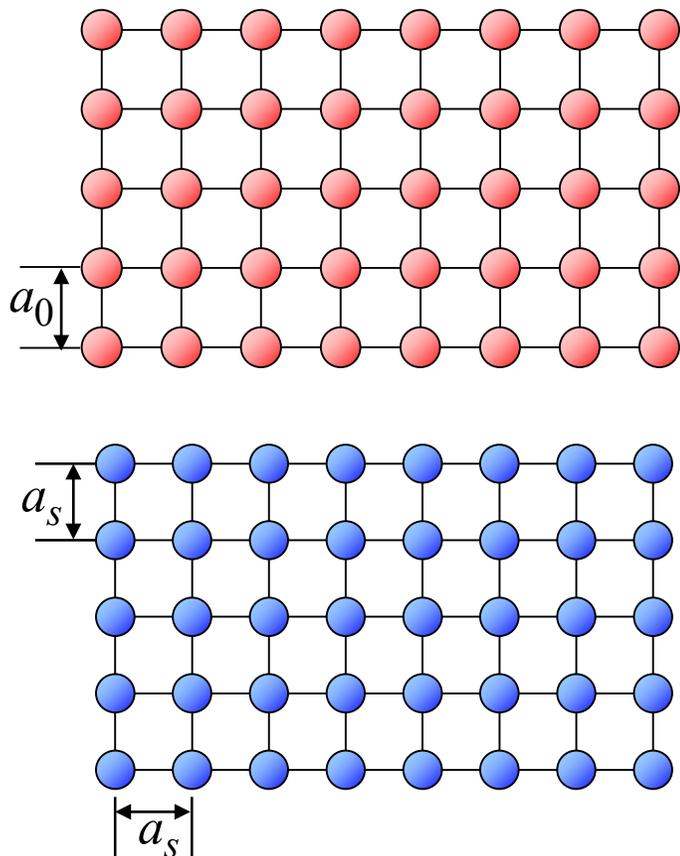
$$a_{\parallel} = a_s$$

$$a_{\perp} = \frac{2c_{12}}{c_{11}}(a_0 - a_s) + a_0$$

Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

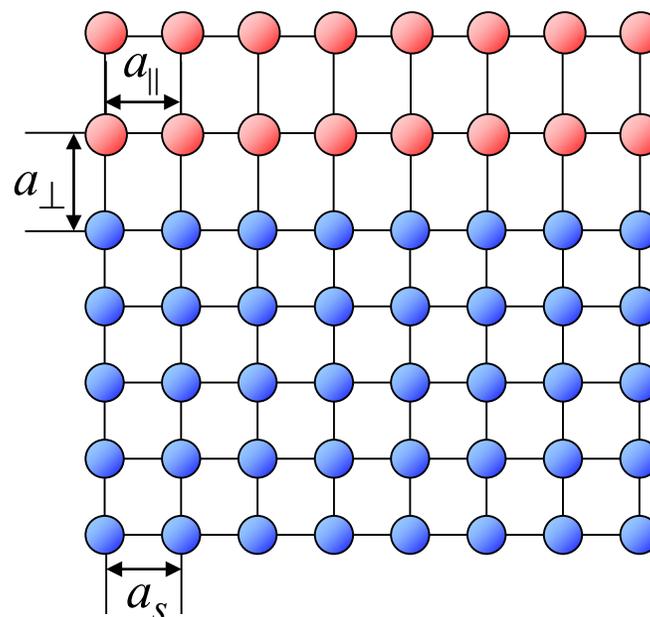
Misfit
(несоответствие периодов решеток)

$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$



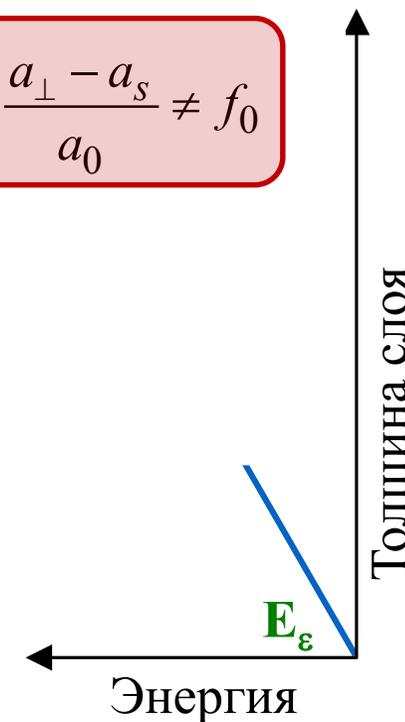
Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)

$h < h_c$
Псевдоморфный рост



Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.

$$f_{\perp} = \frac{a_{\perp} - a_s}{a_0} \neq f_0$$



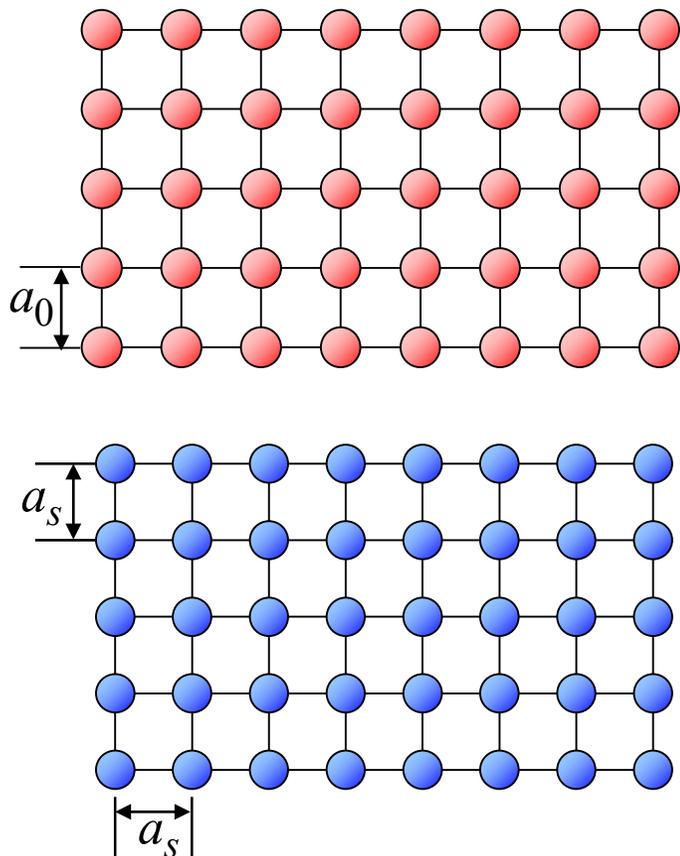
$$a_{\parallel} = a_s$$

$$a_{\perp} = \frac{2c_{12}}{c_{11}}(a_0 - a_s) + a_0$$

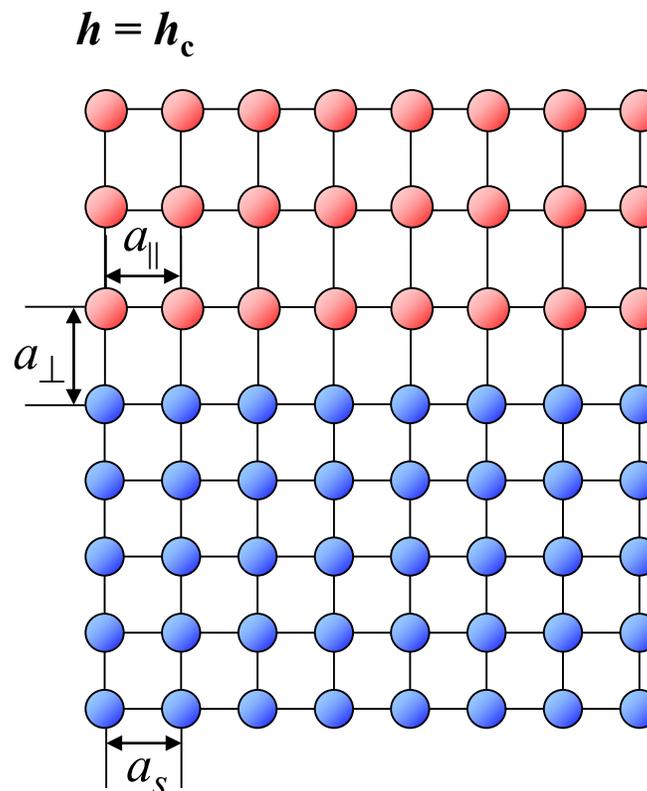
Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

Misfit
(несоответствие периодов решеток)

$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$

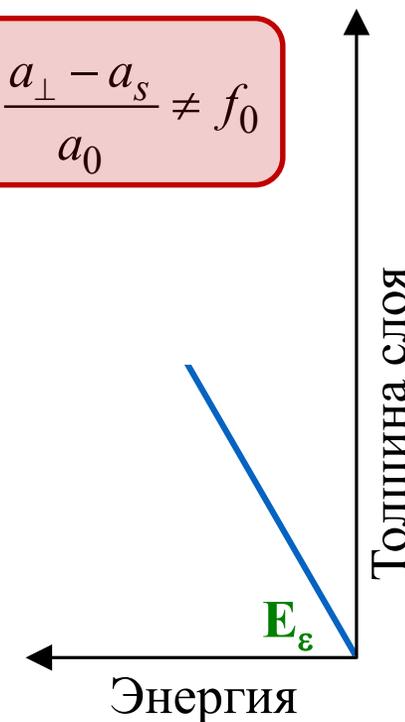


Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)



Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.

$$f_{\perp} = \frac{a_{\perp} - a_s}{a_0} \neq f_0$$



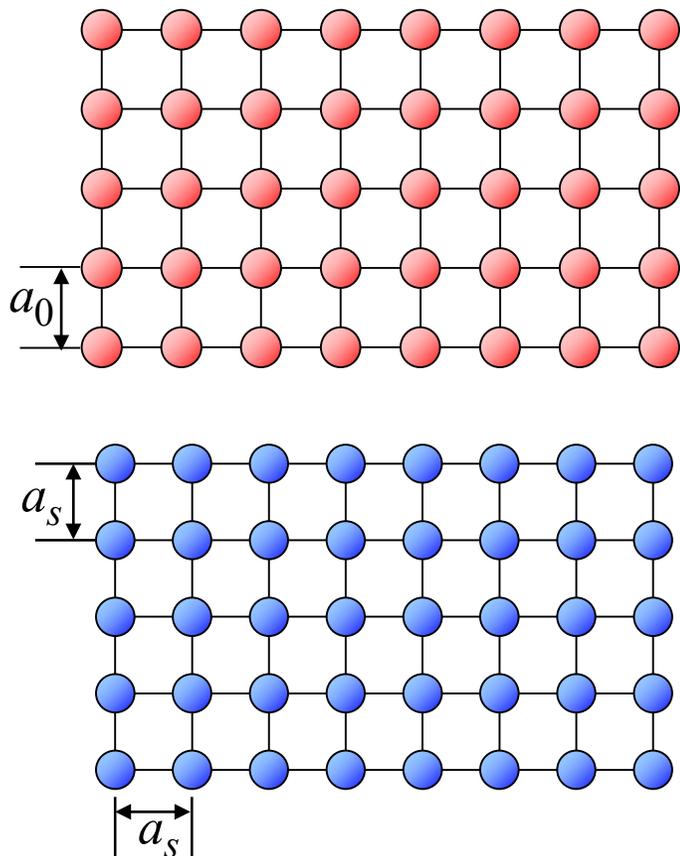
$$a_{\parallel} = a_s$$

$$a_{\perp} = \frac{2c_{12}}{c_{11}}(a_0 - a_s) + a_0$$

Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

Misfit
(несоответствие периодов решеток)

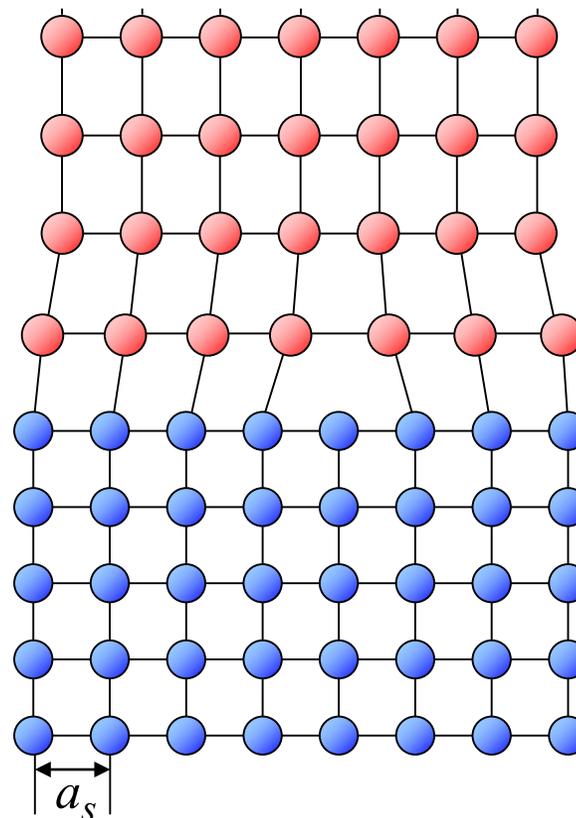
$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$



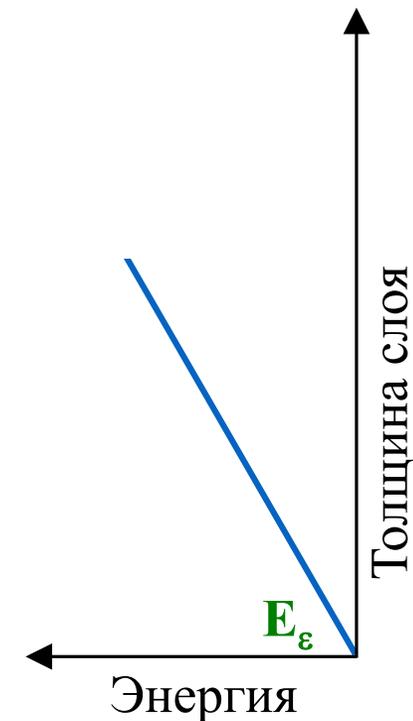
Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)

$$h > h_c$$

Релаксация через дислокации



$$a_{||} \neq a_s$$

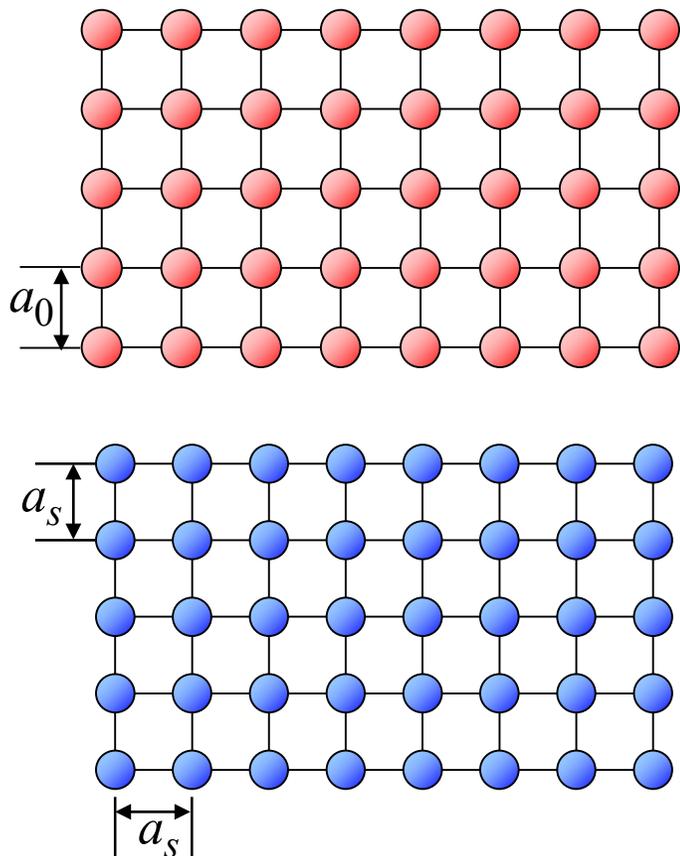


Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.

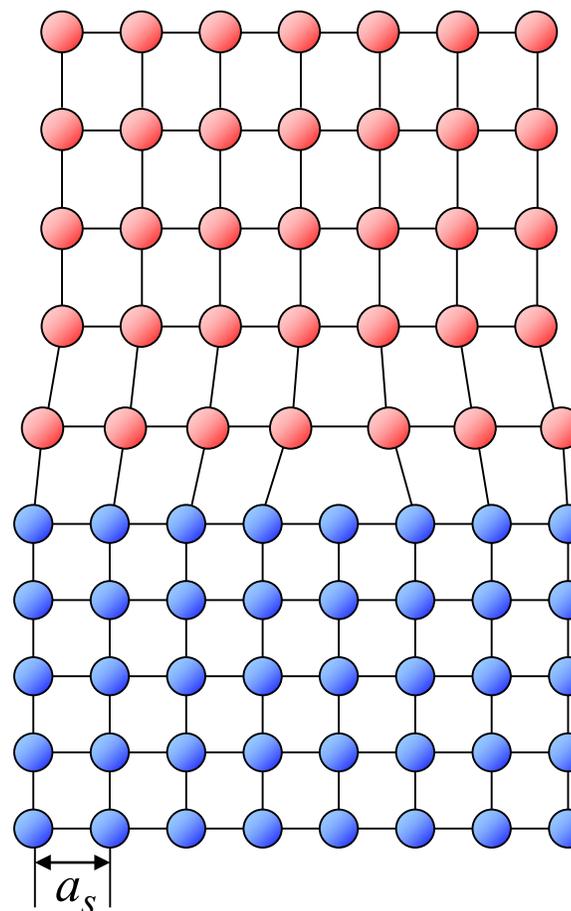
Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

Misfit
(несоответствие периодов решеток)

$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$

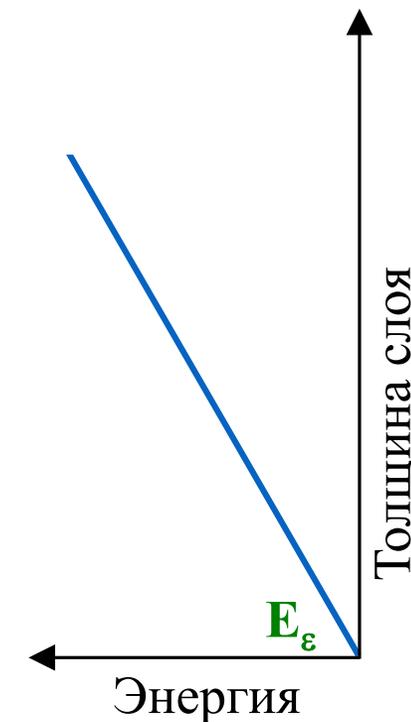


Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)



Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.

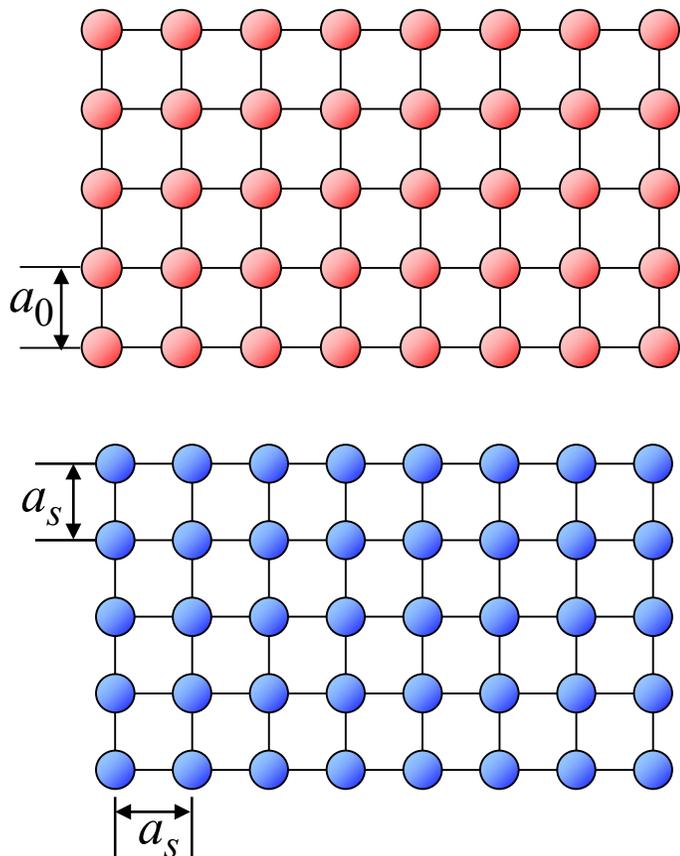
$$a_{||} \neq a_s$$



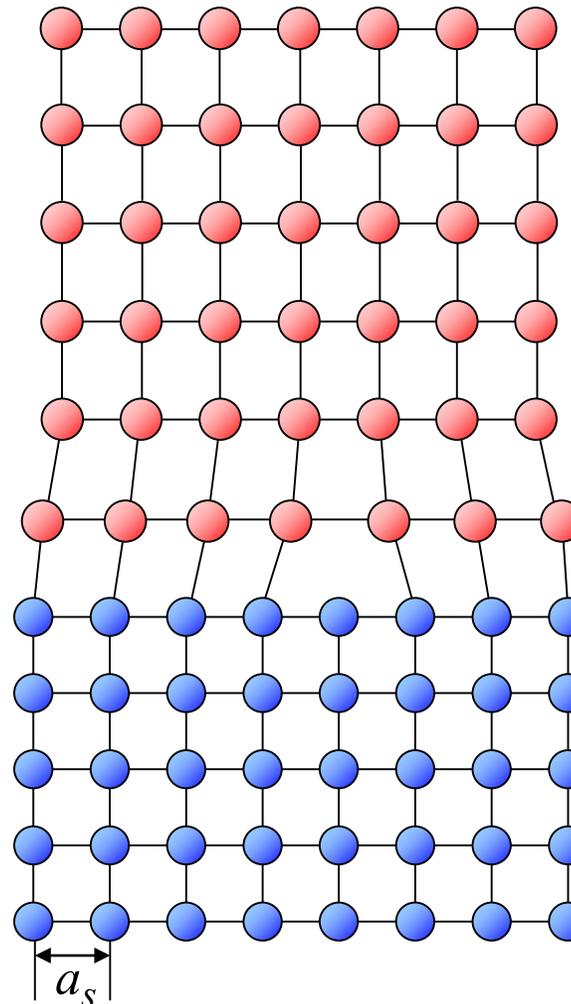
Упругие напряжения и псевдоморфизм в гетероэпитаксиальных структурах.

Misfit
(несоответствие периодов решеток)

$$f_0 = \frac{a_0 - a_s}{a_0}$$

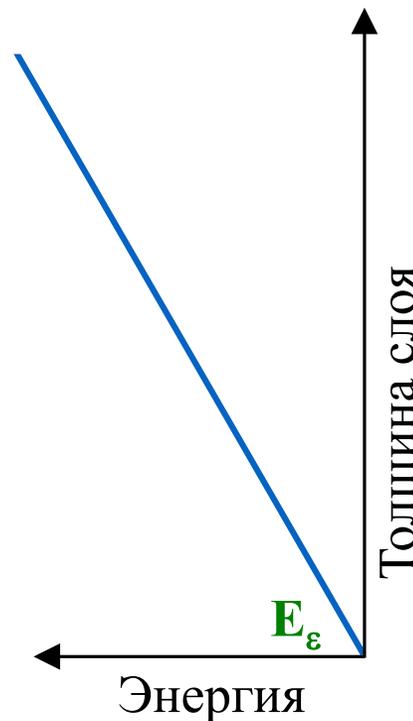


Кристаллические решётки слоёв соединений **A** и **B**, ($a_{(B)} > a_{(A)}$)



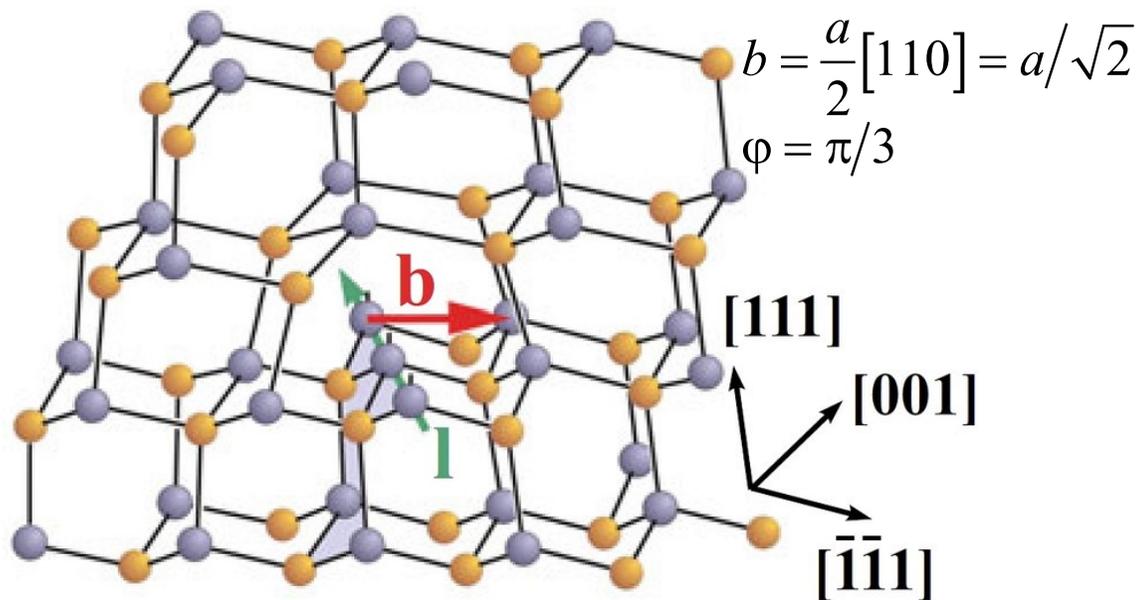
Гетероэпитаксия **B** на подложке **A**: псевдоморфный рост наблюдается при $h < h_c$, образование дислокаций при $h > h_c$.

$$a_{||} \neq a_s$$



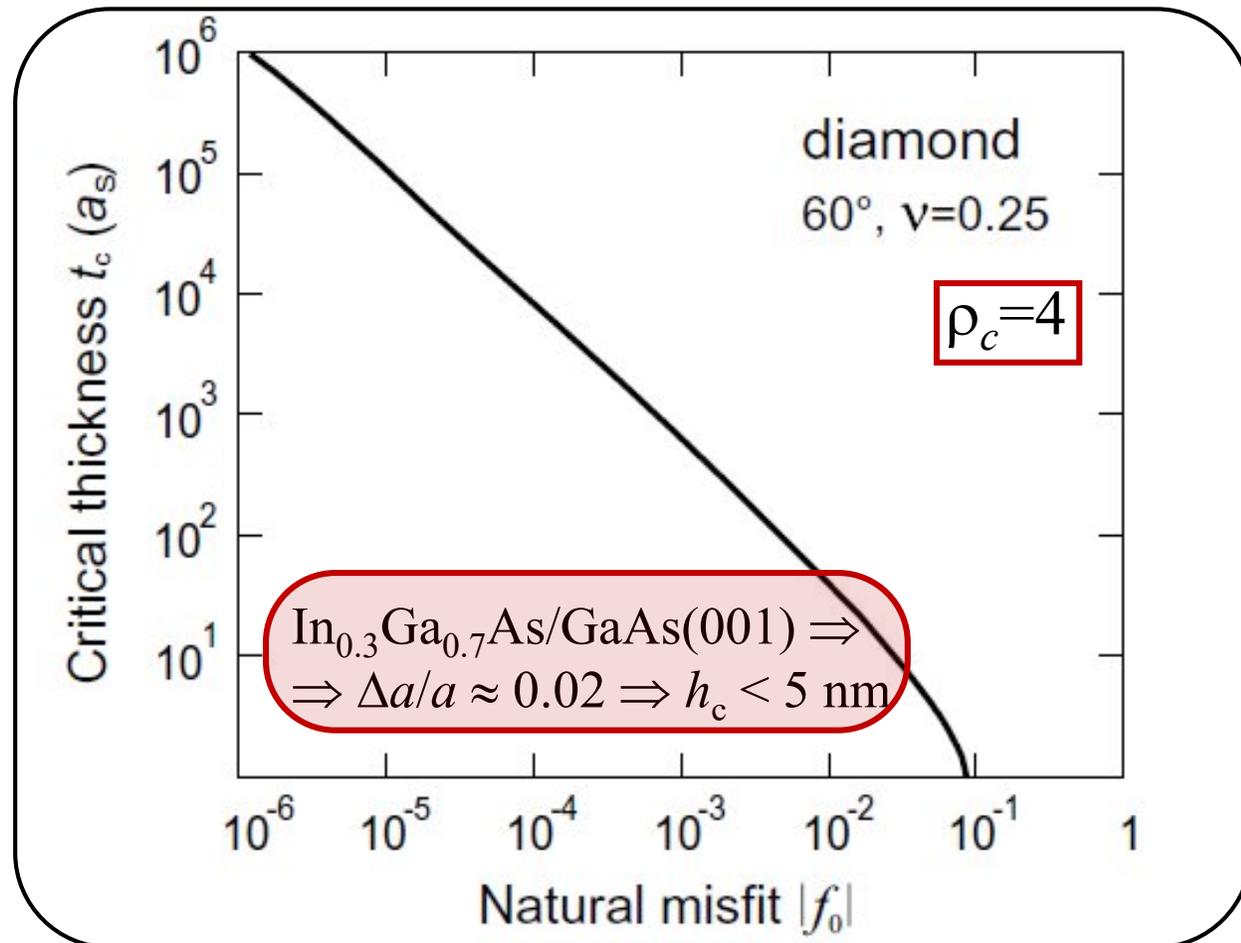
Уравнение Мэттьюза-Блэйкли

$$h_c = \frac{b(1 - \nu \cos^2 \varphi)}{8\pi f_0 (1 + \nu) \sin \alpha \sin \varphi} \left[\ln \left(\frac{\rho_c h_c}{b} \right) \right]$$

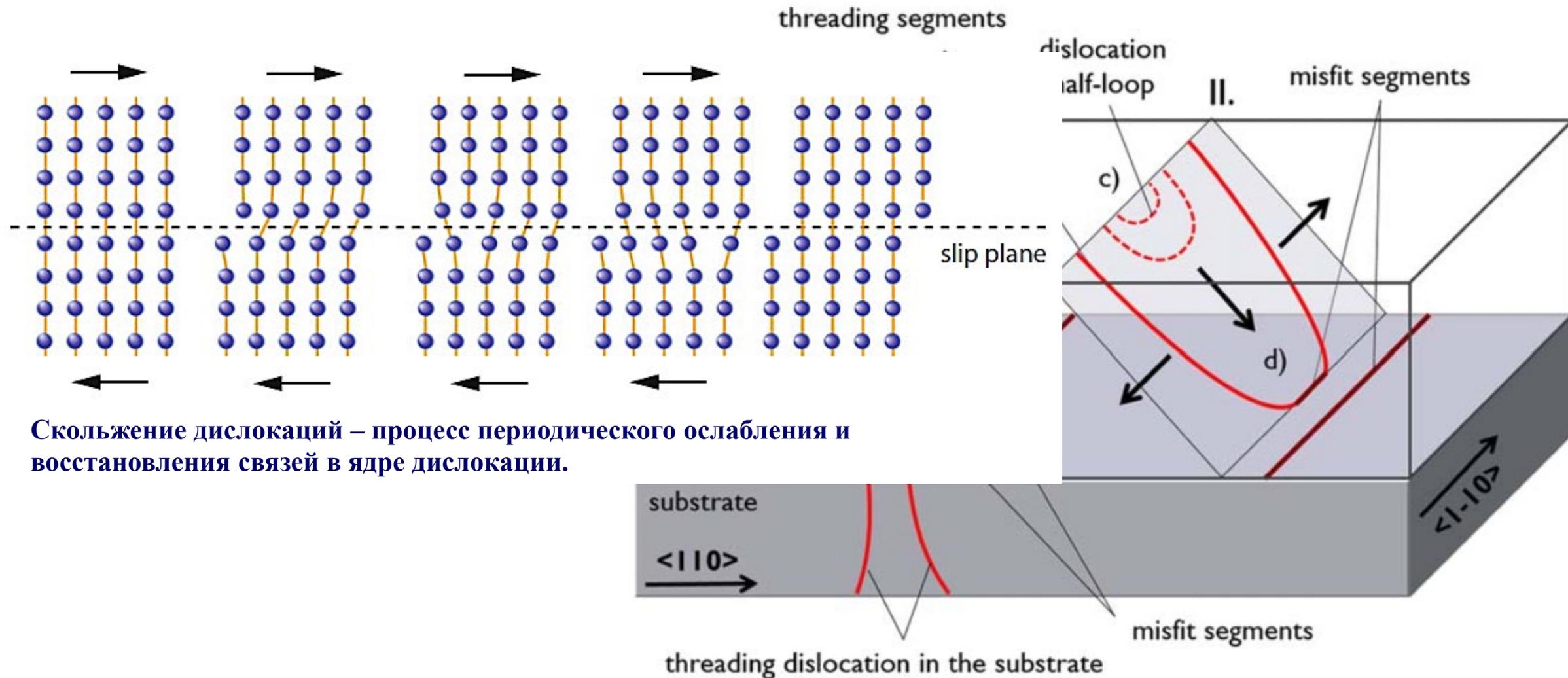


60°– дислокация в структуре цинковой обманки. Направление [001] лежит в плоскости, включающей в себя направления [111] и [-1-1].

Критическая толщина в единицах a_s при образовании 60° ДН вдоль плоскостей скольжения (111) на гетероинтерфейсе (100) ($\nu=0.25$)



[C.A.B. Ball and J.H. van der Merwe, in “Dislocations in Solids”, ed. by F.R.N. Nabarro (North-Holland, Amsterdam, 1983)]



Скольжение дислокаций – процесс периодического ослабления и восстановления связей в ядре дислокации.

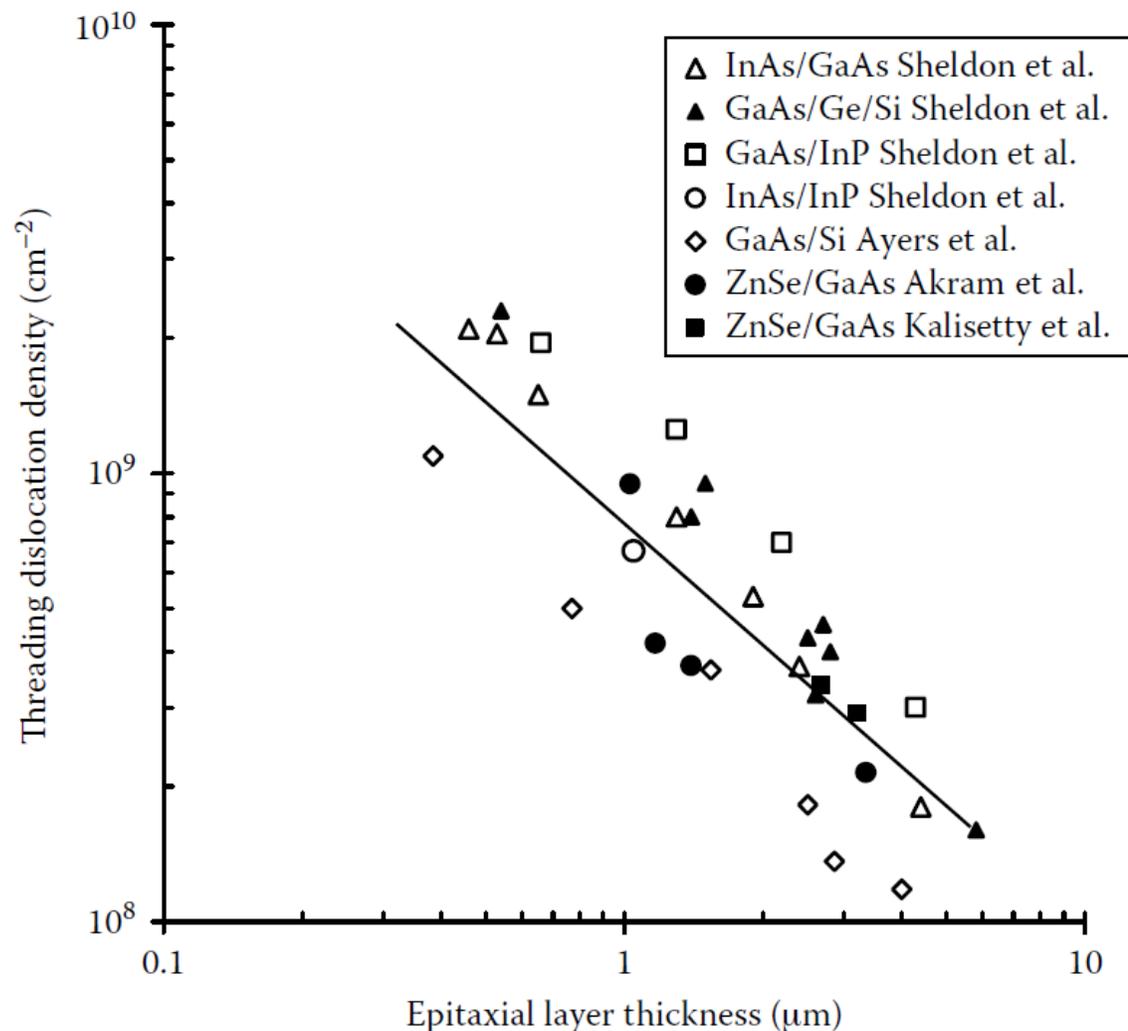
Генерация сетки дислокаций несоответствия на границе между слоем и подложкой за счёт изгиба существующих прорастающих (пронизывающих) дислокаций подложки в плоскости гетерограницы (a, b) и за счёт зарождения дислокационных полупетель (c, d)

✓ Простейший метаморфный буферный слой - это слой необходимого (заданного) состава между эпитаксиальной структурой и подложкой.

Основным недостатком однородного релаксированного буферного слоя является большая толщина, необходимая для получения относительно низкой плотности ПД, требуемой для роста эпитаксиальной структуры приборного качества.

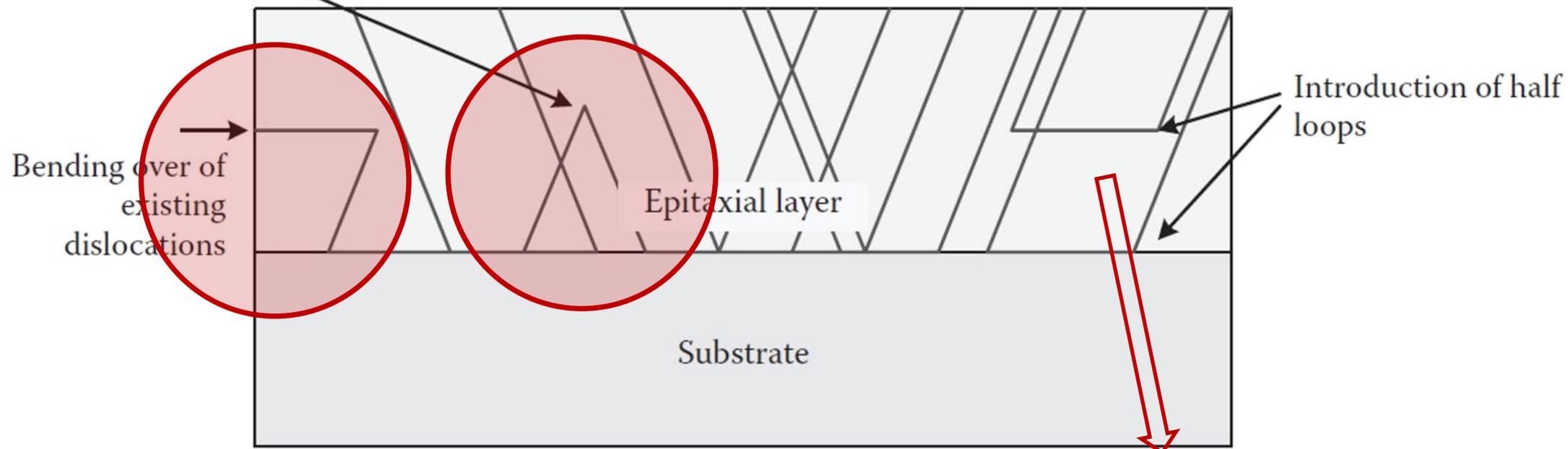
В полупроводниках со структурой цинковой обманки типичная толщина такого буферного слоя составляет несколько мкм.

✓ Плотность ПД в несогласованном по периоду решетки с подложкой слое обычно уменьшается обратно пропорционально его толщине за счёт реакций аннигиляции дислокаций противоположного знака.

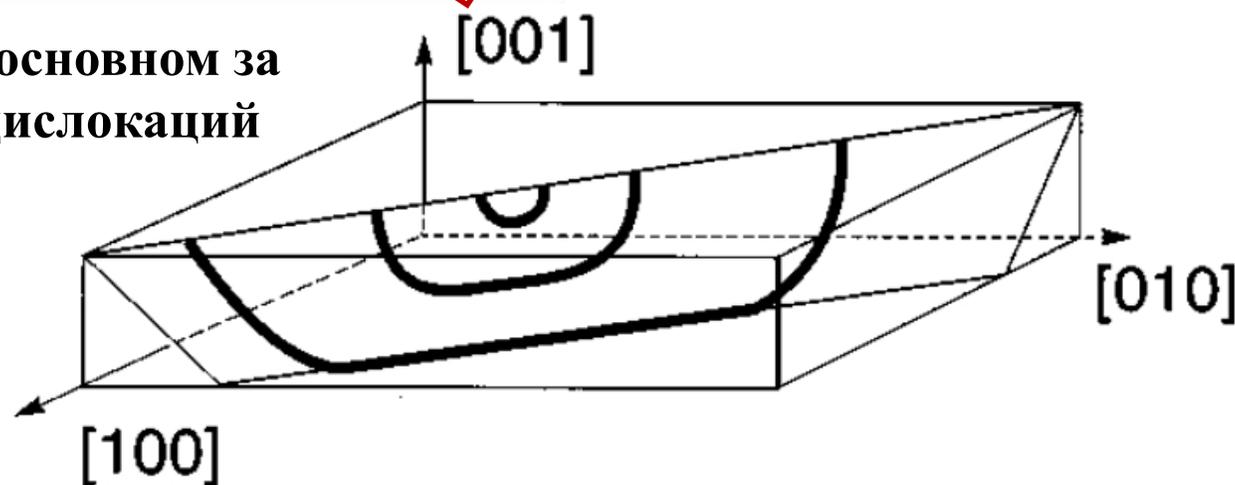


[J.E. Ayers, T. Kujofsa, P. Rango, and J.E. Raphael, Heteroepitaxy of semiconductors: theory, growth, and characterization, 2nd edition, Boca Raton, Taylor & Francis Group, CRC press, 2017]

Coalescence and annihilation



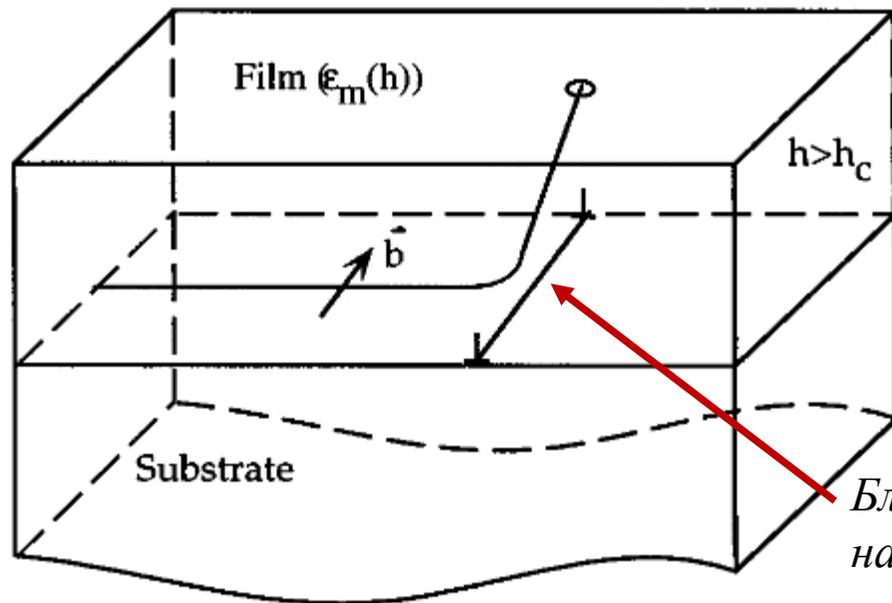
Снижение плотности ПД в МБС происходит в основном за счёт процессов аннигиляции и коалесценции дислокаций



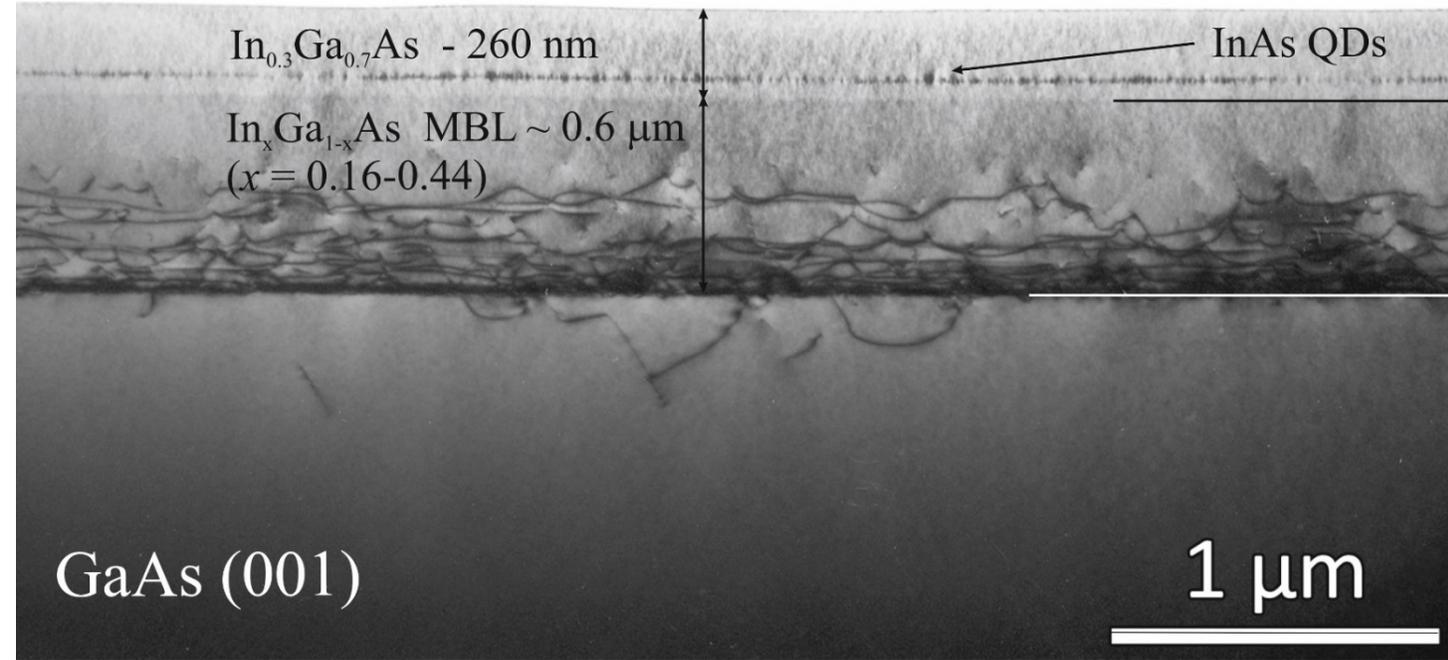
А есть ли отличия в релаксации упругих напряжений и формировании дислокаций в слоях с градиентом состава?

Факторы, ответственные за снижение плотности ПД в градиентных слоях:

1) По мере роста градиентного слоя минимум энергии для образования новых дислокаций смещается в область, в которой ранее не было дислокаций, т.е. добавление новых сегментов ДН происходит выше образовавшихся ранее. Таким образом, **pinning** (закрепление дислокаций), препятствующий движению ПД в слоях с постоянным составом, уменьшается в слоях с градиентом состава.

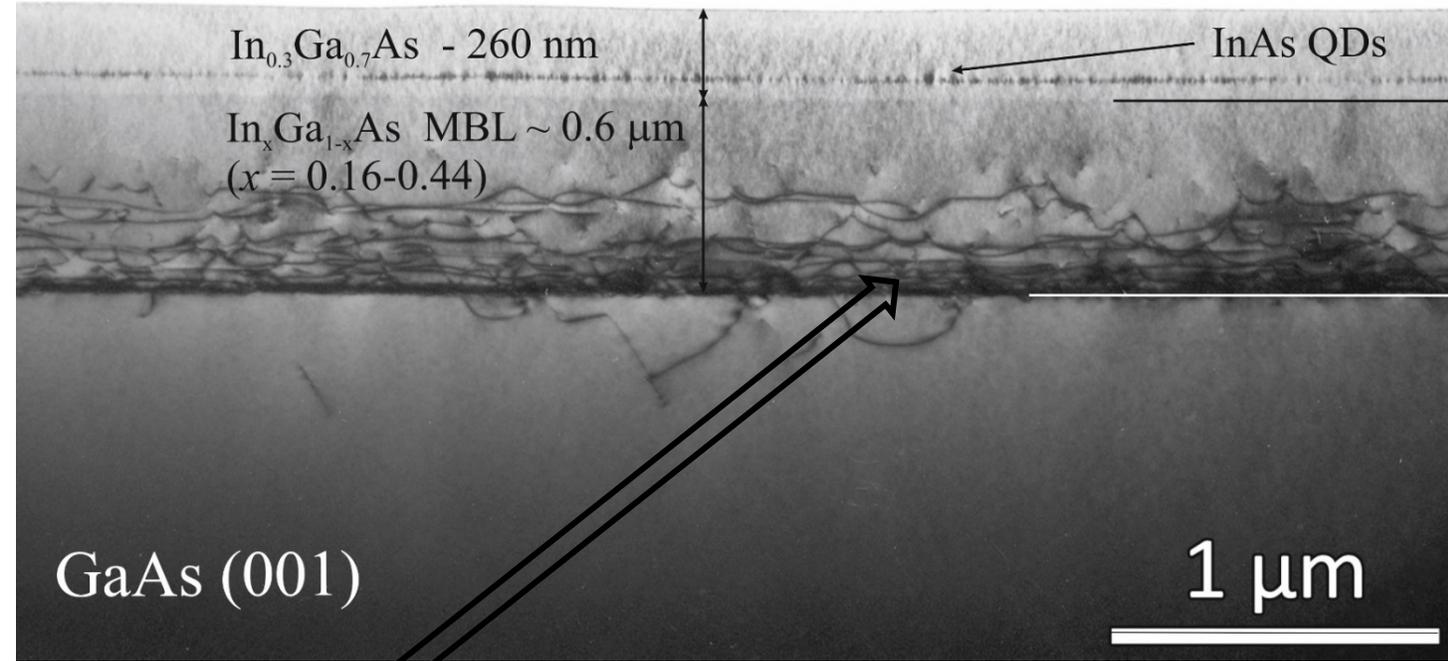


Блокировка движения ПД сегментом ДН, находящимся на траектории скольжения ПД.



2) В слоях с градиентом состава наблюдается гораздо бóльшая остаточная деформация вблизи поверхности роста. В **отсутствии равновесия** это приводит к значительному бóльшим силам, действующим на ПД, по сравнению со слоем с постоянным составом.

3) Для слоев с градиентом состава деформации максимальны вблизи поверхности роста и при равновесии уменьшаются до нуля именно в тех областях, где обычно и должно происходить зарождение новых дислокаций. Таким образом, механизм релаксации упругих напряжений посредством нуклеации новых дислокационных петель подавлен в пользу релаксации напряжений за счет скольжения существующих ПД к границам образца.

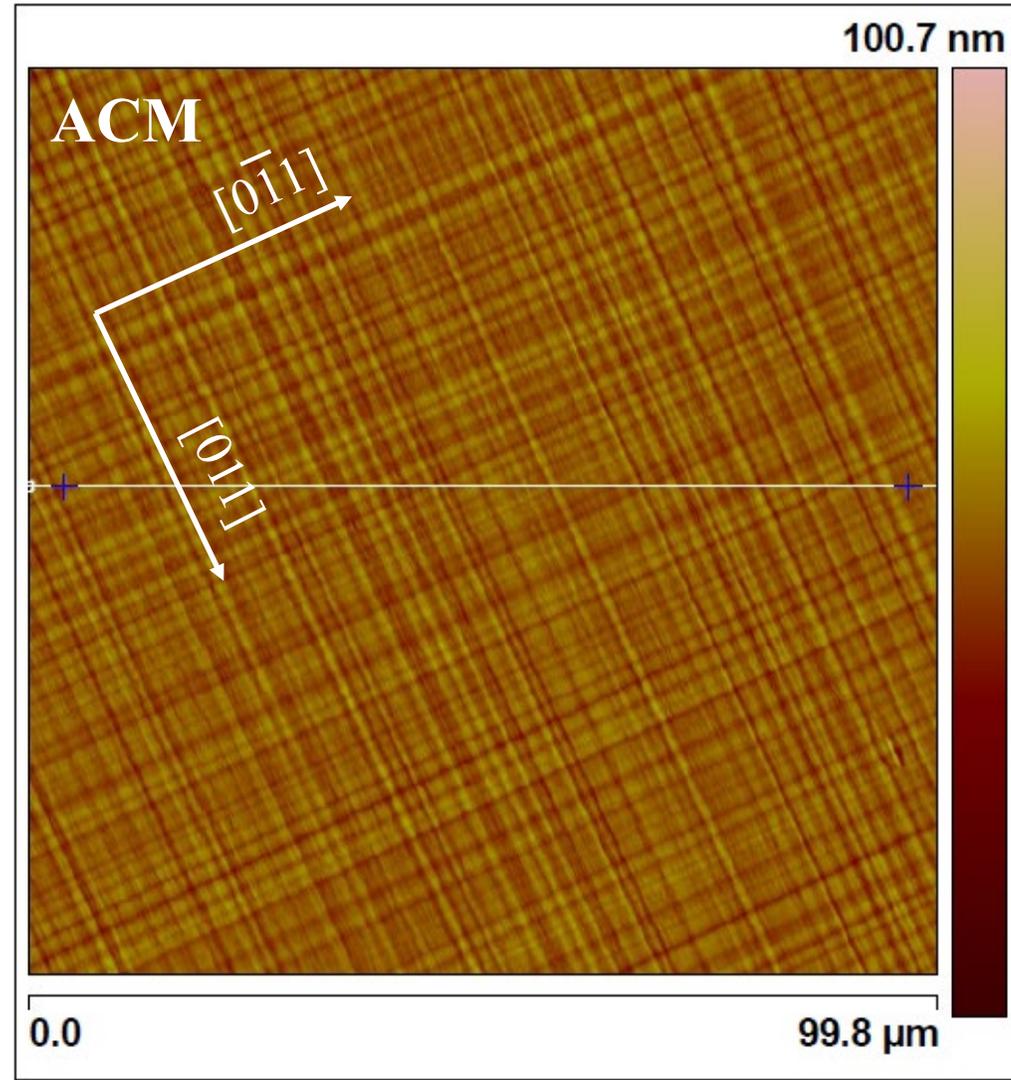
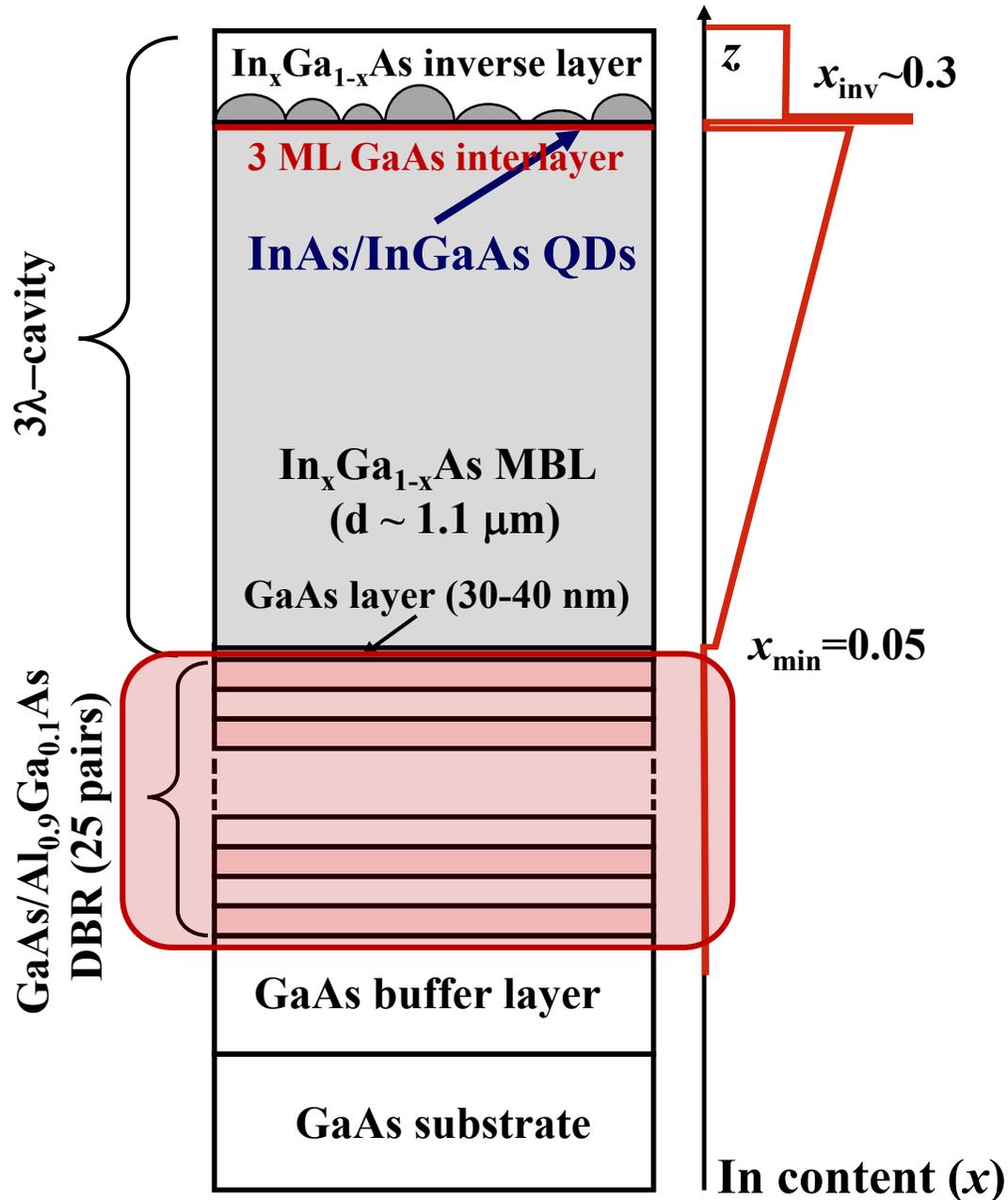


Градиент состава и обусловленный им градиент рассогласования периодов решеток не снижает общего числа ДН, однако способствует их более равномерному распределению в структуре, а также снижению плотности ПД.

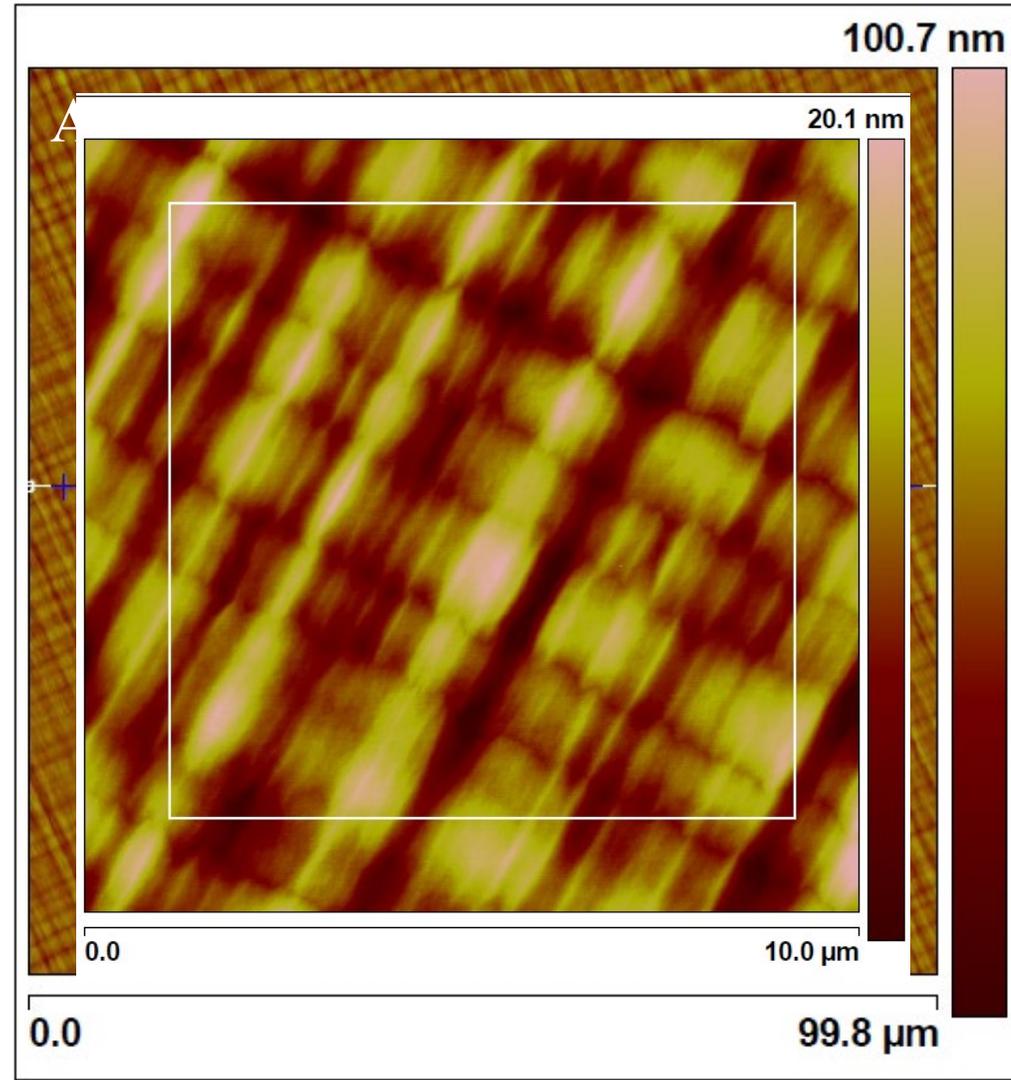
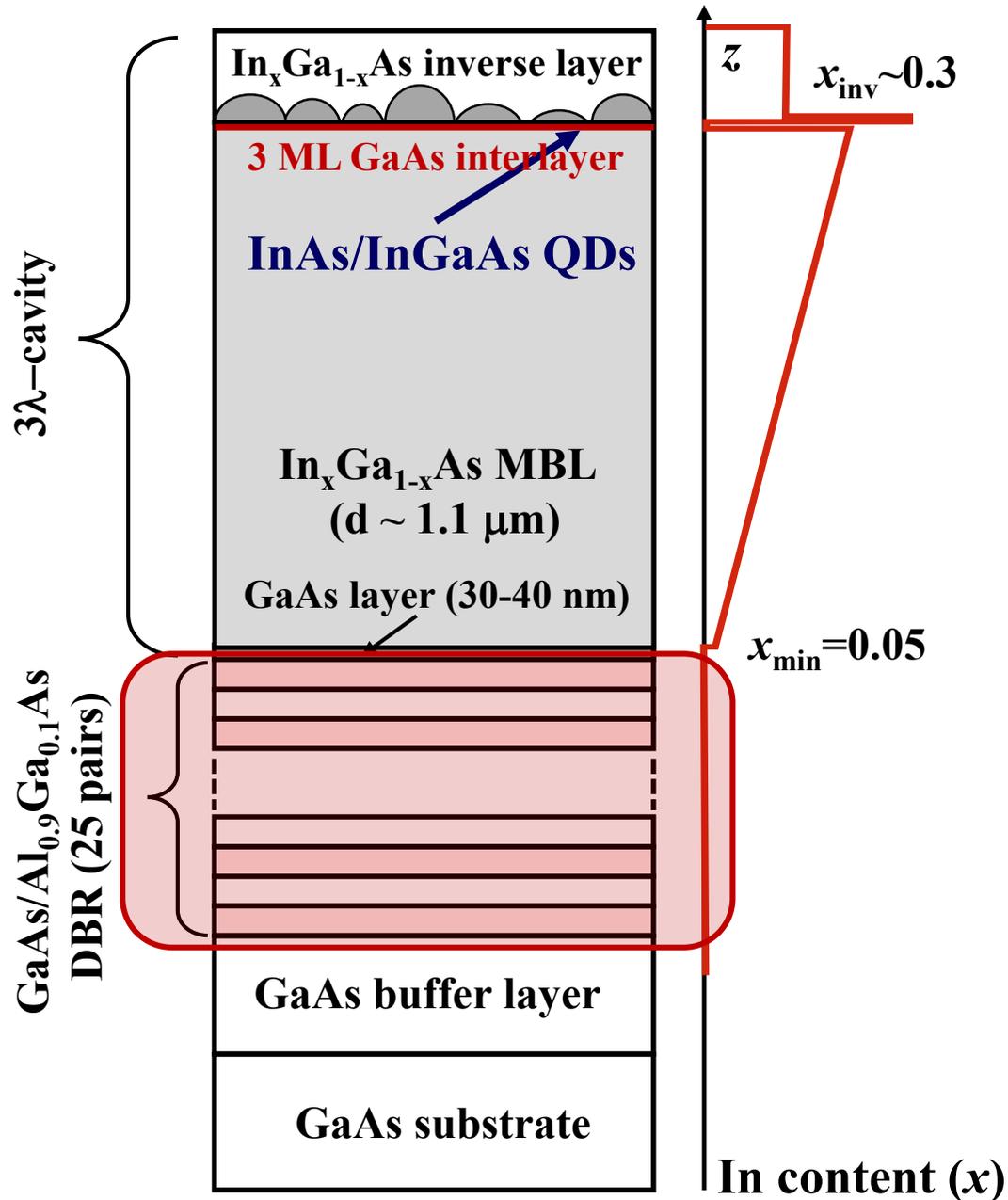
Сетка ДН имеет многоэтажный (многоступенчатый) характер.

Для снижения плотности ПД в МБС важны реакции аннигиляции и слияния (коалесценции) дислокаций.

**Cross-hatch (перекрестно-штриховая)
морфология поверхности.
Причины её возникновения.**

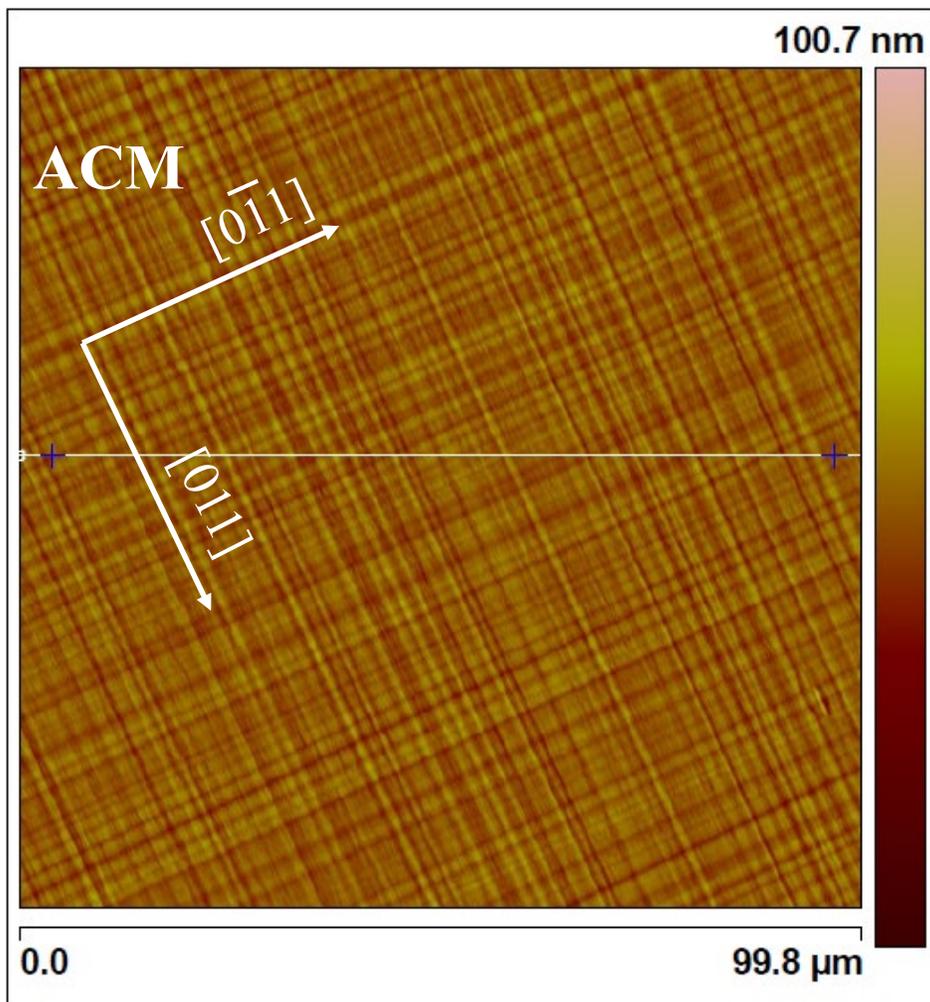


RMS ~ 3 nm



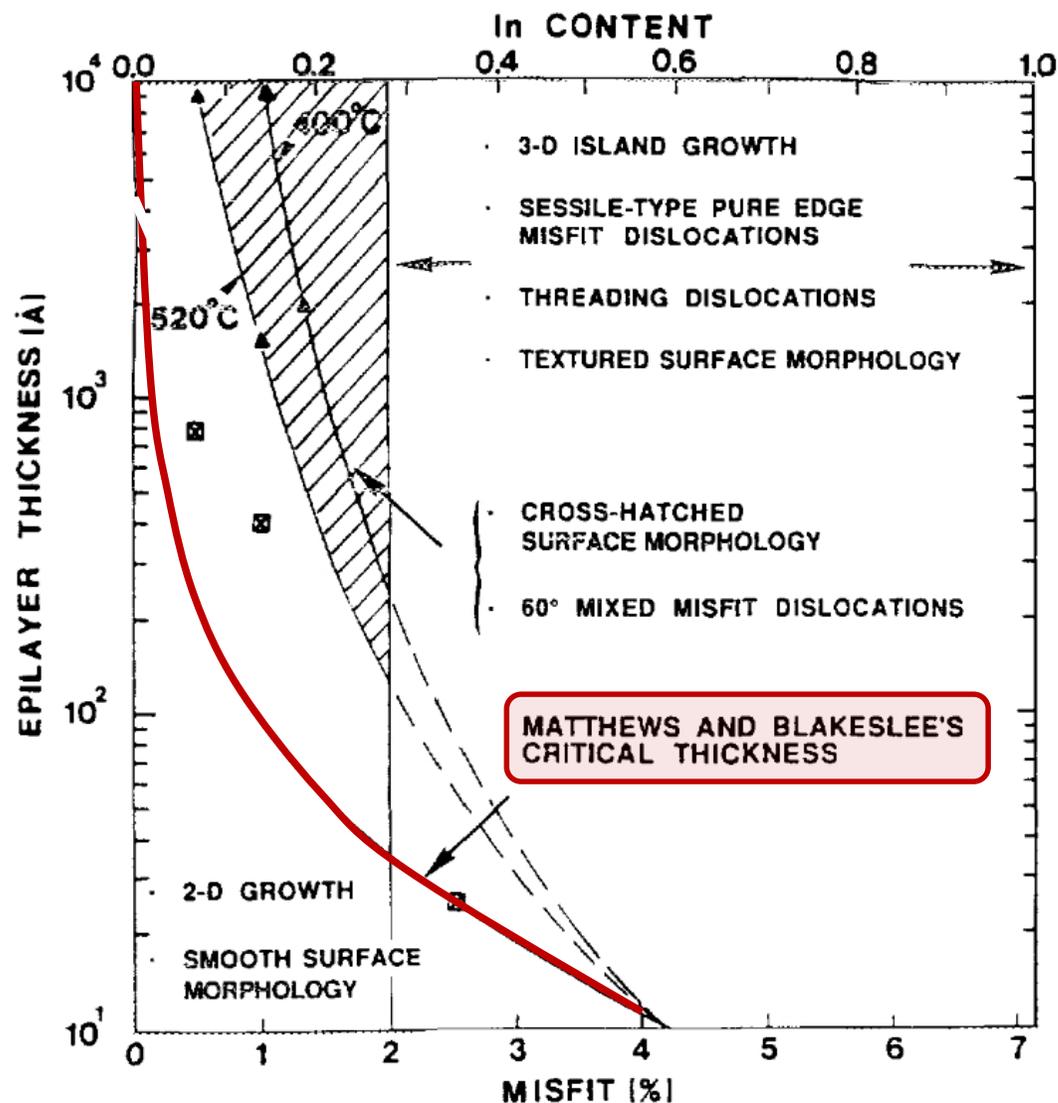
RMS ~ 3 nm

Cross-hatch – это характерная волнистая (перекрестно-штриховая) морфология поверхности, которая распространена в полупроводниковых напряженных гетероэпитаксиальных слоях, например в $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ и др., выращивание которых происходит в двумерном послойном (или ступенчато-слоевом) режиме.

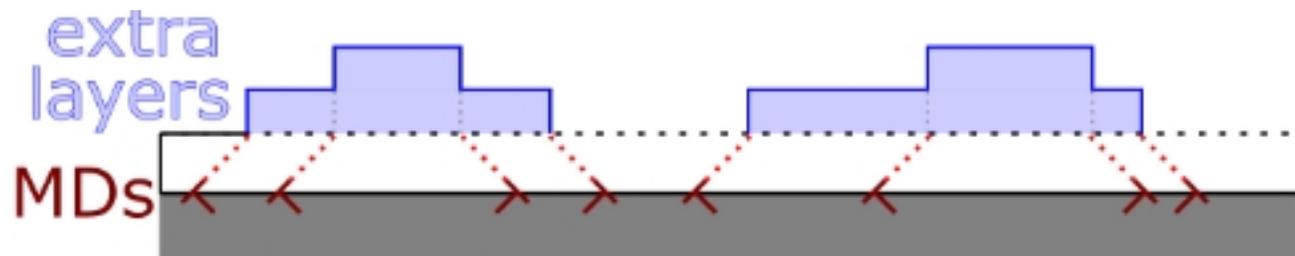


При эпитаксии на подложках с ориентацией (001) этот перекрестно-штриховой узор состоит из гребней (холмов) и впадин, вытянутых вдоль выделенных направлений $\langle 110 \rangle$ и $\langle 1\bar{1}0 \rangle$.

Движущей силой формирования волнистой шероховатой поверхности при росте упруго-напряженного слоя является снижение свободной энергии системы за счет уменьшения упругих деформаций в области вершин 3D рельефа, а **механизм реализации – поверхностная миграция атомов.**



Основная причина появления развитой перекрестно-штриховой морфологии поверхности при выращивании МБС связана с образованием массива ДН и, соответственно, появлением ступеней на поверхности роста за счет скольжения пронизывающих дислокаций [А.М. Andrews et al., J. Appl. Phys. 95, 6032 (2004)].



ДН также вызывают неоднородность деформации на фронте роста, что индуцирует неоднородное осаждение падающих атомов Ga и In и, таким образом, приводит к колебаниям толщины и состава слоя.

В случае $In_xGa_{1-x}As$ на формирование cross-hatch рельефа также оказывает влияние сегрегация In на поверхности роста.

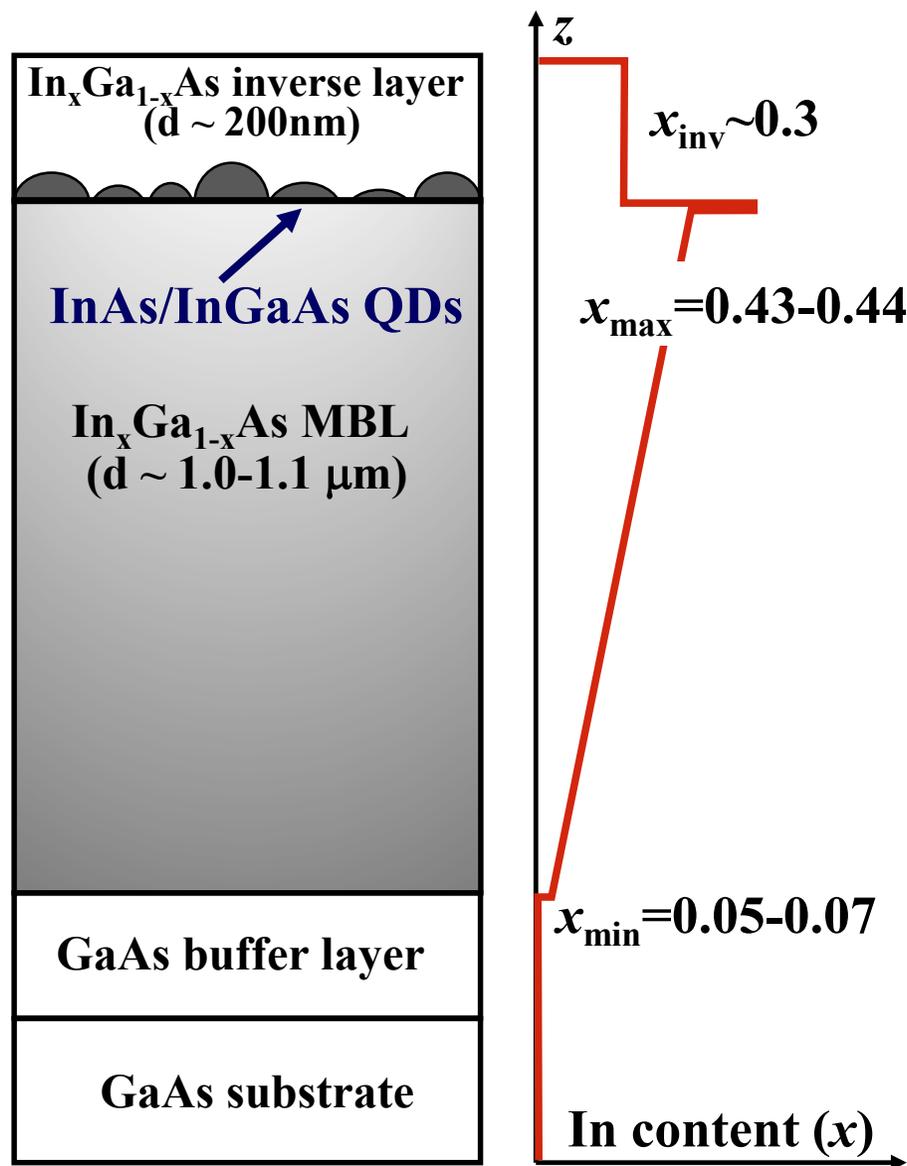
[К.Н. Chang et al., J. Appl. Phys. 67, 4093 (1990); <http://dx.doi.org/10.1063/1.344968>]

Все указанные механизмы приводят к появлению развитой перекрестно-штриховой морфологии поверхности

Как cross-hatch морфология поверхности структур с МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ влияет на формирование КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ методом МПЭ?

Особенности конструкции и режимы выращивания методом МПЭ структур, содержащих МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ с линейным профилем изменения состава

58

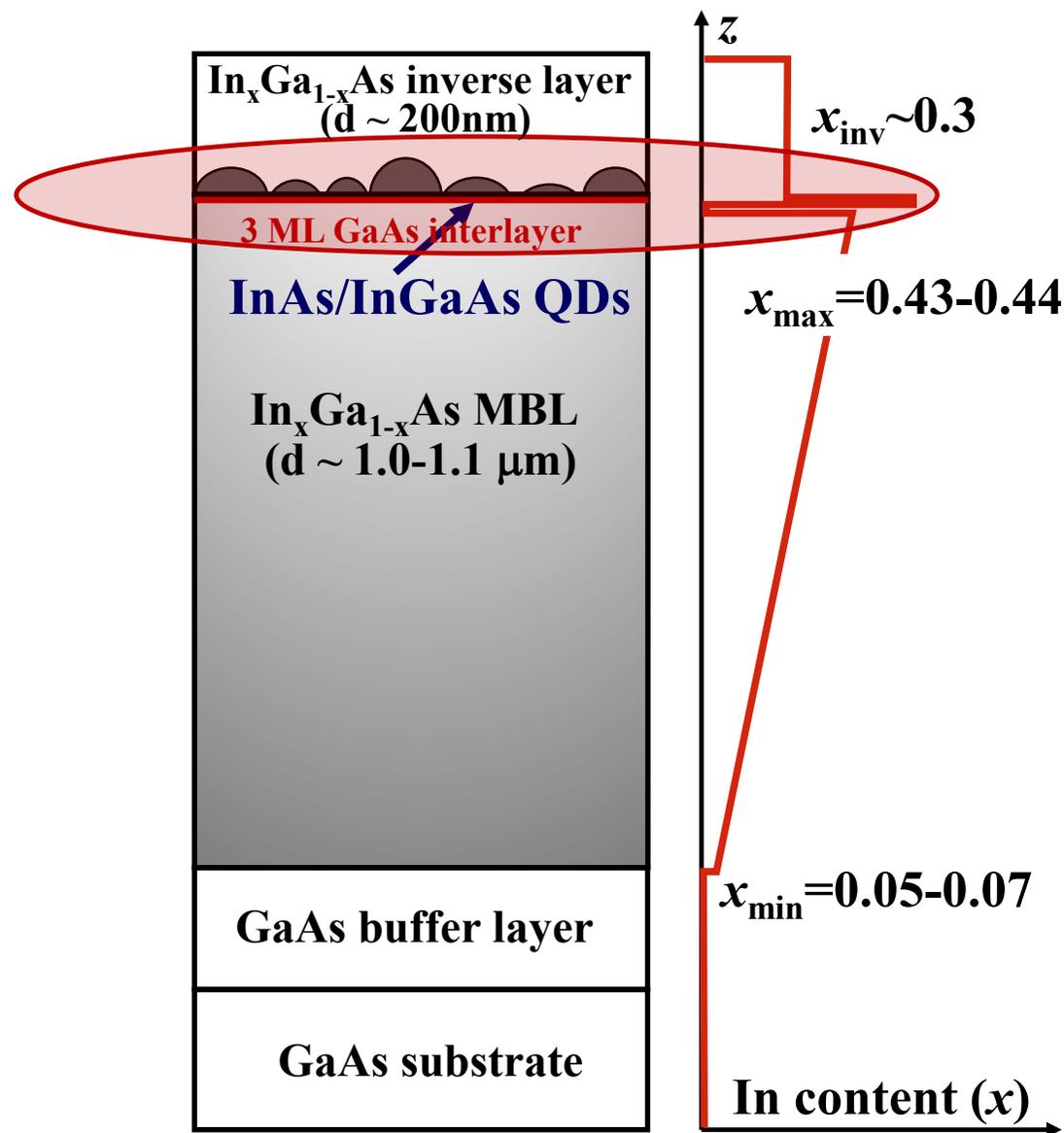


- ✓ Профиль изменения состава метаморфного буферного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ - линейный
- ✓ Максимальное содержание In в градиентном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $x_{\max} \sim 0.43-0.44$
- ✓ **Величина начальной ступени по In в МБС $x_{\min} = 0.05-0.07$.**
- ✓ **Толщина МБС составляет $\sim 1.0-1.1\ \mu\text{м}$ и зависит от максимального содержания In**
- ✓ **Средняя скорость изменения состава в МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $\sim (35-40)\% \text{In}/\mu\text{м}$**
- ✓ Содержание In в инверсном слое $x_{\text{inv}} \sim 0.3$. Толщина инверсного слоя $\sim 200\ \text{нм}$

- ✓ Увеличение содержания In в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ происходит посредством плавного увеличения температуры источника In при неизменном потоке Ga
- ✓ Температура осаждения МБС – $T_S = 380-400^\circ\text{C}$; соотношение потоков $V/\text{III} \sim 1.5-2$

Особенности конструкции и режимы выращивания методом МПЭ структур, содержащих МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ с линейным профилем изменения состава

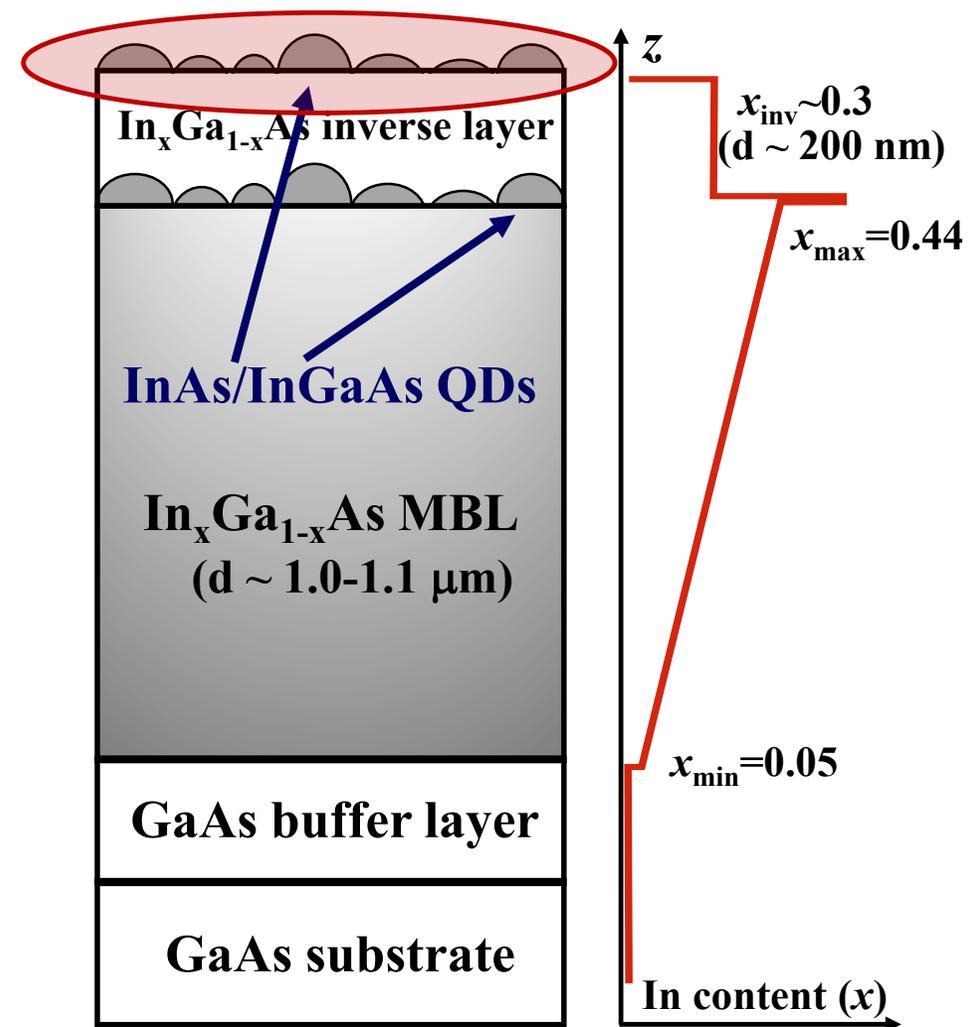
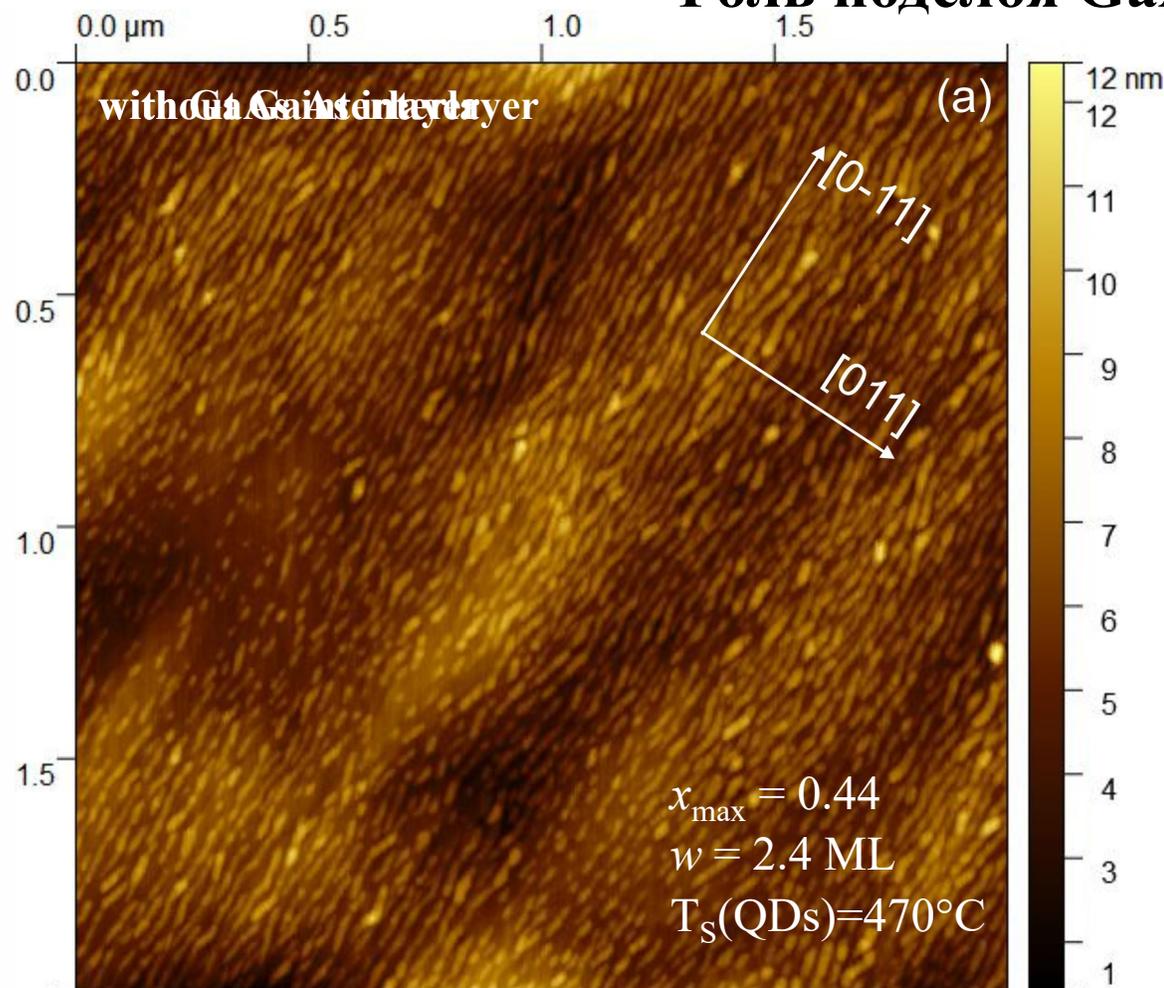
59



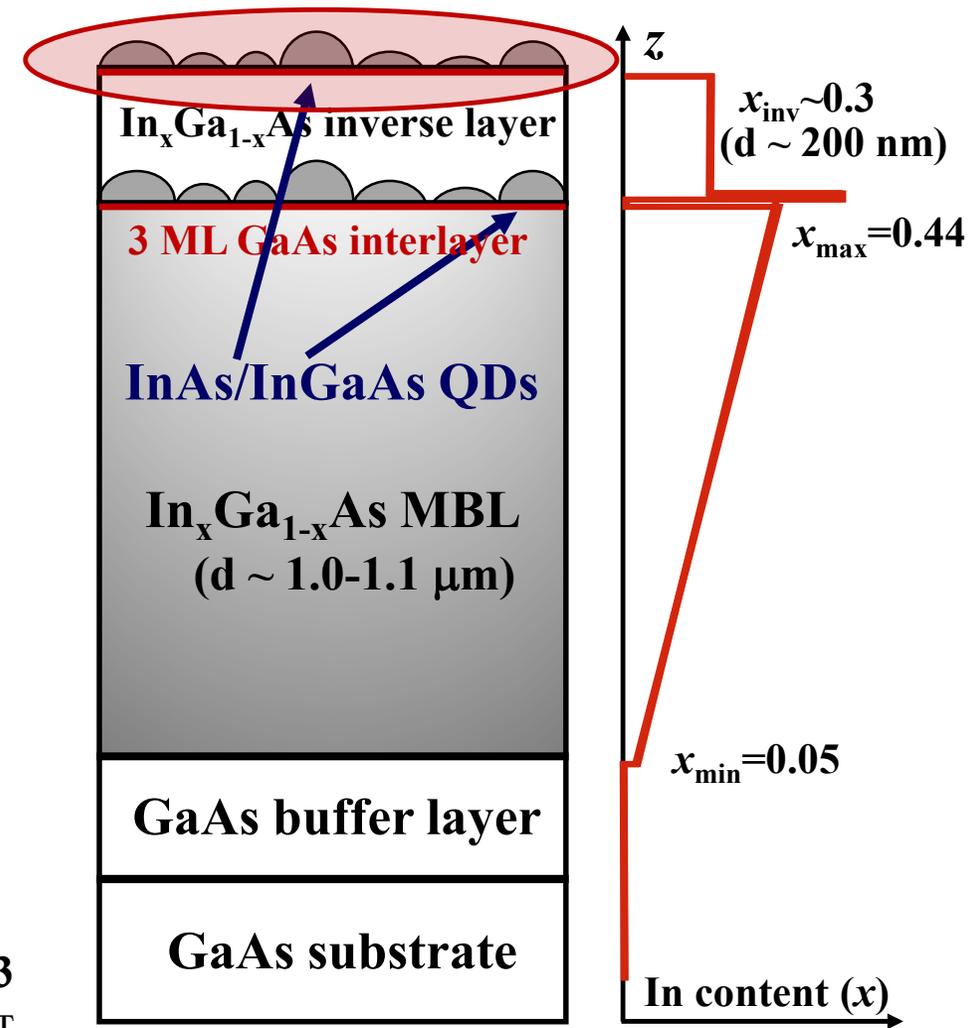
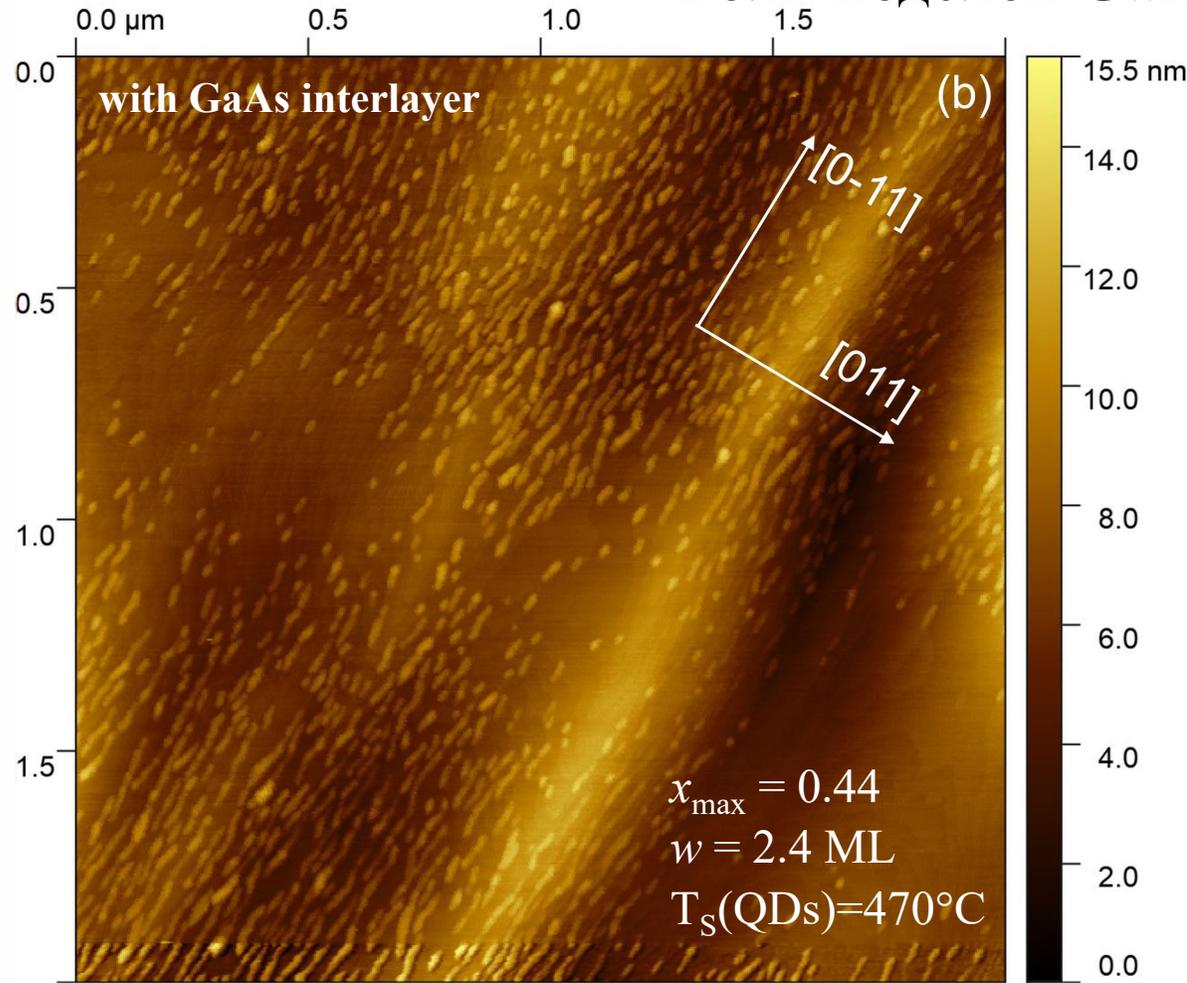
- ✓ Профиль изменения состава метаморфного буферного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ - линейный
- ✓ Максимальное содержание In в градиентном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $x_{\max} \sim 0.43-0.44$
- ✓ Величина начальной ступени по In в МБС $x_{\min} = 0.05-0.07$.
- ✓ Толщина МБС составляет $\sim 1.0-1.1 \mu\text{m}$ и зависит от максимального содержания In
- ✓ Средняя скорость изменения состава в МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $\sim (35-40)\% \text{In}/\mu\text{m}$
- ✓ Содержание In в инверсном слое $x_{\text{inv}} \sim 0.3$. Толщина инверсного слоя $\sim 200 \text{nm}$

- ✓ Увеличение содержания In в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ происходит посредством плавного увеличения температуры источника In при неизменном потоке Ga
- ✓ Температура осаждения МБС – $T_S = 380-400^\circ\text{C}$; соотношение потоков V/III $\sim 1.5-2$

Роль подслоя GaAs.

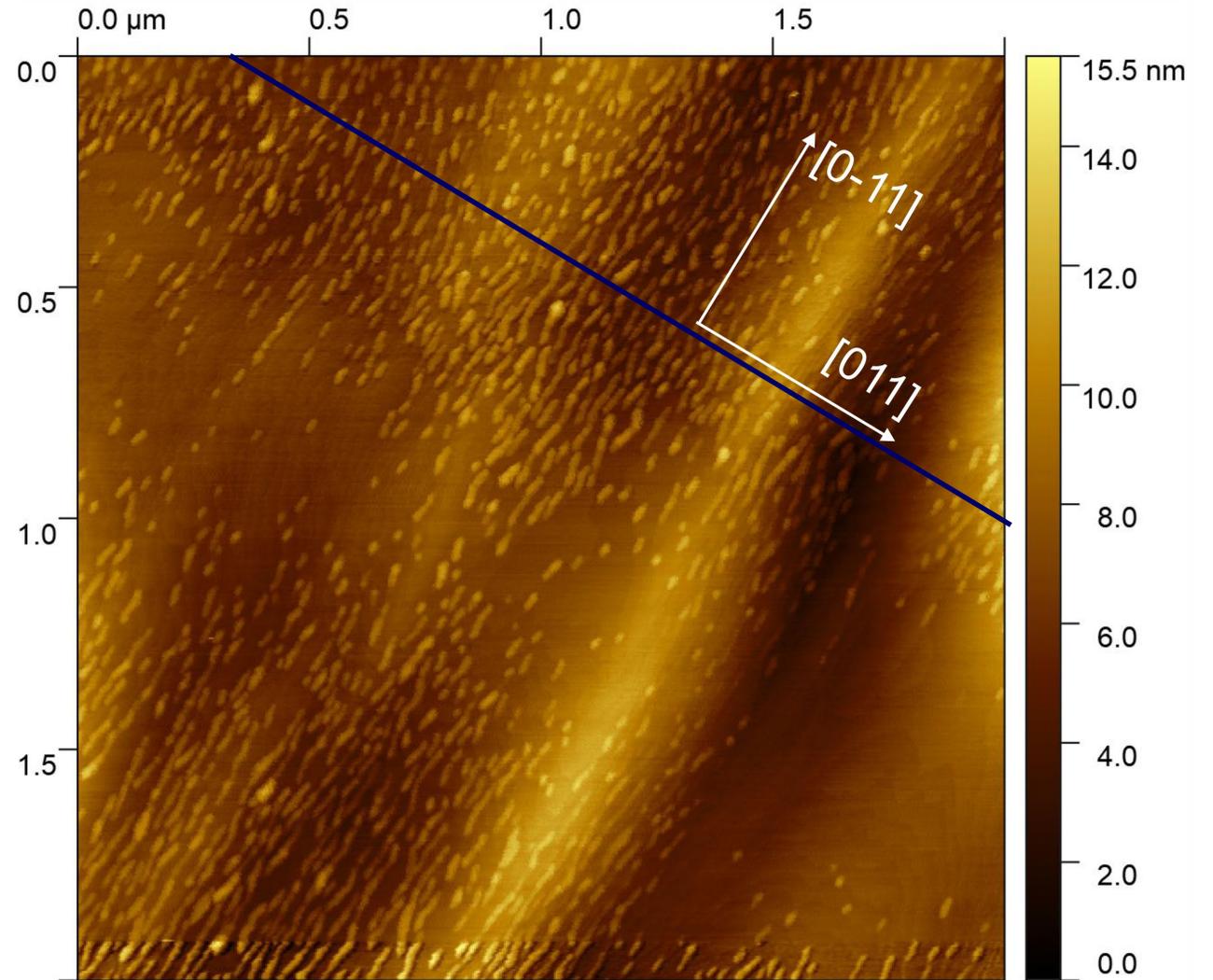
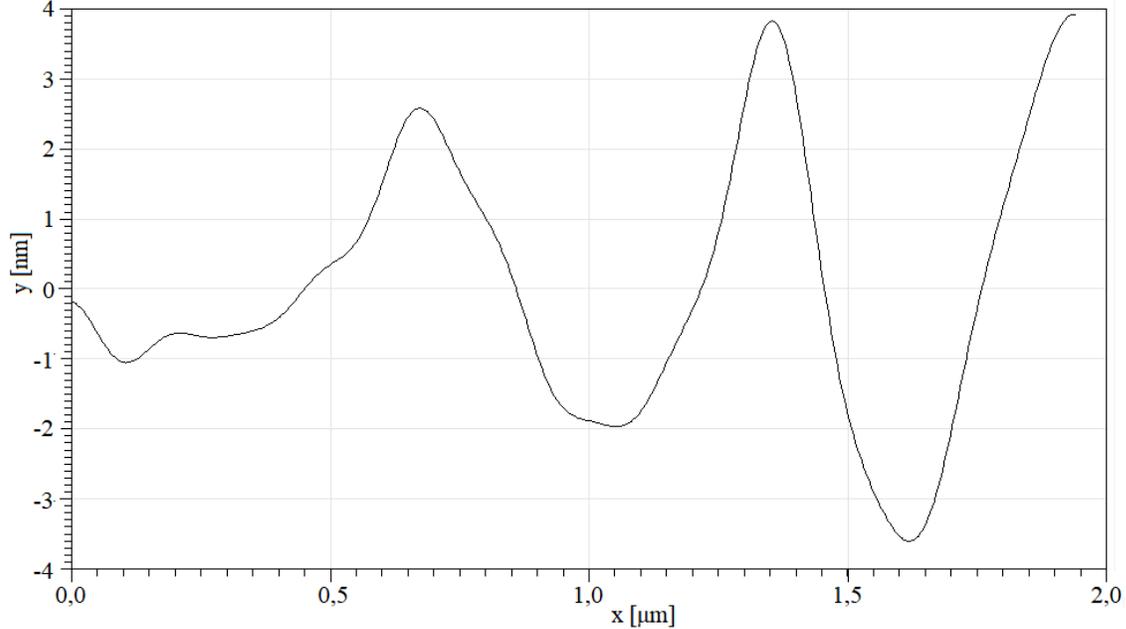
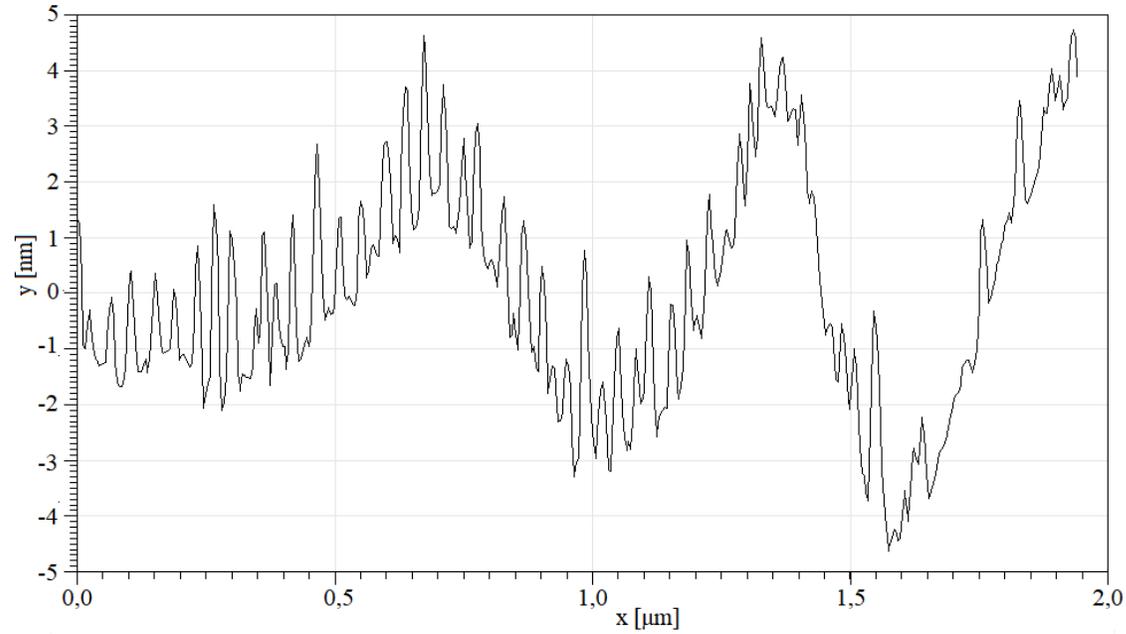


Роль подслоя GaAs.



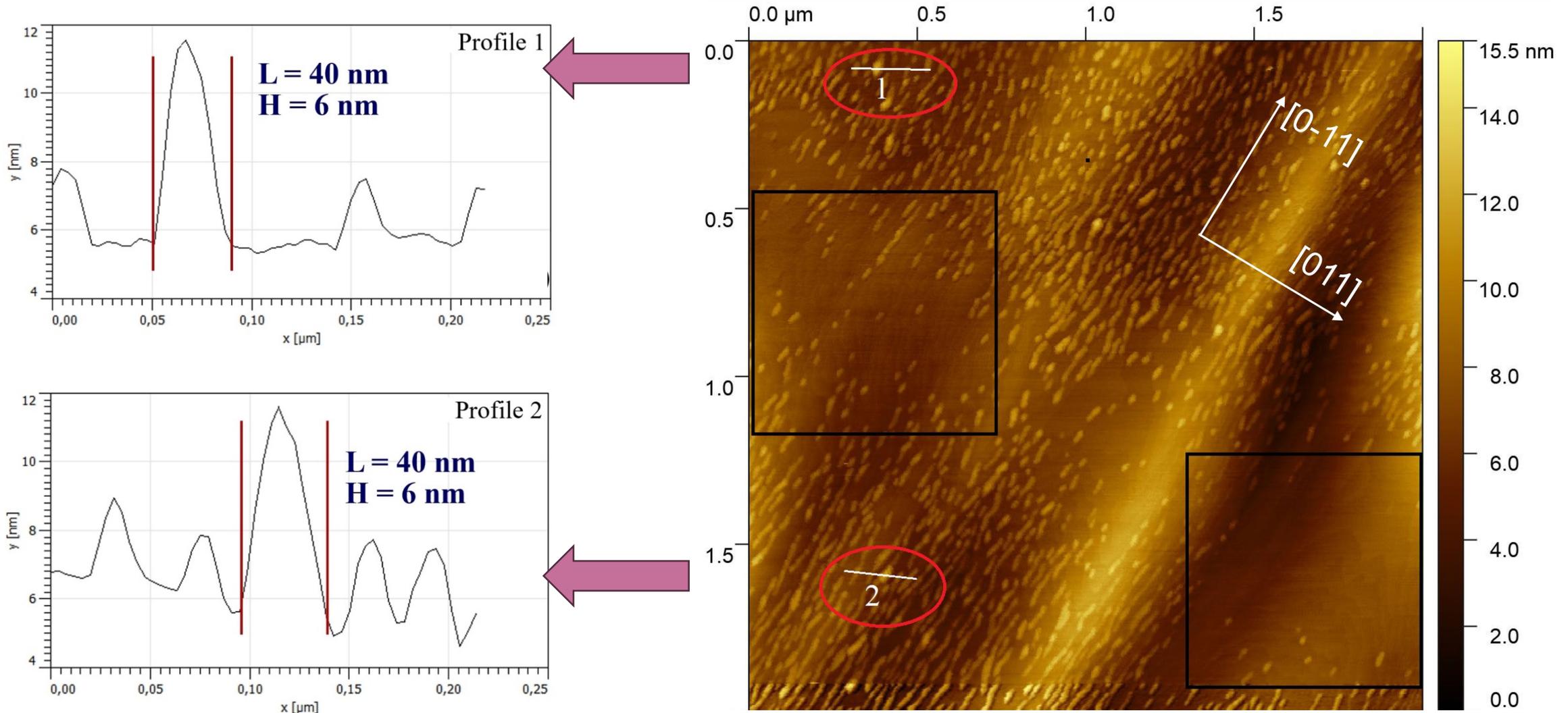
Введение в конструкцию структуры тонкого подслоя GaAs толщиной ~ 3 МС (interlayer) между верхней частью МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и КТ, оказывает существенное влияние на кинетику формирования КТ и способствует подавлению тенденции к формированию протяженных квантовых штрихов.

Исследования структур с МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ и КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ 62



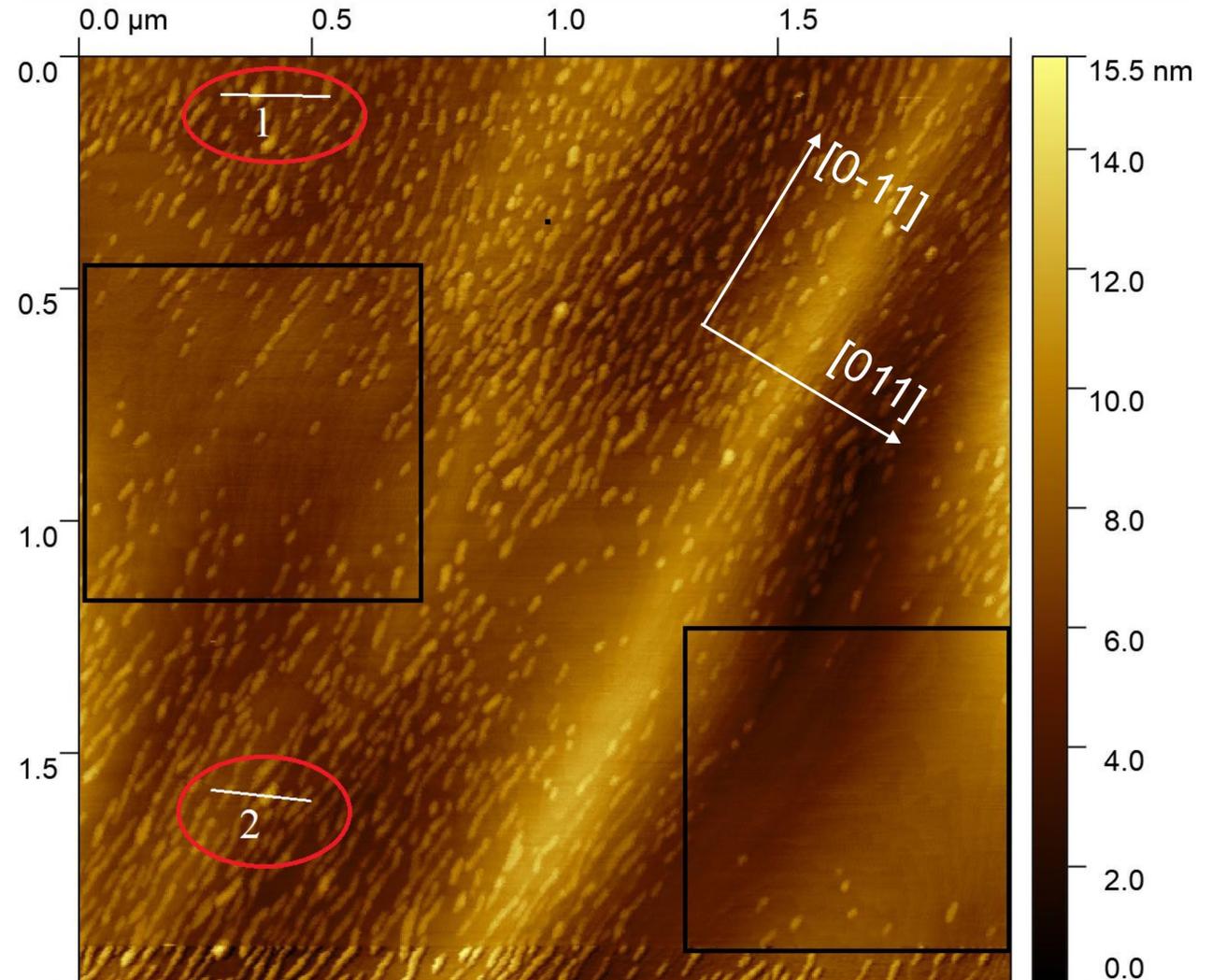
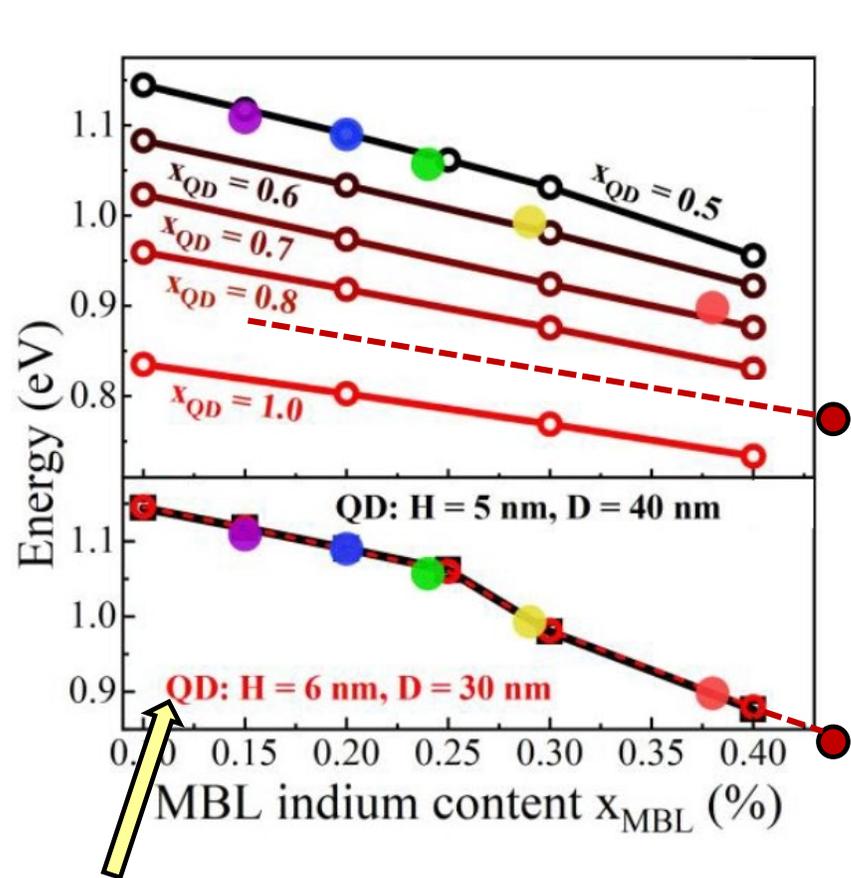
Исследования структур с МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ и КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ 63

Плотность «больших» КТ ($L=30-40$ нм, $H=5-6$ нм), которые, по-видимому, ответственны за излучение в диапазоне ~ 1.55 мкм, составляет $\sim (1\div 5) \times 10^8 \text{ см}^{-2}$



Исследования структур с МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ и КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ 64

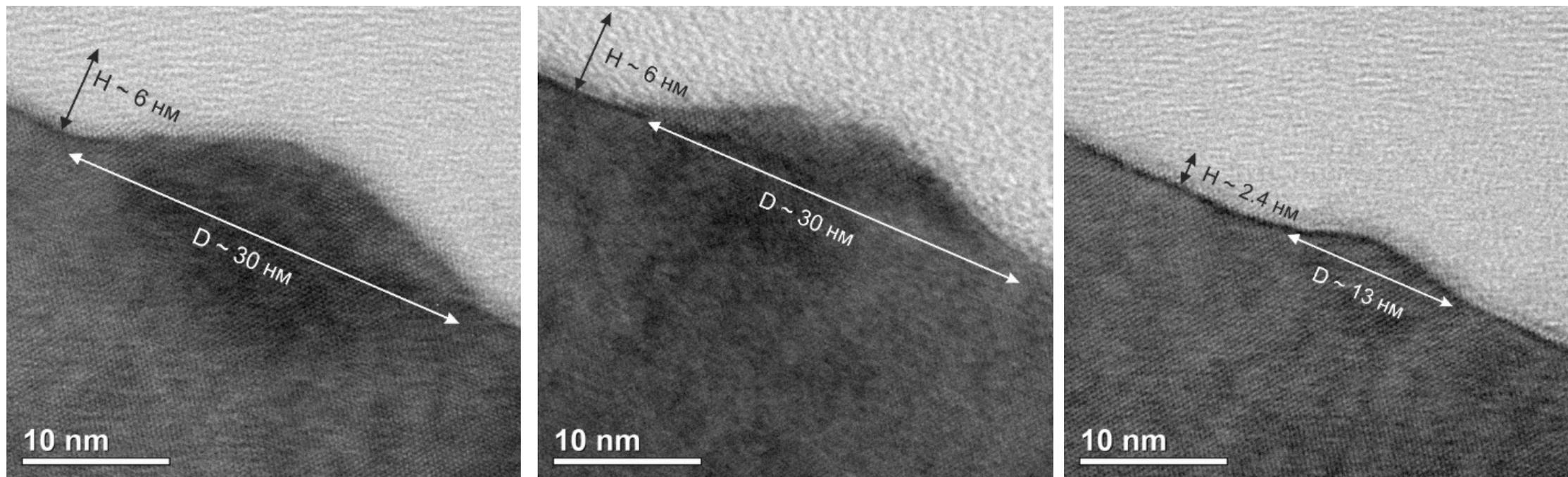
Плотность «больших» КТ ($L=30-40$ нм, $H=5-6$ нм), которые, по-видимому, ответственны за излучение в диапазоне ~ 1.55 мкм, составляет $\sim (1\div 5) \times 10^8 \text{ см}^{-2}$



[P.A. Wroński et al., *Materials* **14**, 5221 (2021)]

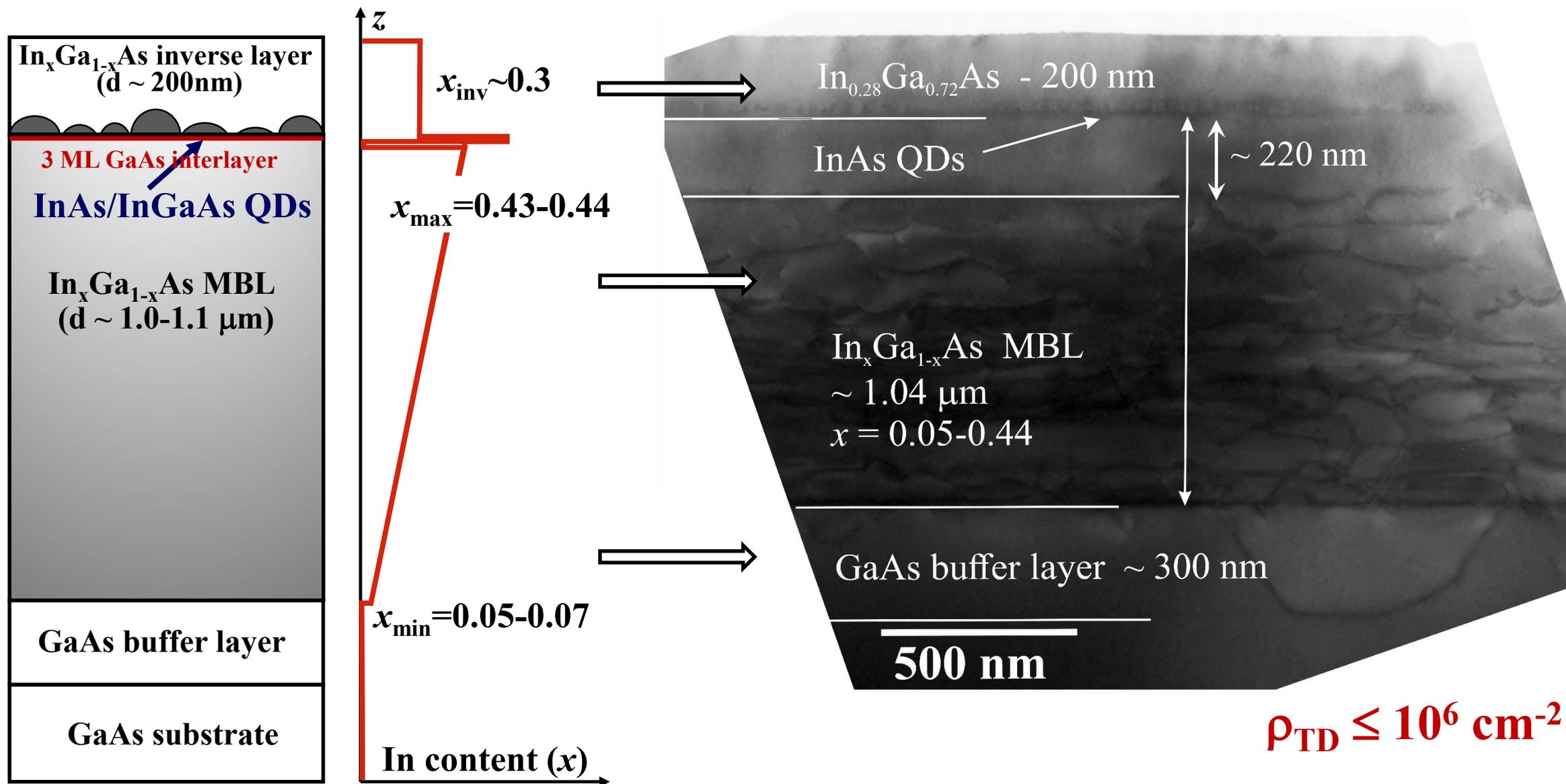
[P. Wyborski et al., *Phys. Rev. Appl.* **20**, 044009 (2023)]

Температура осаждения слоя КТ – $T_s = 470^\circ\text{C}$; номинальная толщина слоя InAs – $w = 2.4$ МС

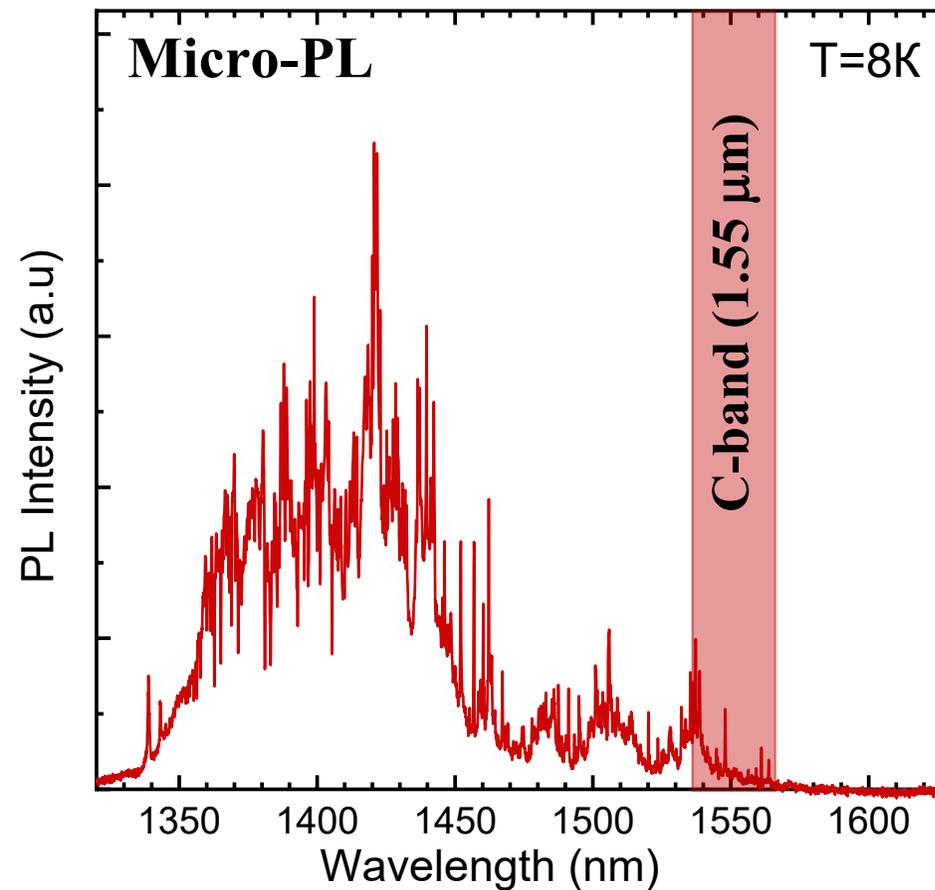
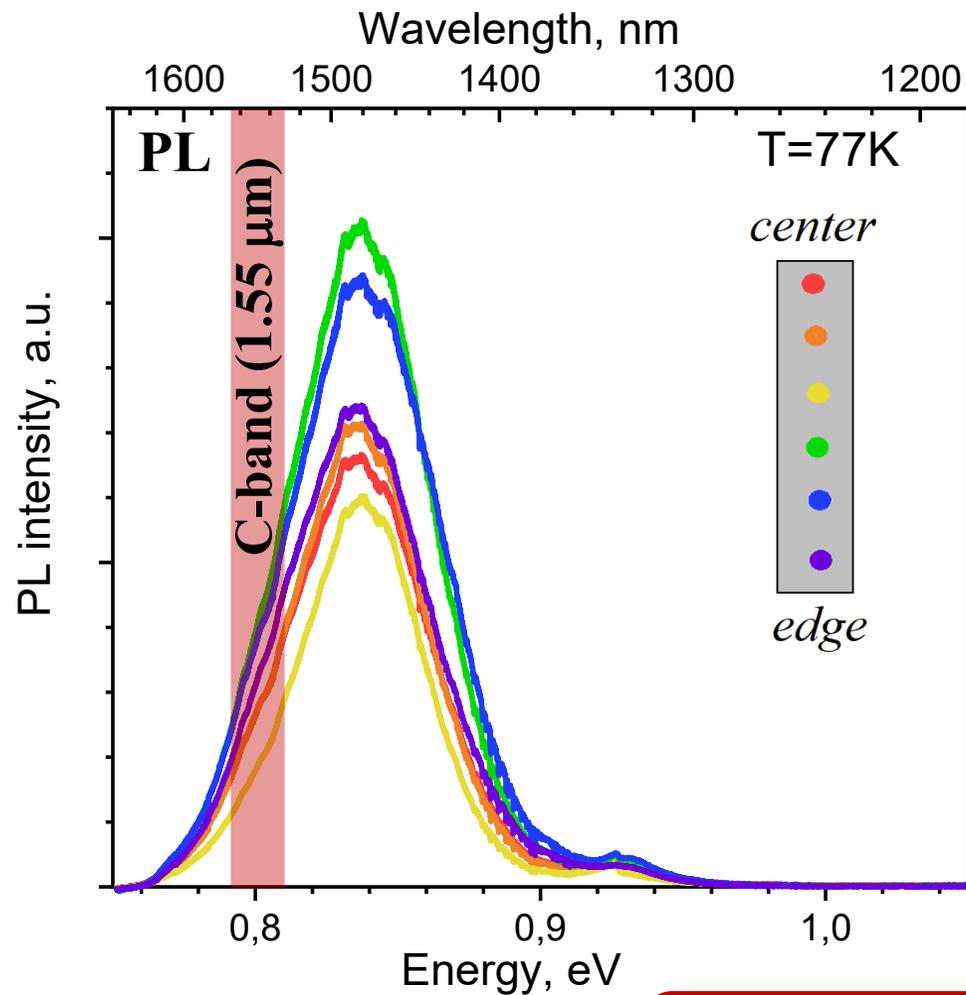


- Зарожденные КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ демонстрируют широкий разброс по размерам.
- Наблюдаются как «большие» КТ с латеральными размерами (L) ~ 30 - 40 нм и высотой (H) 5 - 6 нм, так и «мелкие» КТ с $L \sim 10$ - 15 нм и $H \sim 2.4$ нм.
- Соотношение ширины к высоте (aspect ratio) для всех КТ составляет ~ 5 .

Особенности конструкции и режимы выращивания методом МПЭ структур, содержащих МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ с линейным профилем изменения состава

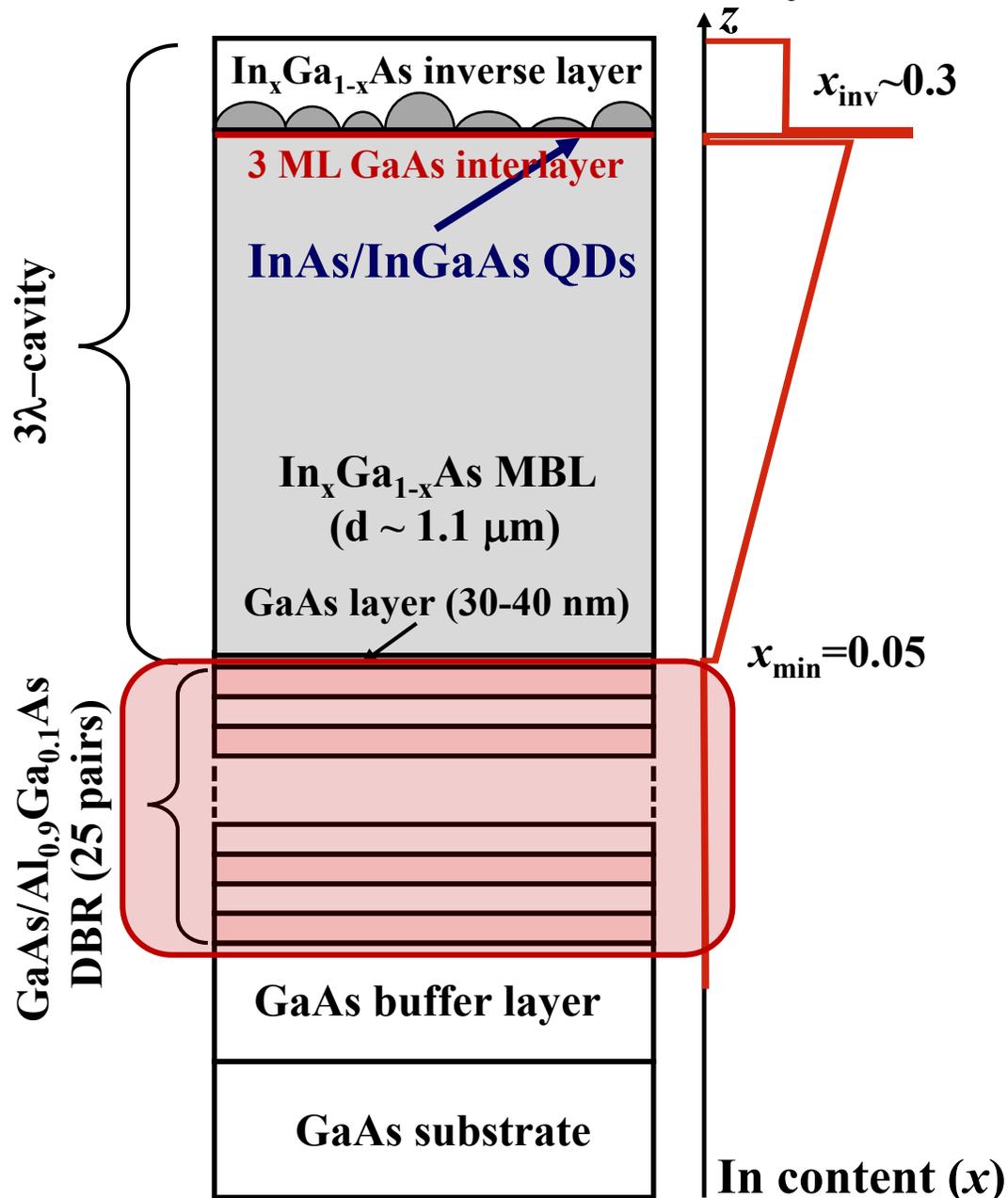


Исследования структур с МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$ и КТ $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ методами спектроскопии ФЛ

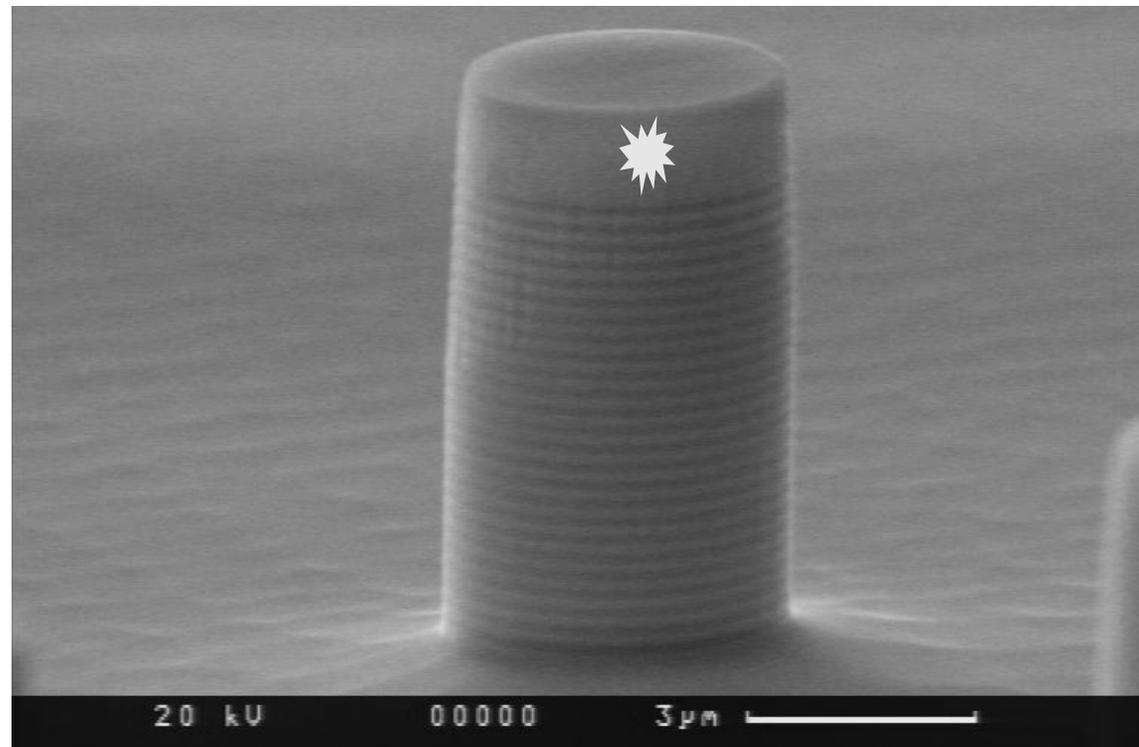


$$x_{\max} = 0.44, x_{\text{inv}} = 0.3, w = 2.4 \text{ ML}$$

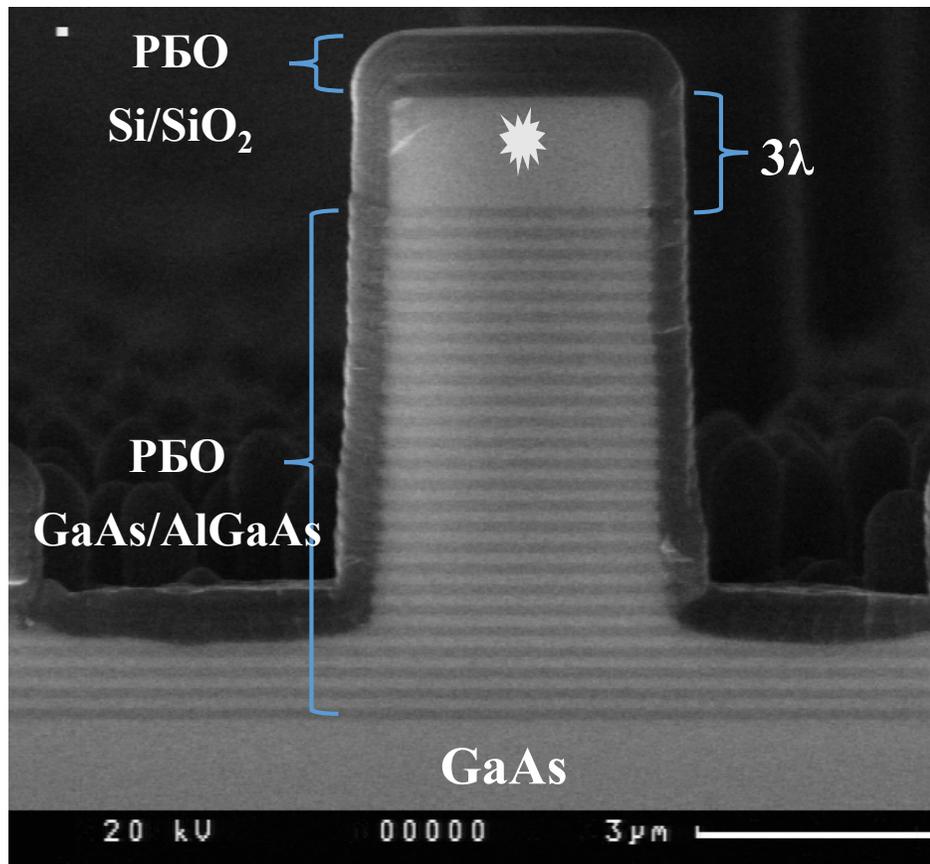
**Источник одиночных фотонов на $\lambda \sim 1550$ нм
для телекоммуникационного С-диапазона.
Гибридный микрорезонатор.**



- МПЭ рост на подложках GaAs(100) гетероструктуры с GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As РБО, In_xGa_{1-x}As МБС и InAs/InGaAs КТ
- Фотолитография
- Реактивное ионное травление

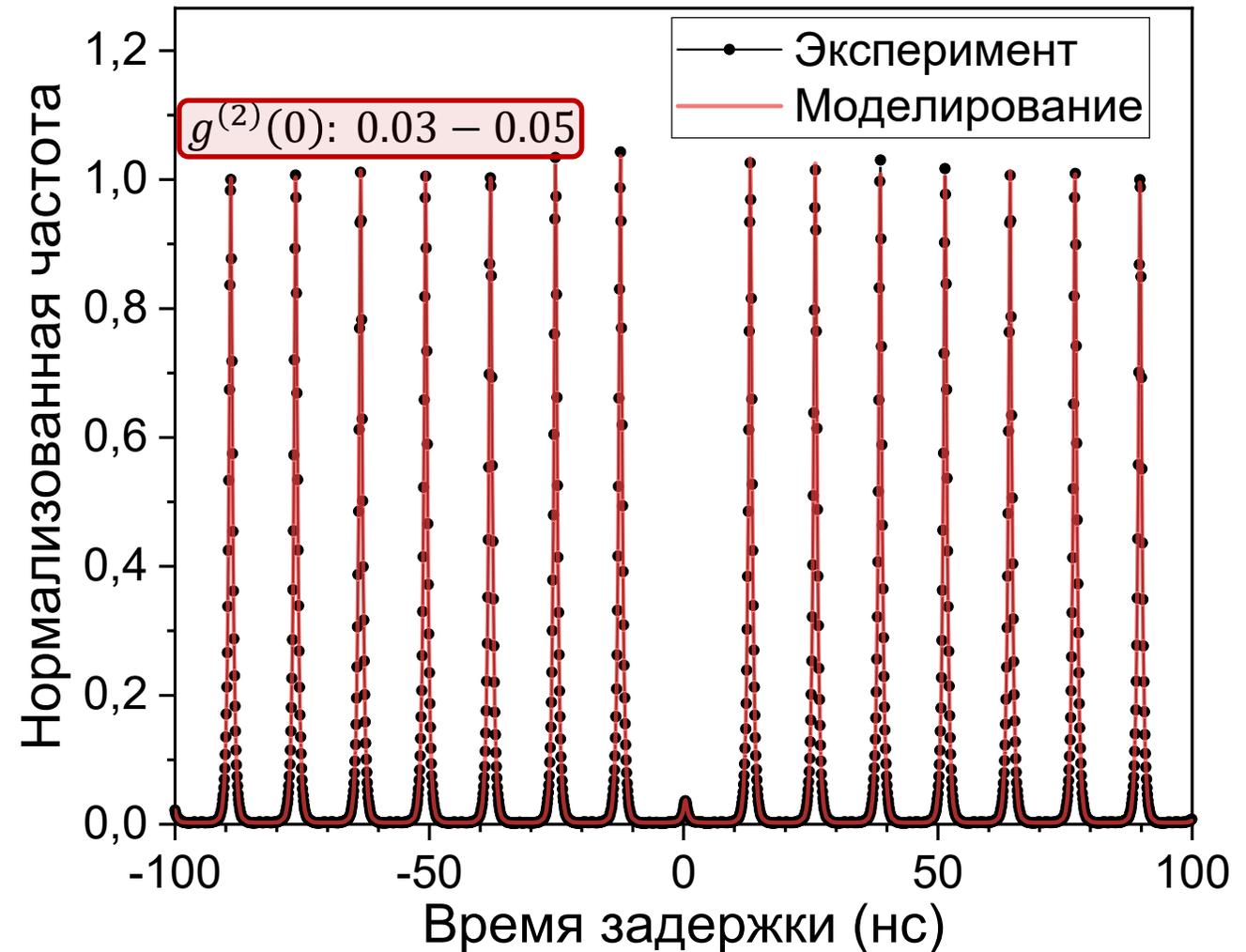


Диэлектрический РБО:
2 пары $\lambda/4$ слоев Si/SiO₂



Гибридный микрорезонатор
полупроводник/диэлектрик

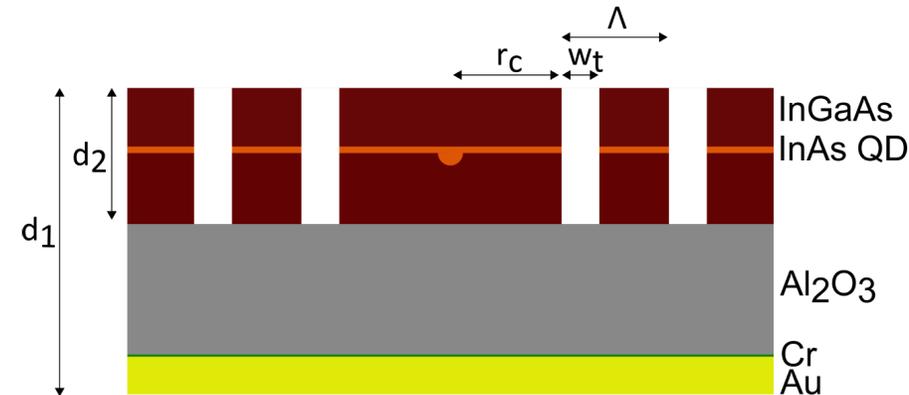
$g^{(2)}(t)$, возбуждение π -импульсом



**Г.П. Вейшторт. Избирательность оптического возбуждения
квантовых точек InAs/InGaAs.**

[Суббота 28.02, устная конкурсная секция. 10.45-11.00]

[C. Nawrath et al, Bright source of purcell-enhanced, triggered, single photons in the telecom C-band, Adv. Quantum Technol. 6(11), 2300111 (2023)]



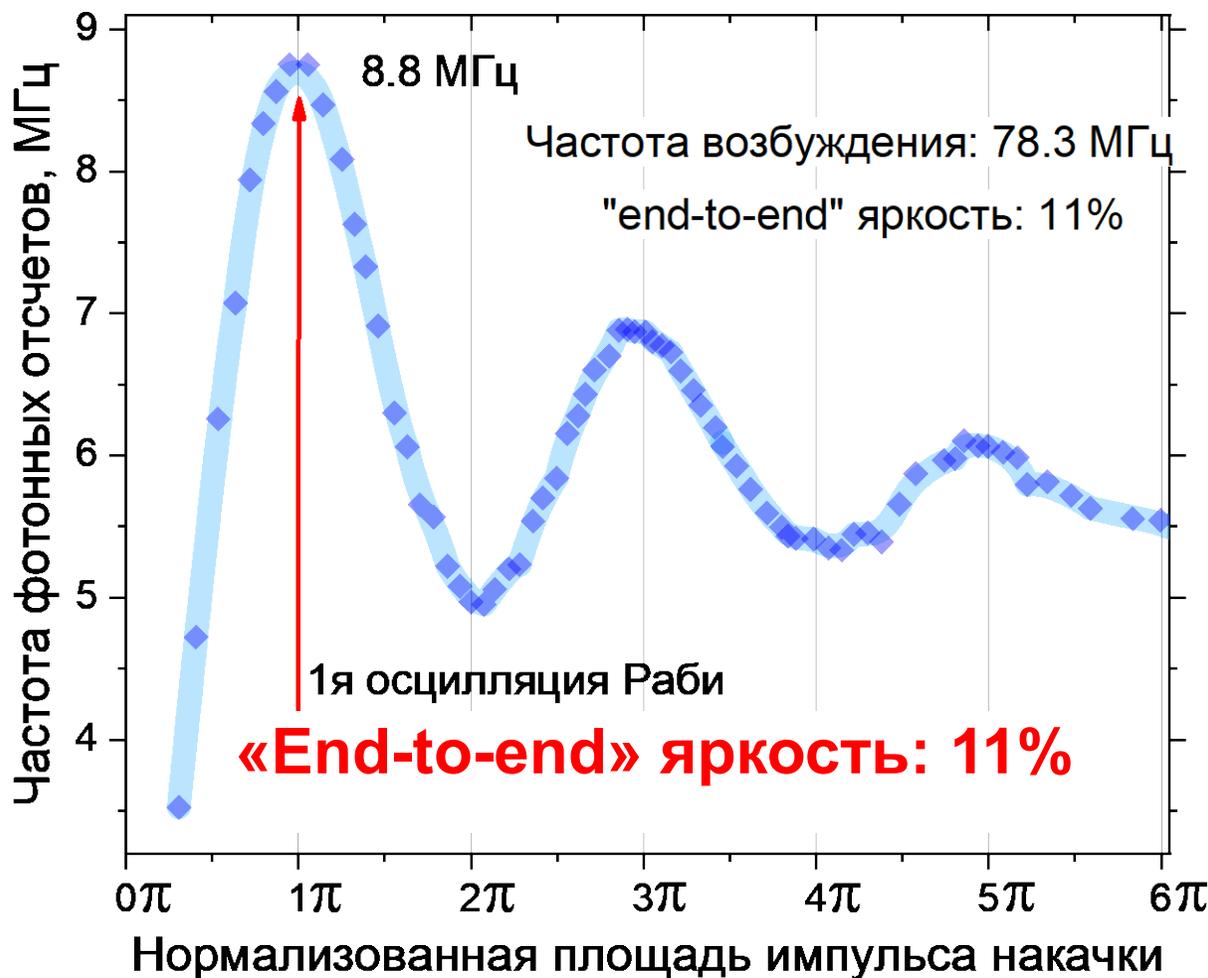
«End-to-end» яркость: 6.3%

[J. Yang et al., High-rate intercity quantum key distribution with a semiconductor single-photon source, Light: Science & Applications 13, Article number: 150 (2024)]



«End-to-end» яркость: 4.7%

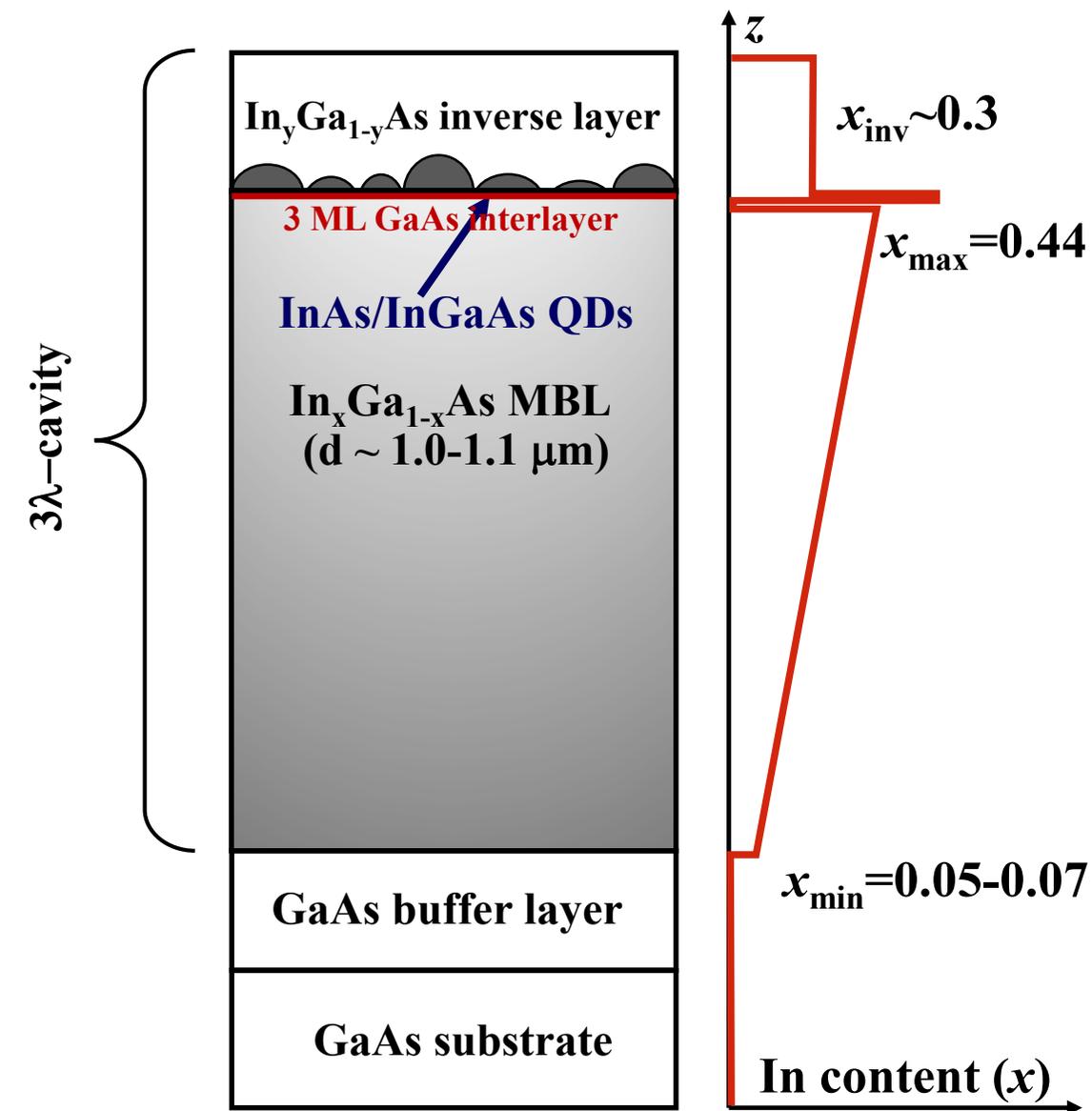
Резонансное когерентное возбуждение



«End-to-end» яркость: 11%

ИОФ телекоммуникационного С-диапазона (1.55 мкм). Что дальше?

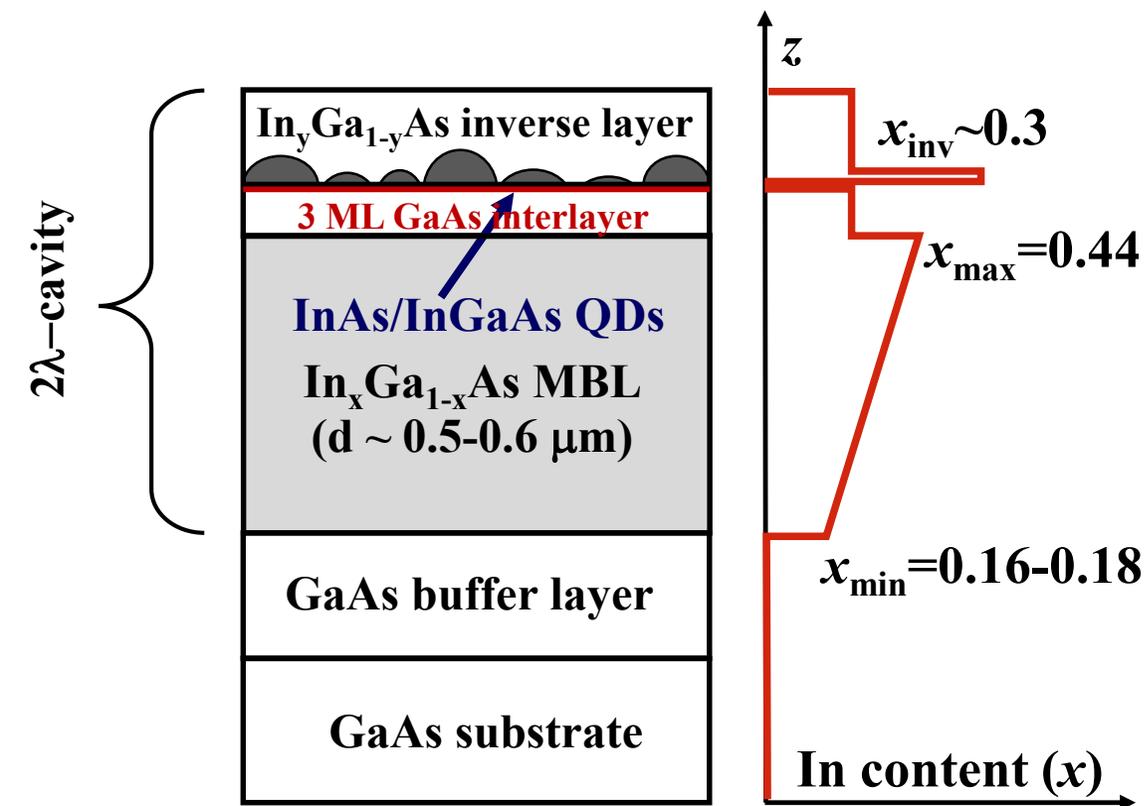
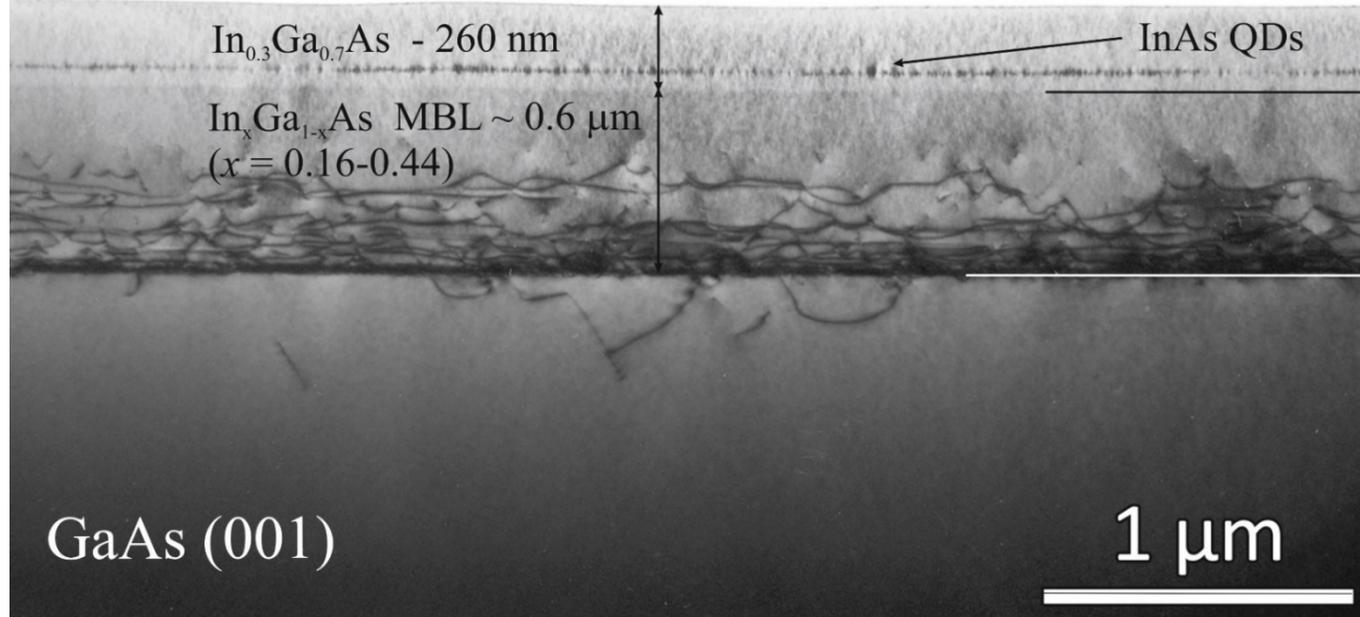
ИОФ телекоммуникационного С-диапазона (1.55 мкм). Перспективы 73



Уменьшить размер полости резонатора с
МБС: $3\lambda - 2\lambda - 1\lambda$??

ИОФ телекоммуникационного С-диапазона (1.55 мкм). Перспективы 74

$$\rho_{TD} \leq 10^6 \text{ cm}^{-2}$$

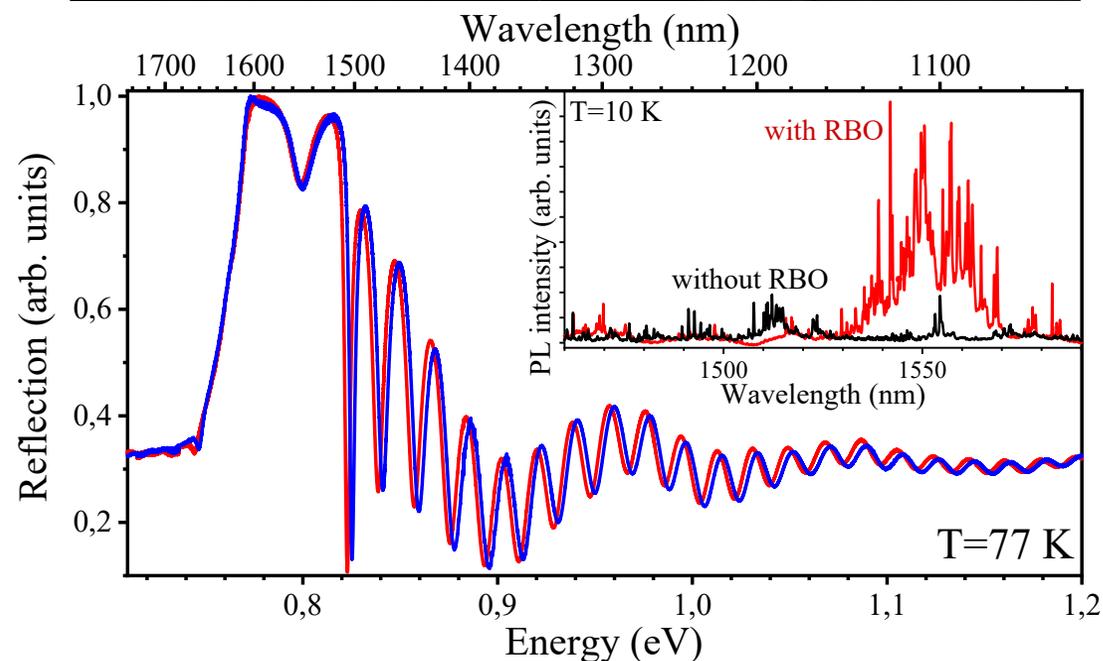
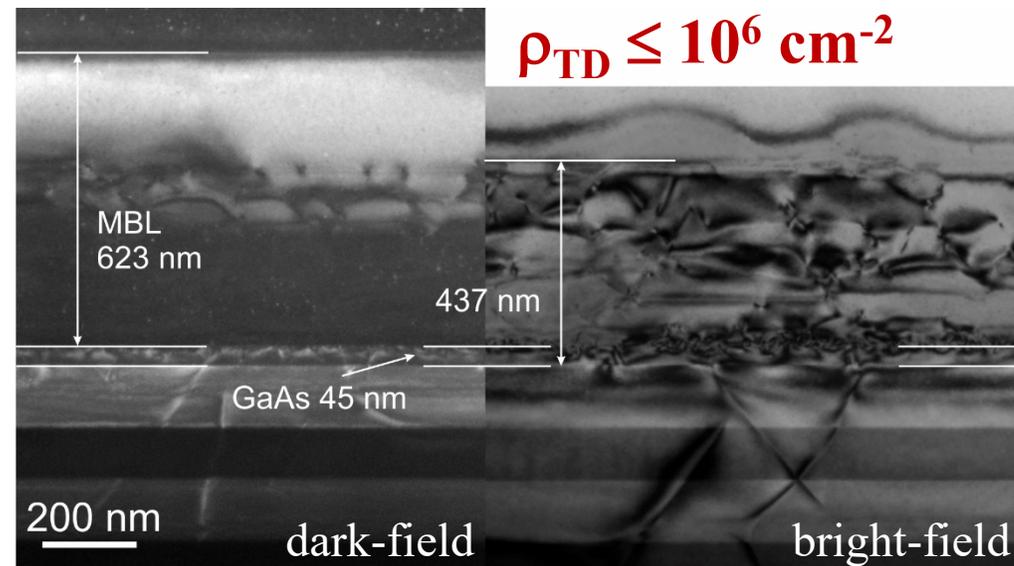
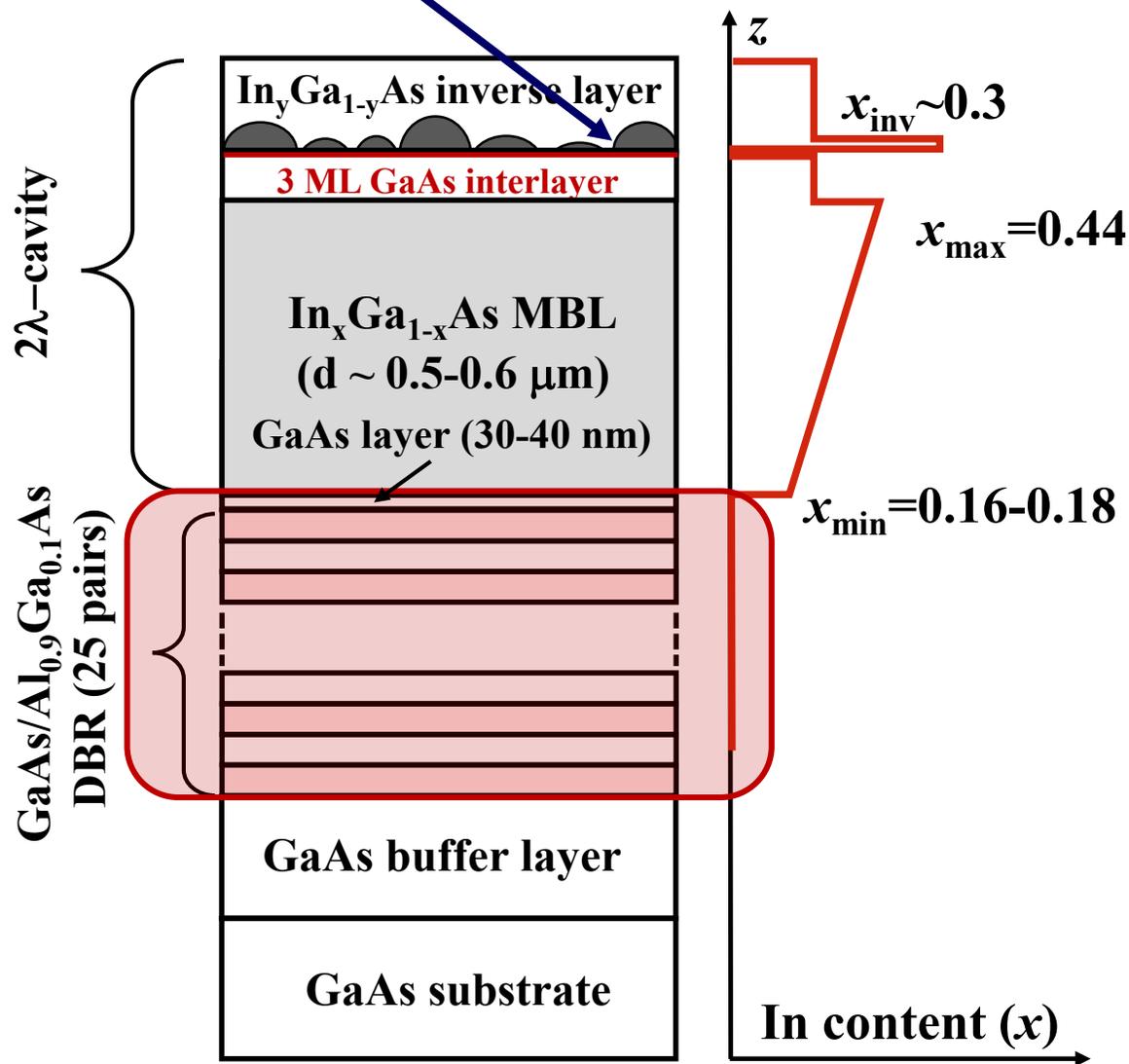


- ✓ Профиль изменения состава МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ - линейный
- ✓ Максимальное содержание In в градиентном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $x_{\max} \sim 0.44$
- ✓ Величина начальной ступени по In в МБС $x_{\min} = 0.16-0.18$.
- ✓ Толщина МБС составляет $\sim 0.5-0.6$ мкм
- ✓ Средняя скорость изменения состава в МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $\sim (45-50)\%$ In/мкм.

ИОФ телекоммуникационного С-диапазона (1.55 мкм). Перспективы 75

[S.V. Sorokin et al., *JETP Lett.* 121, 35–40 (2025)]

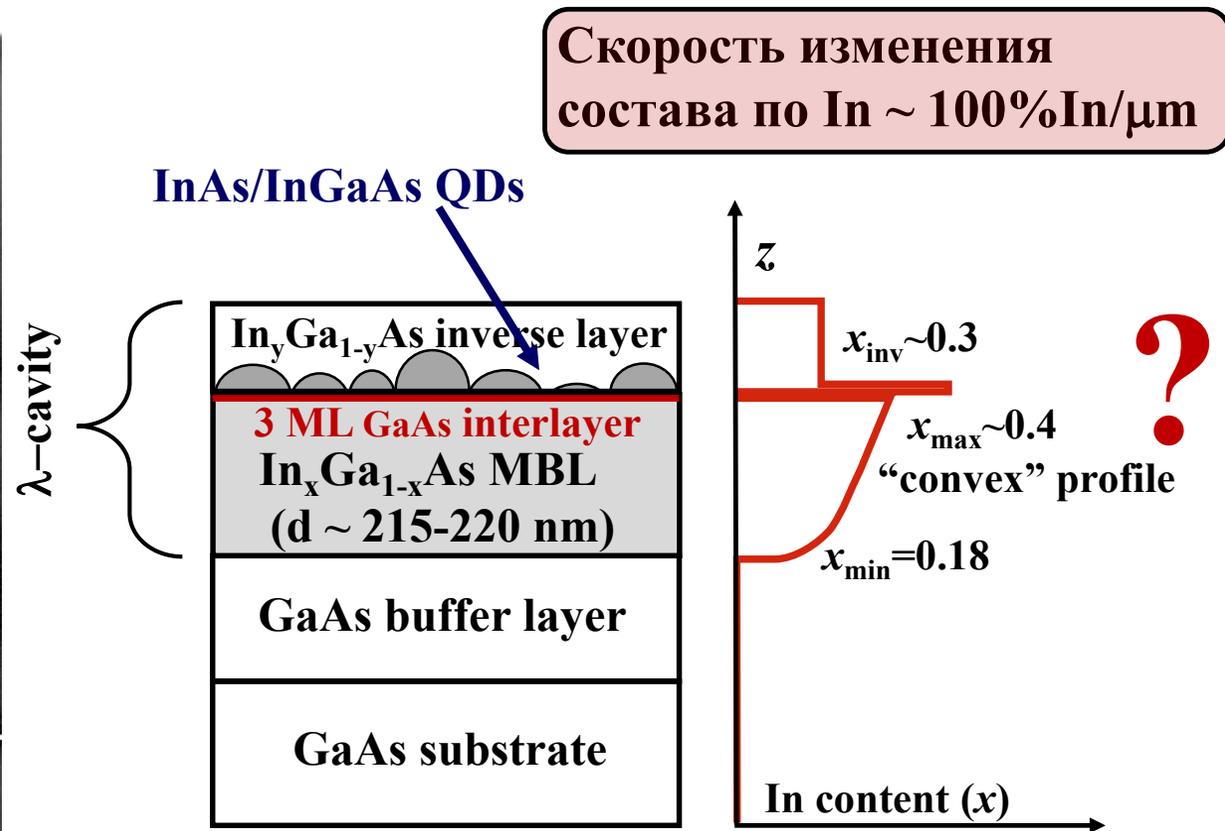
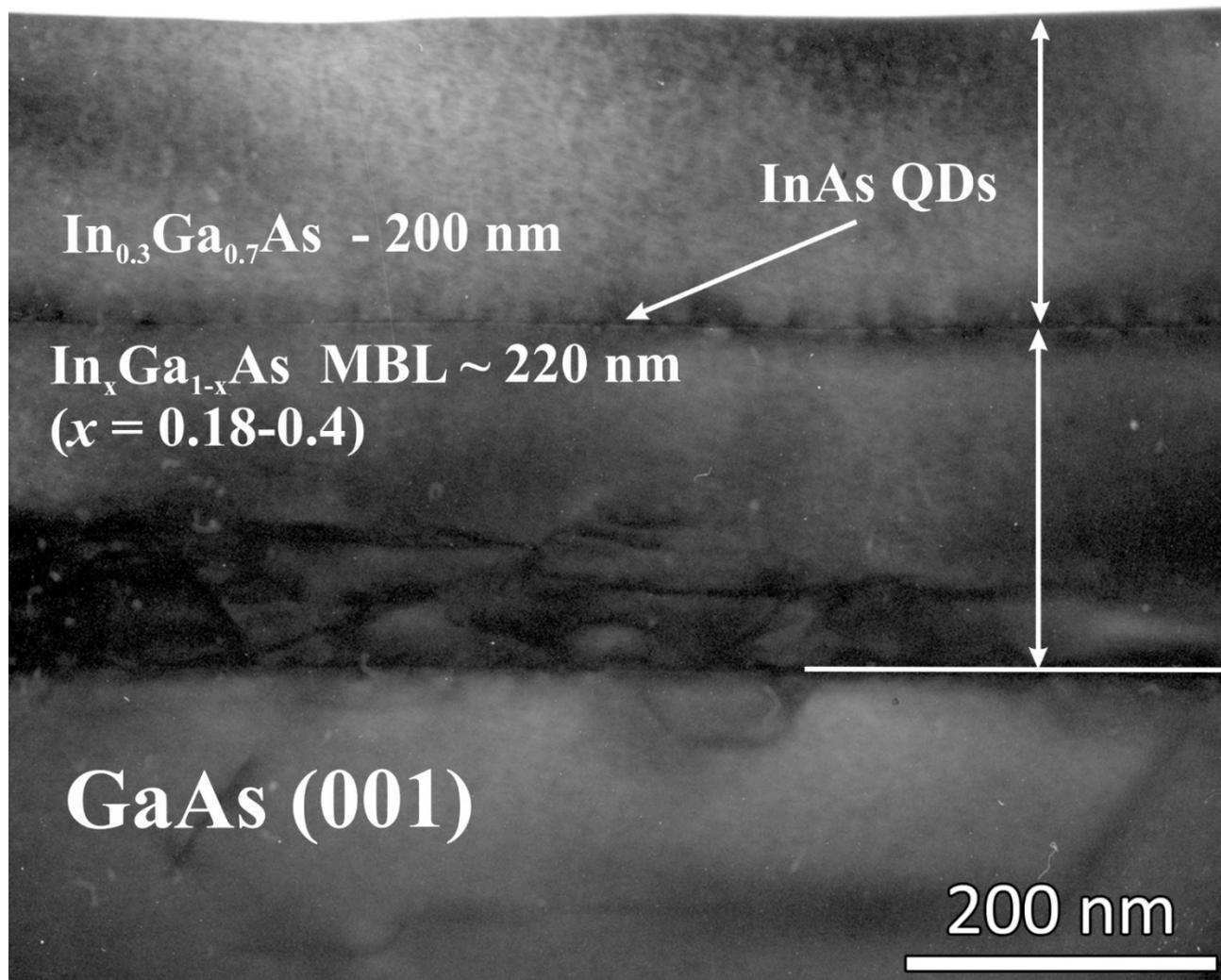
InAs/InGaAs QDs



Зимняя школа 2026, Санкт-Петербург, 25 февраля - 01 марта 2026 г.

ИОФ телекоммуникационного С-диапазона (1.55 мкм). Перспективы 76

[О.Е. Lakuntsova et al., *JETP Lett.* **123**, 1–9 (2026)]



О.Е. Лакунцова. Гетероструктуры с КТ InAs/InGaAs и сверхтонкими метаморфными буферными слоями $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(001)$.

[Суббота 28.02, Постерная секция. С-03]

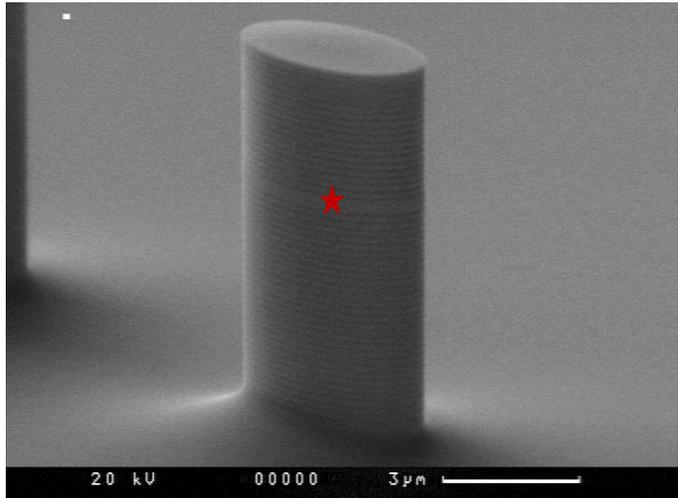
❑ Оптимизация дизайна МБС
(морфология, режимы МПЭ роста)

❑ Анизотропный
микрорезонатор

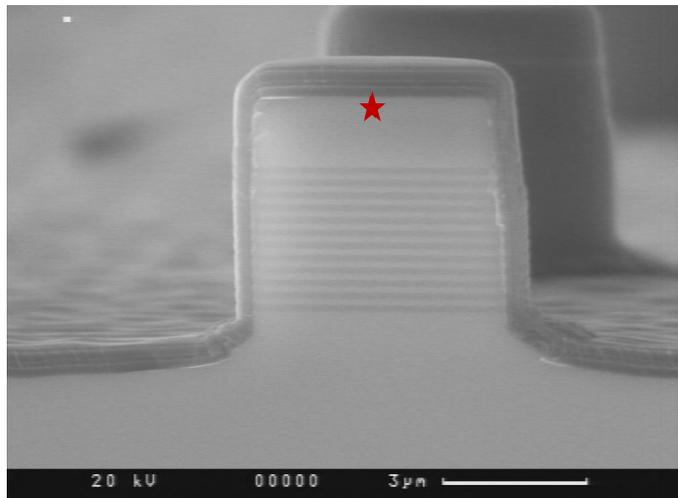
❑ Контроль «кулоновской
блокады»

Яркость: 35-40%

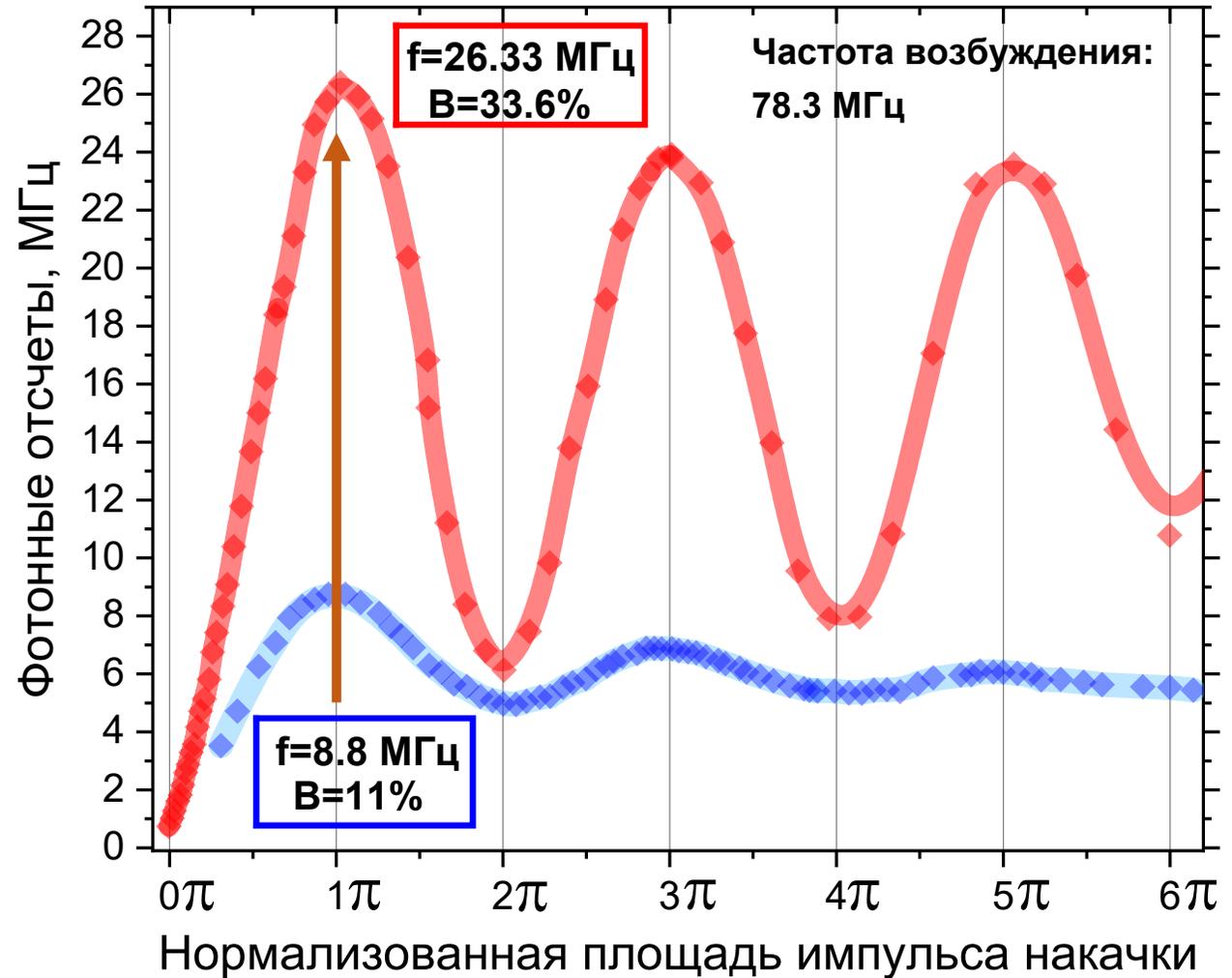
InAs/GaAs QD: 920 нм

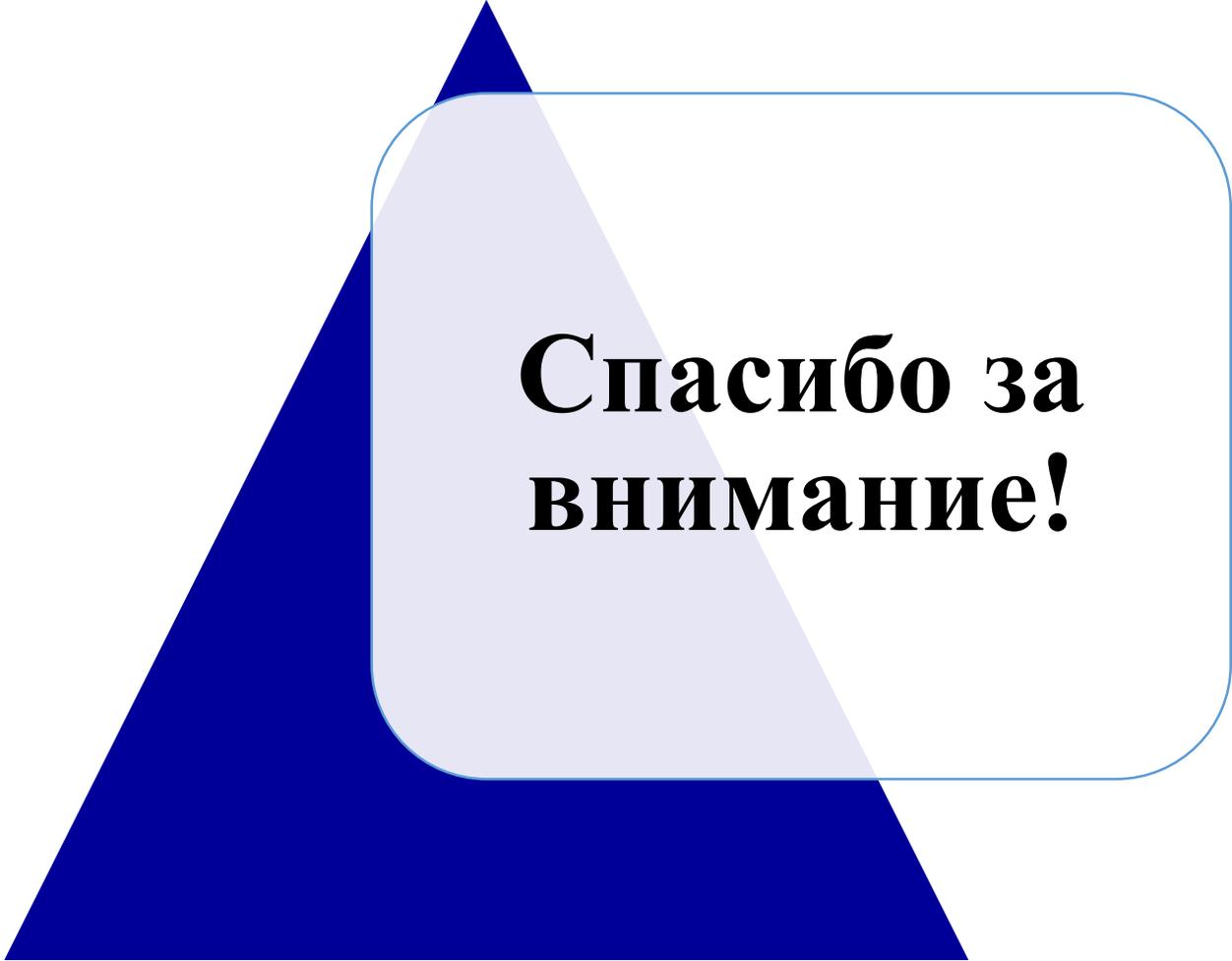


InAs/InGaAs QD: 1554 нм



Резонансное когерентное возбуждение





**Спасибо за
внимание!**