



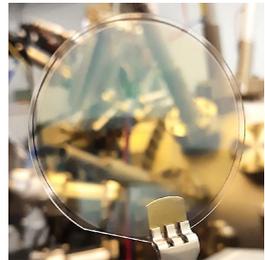
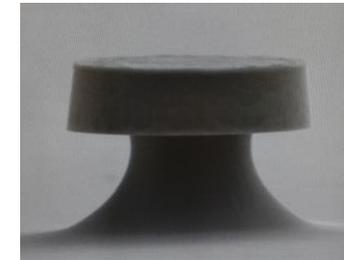
**МИКРОВОЛНОВАЯ ФОТОНИКА**

**ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

Москва, Сколково, 6-7 ноября 2024

***Планарные слои GaP на сапфире для создания оптических  
наноантенн и фотонных интегральных схем с малыми  
оптическими потерями***

*И.С. Мухин, В.В. Федоров, А.М. Можаров,  
Р.Р. Резник, Цырлин Г.Э.*



**Санкт-Петербургский Академический университет РАН им. Ж.И. Алферов  
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербургский Государственный университет**



## ❖ Санкт-Петербургский Академический университет РАН им. Ж.И. Алферова

- Основан Жоресом Ивановичем Алферовым (Нобелевская премия 2000 г.)

СПБАУ РАН - крупный центр по исследованию полупроводниковых нано- и гетероструктур: соединения  $A_3B_5$ , Si, Ge и др. – 6 систем МПЭ; системы плазмохимического осаждения (PECVD) и травления (ICP-RIE)

- **Характеризация** - фотолюминесценция (видимое излучение...ближний ИК) / спектроскопия комбинационного рассеяния // атомно-силовая микроскопия (AFM) // сканирующая электронная микроскопия (SEM) // рентгеновская дифрактометрия (XRD) // спектроскопия глубоких уровней (DLTS)
- **Изготовление приборных устройств** – лазерная и контактная литографии // осаждение и распыление // мокрое и сухое химическое травление
- **Численное моделирование** – Электрофизика - Silvaco // Оптическое и тепловое моделирование - Comsol // электронная и кристаллическая структура и т.д. – ab initio расчеты в рамках теории функционала плотности (DFT)



Лазерные гетероструктуры, светодиоды, солнечные элементы, фотодетекторы, транзисторные структуры, фотонные схемы – оптоэлектроника.

**Нанобиотехнологии**

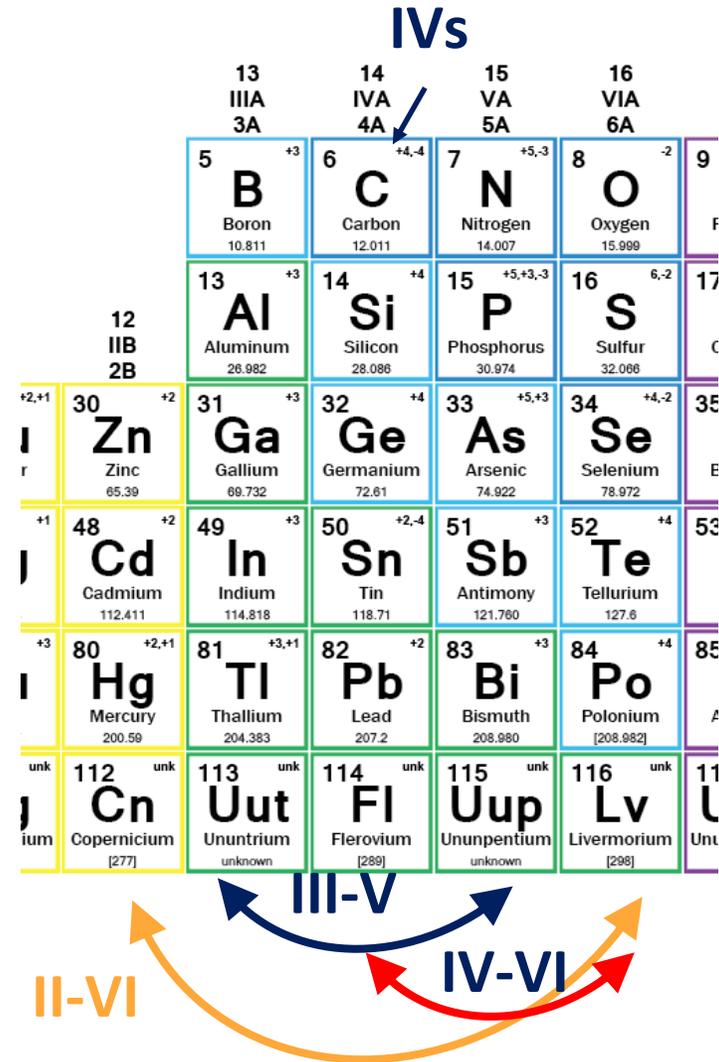
# Полупроводниковые гетероструктуры

## Полупроводниковые материалы

- II-VI – HgTe (1.6 эВ)
- III-V – GaAs (1.4 эВ)
- IV-VI – PbTe (0.32 эВ)
- II-IV-V<sub>2</sub> – ZnSiP<sub>2</sub> (2.1 эВ)

## Эпитаксиальный синтез полупроводниковых материалов

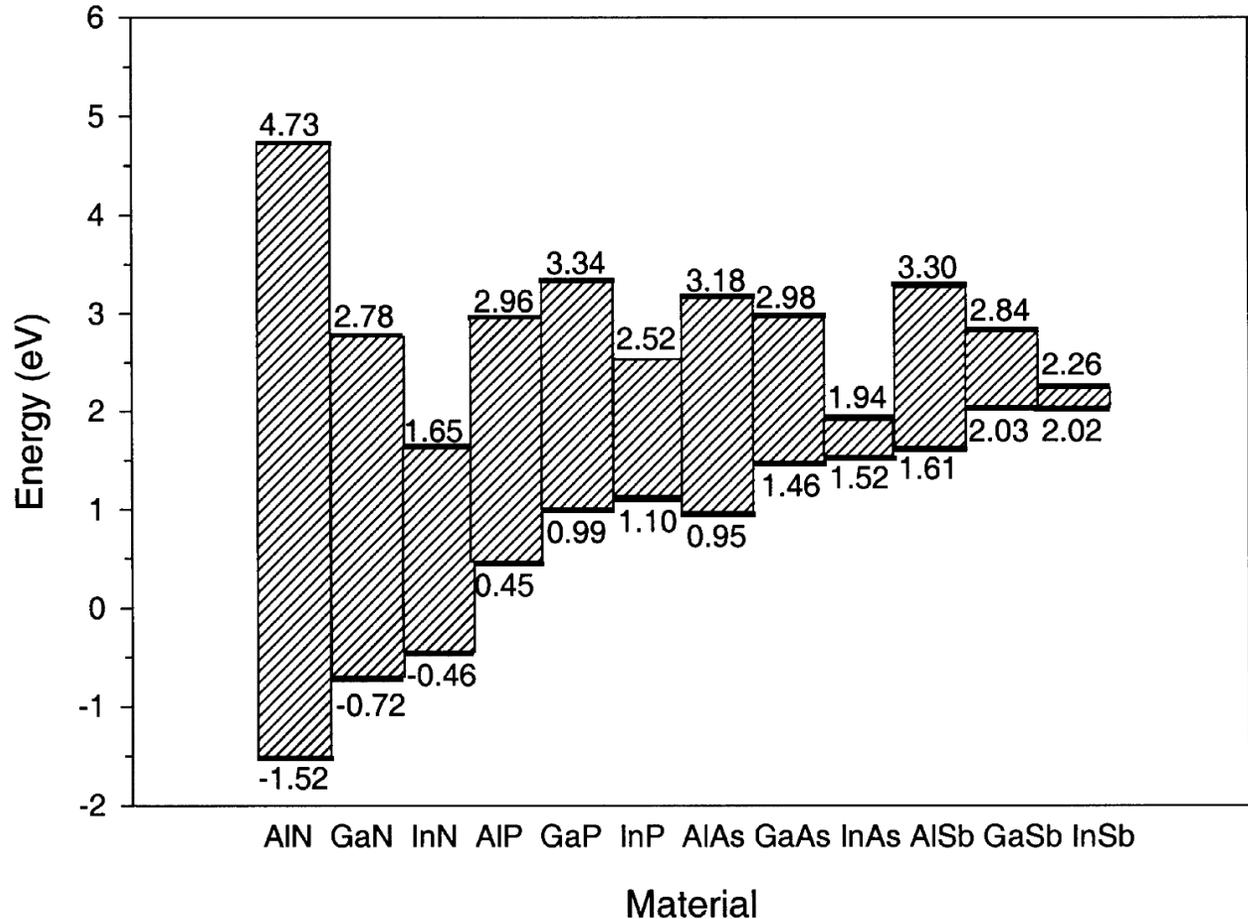
- Синтез метастабильных составов в твердых растворах
- Управление энергетическими зонами
- Ограничение носителей зарядов, оптическое ограничение



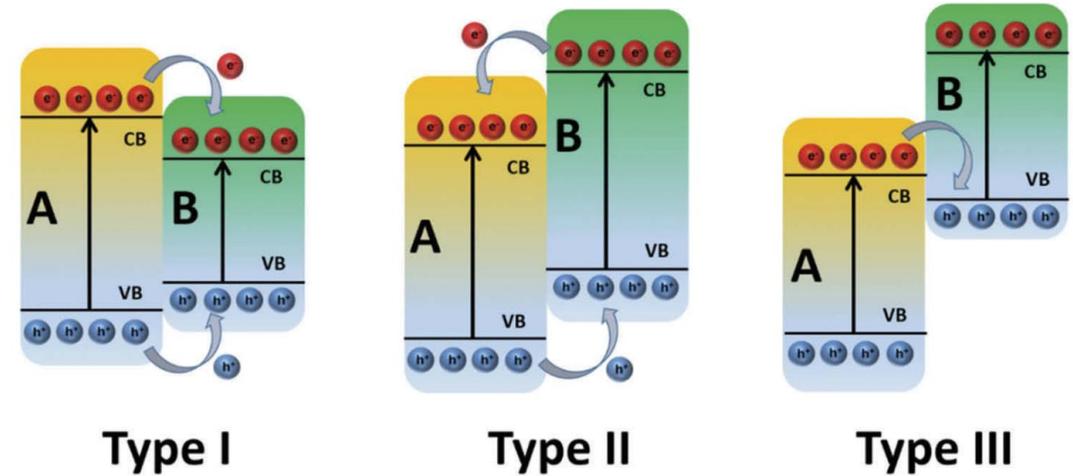
II-IV-V<sub>2</sub>

## Согласование энергетических зон

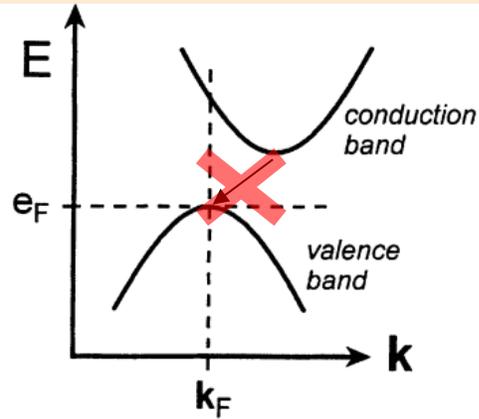
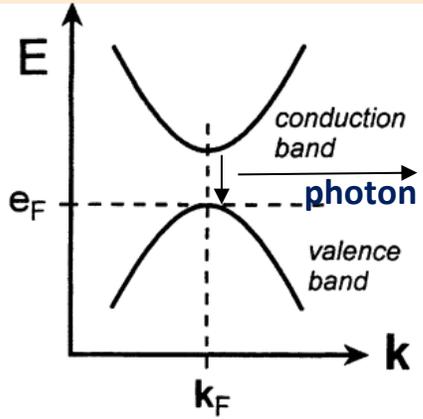
III-V compounds



## Типы гетеропереходов



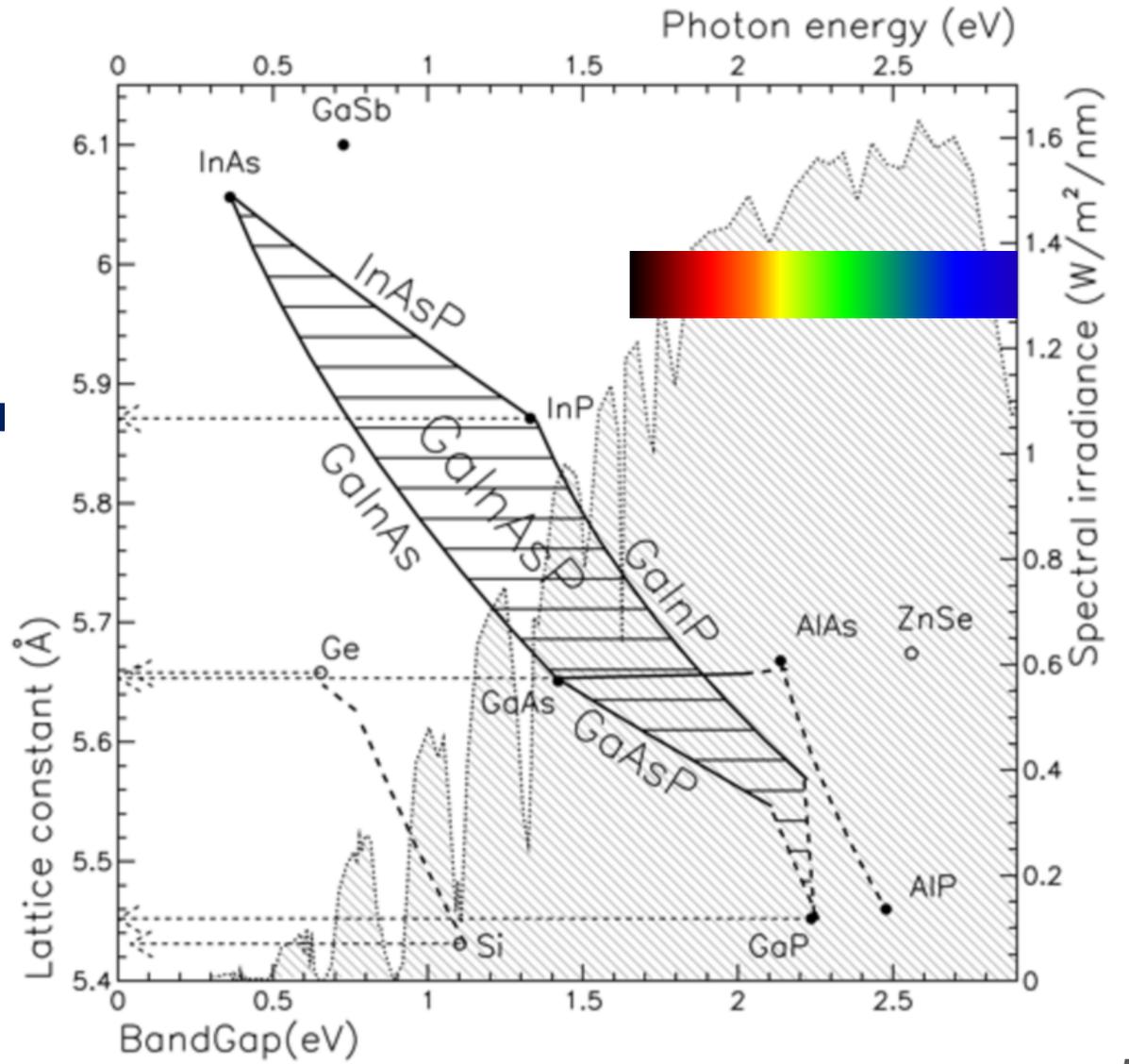
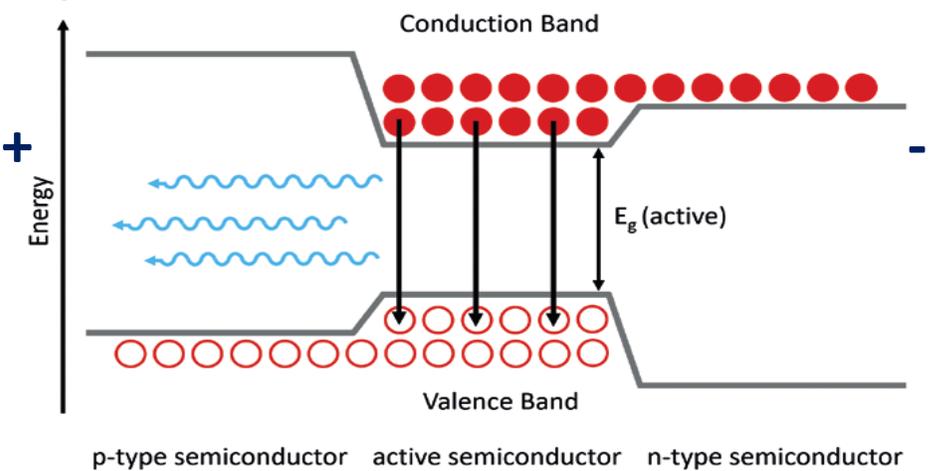
# Ограничение носителей зарядов и оптическое ограничение

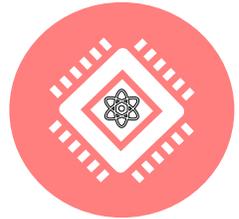


**Прямозонный п/п**  
GaAs / InP / InAs / GaN

**Непрямозонный п/п**  
Si / Ge / GaP / AlAs

**p-GaAlAs:Si   GaAs   n-GaAlAs:Be**





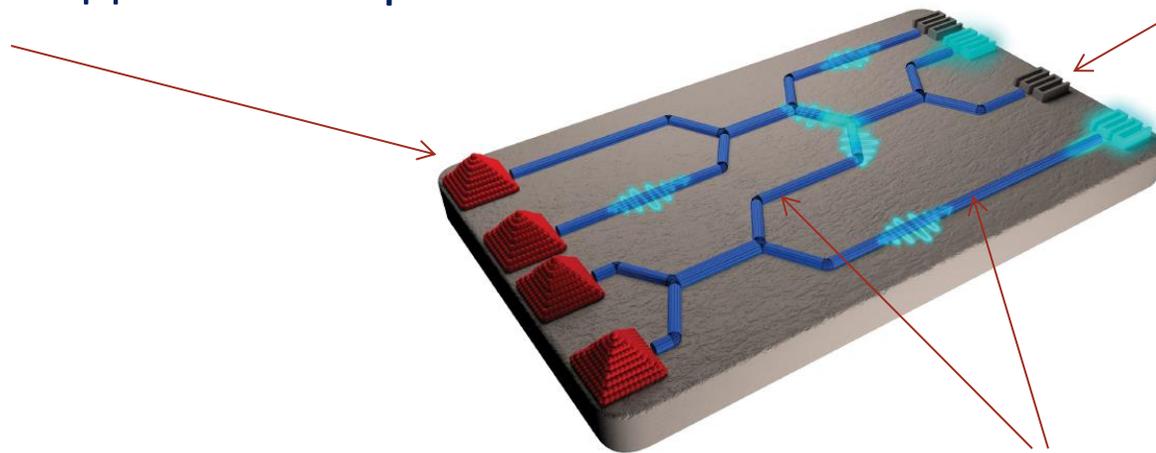
**Интегральная фотонная схема** – on-chip оптическая схема, обеспечивающая генерацию, передачу и детектирование одиночных фотонов.



(II) Интегрированный источник одиночных фотонов

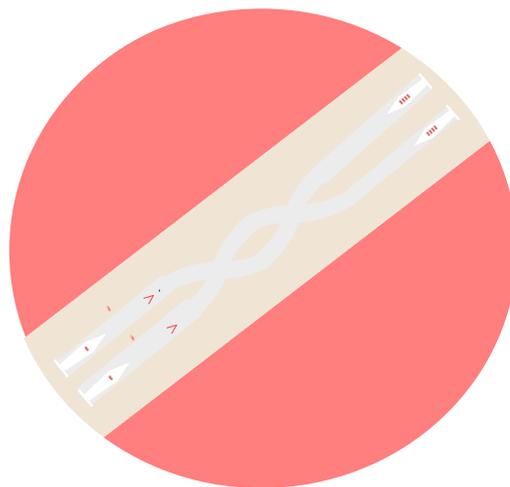


(III) Интегрированный детектор одиночных фотонов



(I) Планарные волноводы и схемы

# (I) Оптические волноводы на основе эпитаксиальных планарных слоев АЗВ5



- **A3B5 широко применяются в области оптоэлектроники**
- **Высокое значение показателя преломления – материальная платформа для создания волноводов**
- **Кристаллическая структура цинковой обманки**
  - **Отсутствие центра симметрии – нелинейные свойства четных порядков**
  - **Фазовое согласование двойного лучепреломления невозможно**
  - **Фазовое согласование за счет перекрытия мод ( $\omega_0, 2\omega_0$ ) в резонансных наноструктурах**

□ **Оптические резонансные A3B5 наногетероструктуры – от электроники к фотонным интегральным схемам**



Material	$d_{ijk}^{(2\omega)}$ [pm/V] at 1.064 $\mu\text{m}$	Transparency Range [ $\mu\text{m}$ ]	Refractive Index at 1.5 $\mu\text{m}$	Thermal Conductivity [W/mK]	Birefringent
GaP	70	0.5 - 11	3.1	110	No
GaAs	170	0.9 - 17	3.4	50	No
GaInP	110	> 0.68	3.1	5.3	No
Si	0	1.1 - 5	3.5	150	No
LiNbO <sub>3</sub>	25	0.4 - 4.5	2.2	5	Yes
KTP	17	0.35 - 4.5	1.7	13	Yes

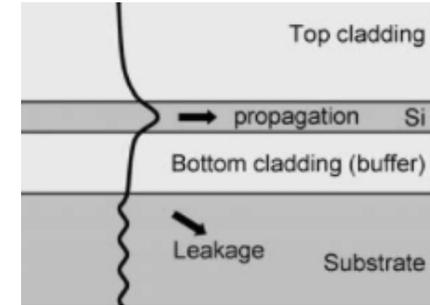
De Luca, E. Thesis (KTH Royal Institute of Technology, 2019)  
 “Nonlinear Properties of III-V Semiconductor Nanowaveguides”

# Si и A3B5 полупроводники в нанофотонике



Планарные слои A3B5 обычно выращиваются на высокоиндексных A3B5 (GaAs, InP), Si или Ge подложках.

**Оптические потери, связанные с утечкой волноводной моды в подложку**



- **Перенос эпитаксиальных слоев**

- Эпитаксиальный lift off + сращивание подложек – высокая стоимость
- Кремний на изолятора (КНИ, SOI) – двухфотонное поглощение в Si

- **Эпитаксиальный рост на оптически контрастных слоях**

- AlGaAs-on-Oxide – оксидирование жертвенного слоя в AlGaAs/AlAs/GaAs гетероструктурах
- Распределенные брэгговские зеркала (DBR) – ограниченный диапазон оптических частот

- **Прямой рост на оптически контрастных подложках**

- III-N на  $Al_2O_3$  – низкая нелинейность
- Неэпитаксиальный рост (осаждение, магнетронное распыление) – низкое оптическое качество
- Проблема рассогласования и асимметрия решеток – может быть решена

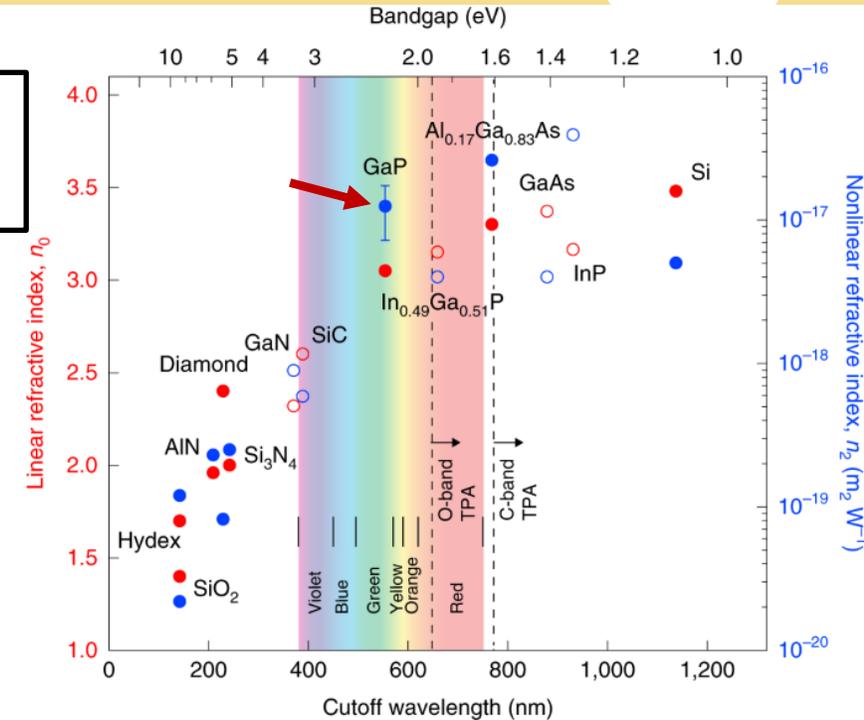
# Фосфид галлия как материал нанофотоники



## GaP

- **Непрямозонная структура**
  - окно прозрачности: 0.5– 11 мкм
  - низкое двухфотонное поглощение в телекоммуникационном диапазоне
- Высокая нелинейность:  $\chi^{(2)}=71$  пм/В @ 1μм
- Высокий показатель преломления:  $n=3.18$  @ 1мкм
- Теплопроводность:  $\approx 1$  Вт/(см·К)
- Переход к прямозонной структуре в **GaPN** растворах при добавлении азота > 0.3-0.4%, красноволновый сдвиг  $E_g$ : 100 мэВ/%

$$\text{высокий } \frac{\chi^{(2)}}{\alpha}$$



D. J. Wilson et. al. *Nature Photonics* 14, 57–62 (2020)

Слои GaP могут быть выращены на Si или GaAs подложках (применение для задач фотоники с помощью эпитаксиального переноса), однако...

GaP можно эпитаксиально выращивать на оптически прозрачных слоях/подложках.

- **1969** – Alfred Cho, МПЭ на **CaF<sub>2</sub>** (согласованная кристаллическая решетка с Si)
- **1969** - Н.М. Manasevit, МОГФЭ на **MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>** (согласование решеток 2 к 1) и **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

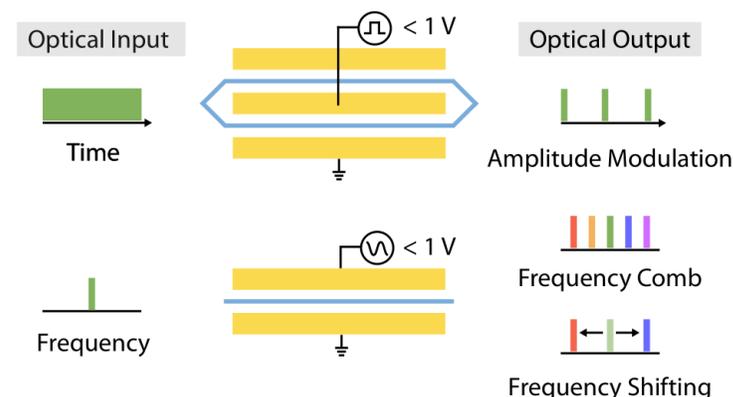


- Не нулевые элементы электрооптического тензора  
 $r_{41} = r_{52} = r_{63}$
- Для 632.8 нм -  $n^3 r_{41} = 36.3 \cdot 10^{-10}$  см/В (выше KDP, но ниже LNO)
- На основе фосфида галлия могут быть созданы быстрые электрооптические модуляторы.
- GaP не получил широкого применения из-за высокой проводимости объемных кристаллов
- Можно ожидать значительно более низких потерь в сравнении с модуляторами в планарном исполнении на основе GaAs
- Пьезоэлектрические свойства ( $e_{14} = -0.1$  С · м<sup>-2</sup>), оптомеханические устройства

$$\Delta \left[ \frac{1}{n^2} \right] = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{vmatrix}$$

## Gallium phosphide electrooptic light modulator

G. F. Glinskii, A. N. Pikhtin, and D. A. Yas'kov  
 (Submitted December 24, 1971; resubmitted January 17, 1973)  
 Kvantovaya Elektron. (Moscow), No. 2(14), 116-118 (1973)



PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 163602 (2019)

### Gallium Phosphide as a Piezoelectric Platform for Quantum Optomechanics

Robert Stockill,<sup>1,\*</sup> Moritz Forsch,<sup>1,\*</sup> Grégoire Beaudoin,<sup>2</sup> Konstantinos Pantzas,<sup>2</sup>  
 Isabelle Sagnes<sup>2</sup>, Rémy Braive,<sup>2,3</sup> and Simon Gröblacher<sup>1,†</sup>

Article | [Open access](#) | Published: 19 April 2022

### Microwave-to-optical conversion with a gallium phosphide photonic crystal cavity

[Simon Hönig](#), [Youri Popoff](#), [Daniele Caimi](#), [Alberto Beccari](#), [Tobias J. Kippenberg](#) & [Paul Seidler](#)

[Nature Communications](#) 13, Article number: 2065 (2022) | [Cite this article](#)

## The Use of Metal-Organics in the Preparation of Semiconductor Materials

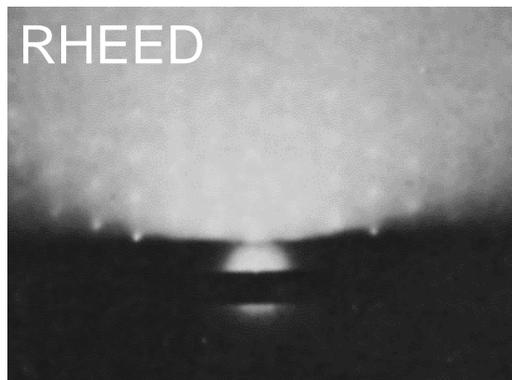
### I. Epitaxial Gallium-V Compounds

H. M. Manasevit and W. I. Simpson

Autonetics Division of North American Rockwell Corporation, Anaheim, California

#### ABSTRACT

Single-crystal GaAs, GaP, GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> and GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> films have been grown on GaAs and a number of insulating substrates by the decomposition of alkyl-gallium compounds in the presence of arsine, phosphine, arsine-phosphine, and arsine-stibine mixtures. Both triethylgallium and trimethylgallium have been used successfully in the preparation of GaAs. This process makes compound semiconductor film growth compatible with methods used for the growth of elemental semiconductors and eliminates many of the difficulties inherent in multitemperature-zone processes.



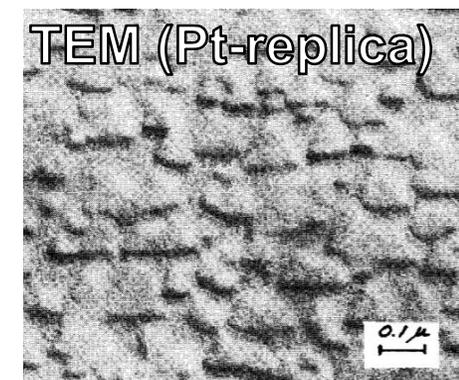
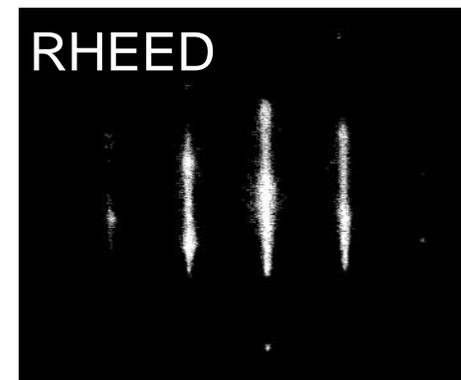
## Epitaxial Growth of Gallium Phosphide on Cleaved and Polished (111) Calcium Fluoride

A. Y. CHO

Bell Telephone Laboratories, Incorporated, Murray Hill, New Jersey 07974

(Received 29 August 1969)

The mechanism of growth of GaP on a cleaved CaF<sub>2</sub> (111) surface was studied *in situ* in a high-energy reflection electron diffraction system. It was found that in the early stages of growth, GaP forms tetrahedral nuclei with {111} faces. The three edges of the tetrahedron are parallel to the three <110> directions. These microcrystals coalesce and form a smooth film after a mean thickness of more than 300 monolayers of GaP is deposited on the surface. Temperatures for epitaxial growth of a single crystal without twinning as a function of the atom arrival rate were studied for GaP on a clean CaF<sub>2</sub> surface and on a GaP-covered CaF<sub>2</sub> surface. It was found that growing GaP without twinning on a bare cleaved CaF<sub>2</sub> surface requires a temperature ~65°C higher than on a surface that is covered with GaP. The structural characteristics of the GaP film as a function of the substrate temperature are also discussed.



- Высокая шероховатость, при этом эпитаксиальная ориентация слоев

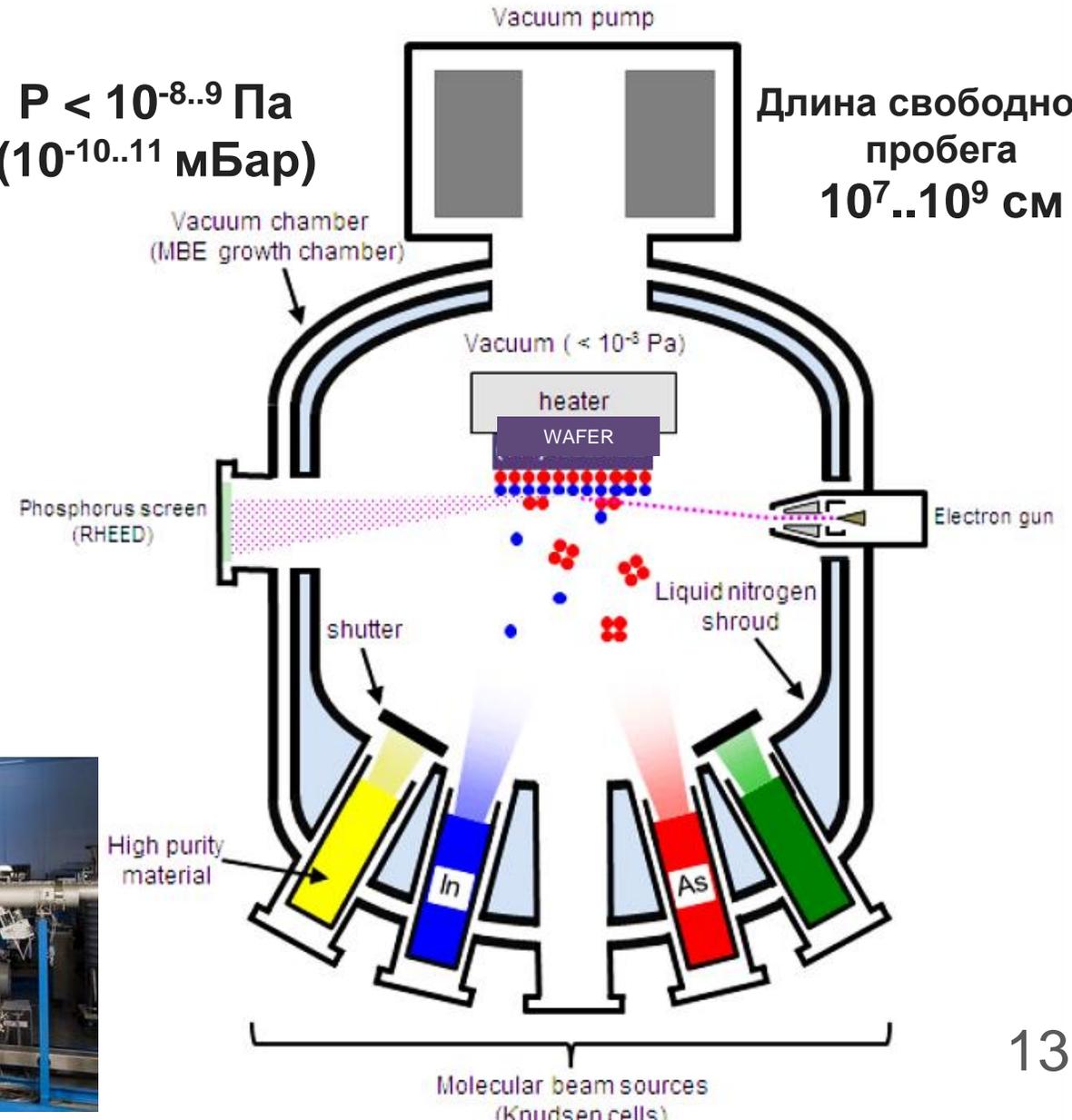
# Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ)

1968 - John Arthur / Alfred Y. Cho (Bell labs.)

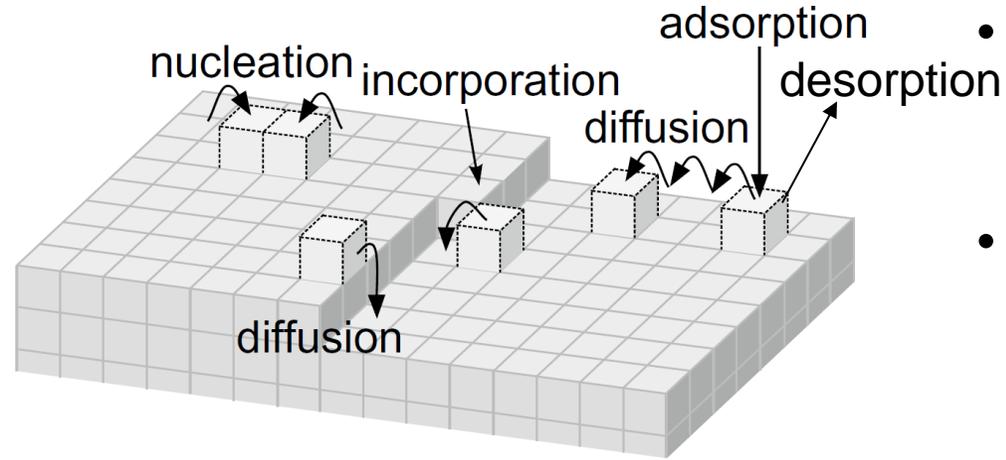
- Рост материала из молекулярных пучков в условиях сверхвысокого вакуума
- Применение пучков позволяет достигать резких гетерограниц и ультратонких слоев (доли монослоя)
- Рост определяется кинетикой адатомов
- Особочистые материалы
- Однородность зависит от геометрии камеры

$P < 10^{-8..9}$  Па  
( $10^{-10..11}$  мБар)

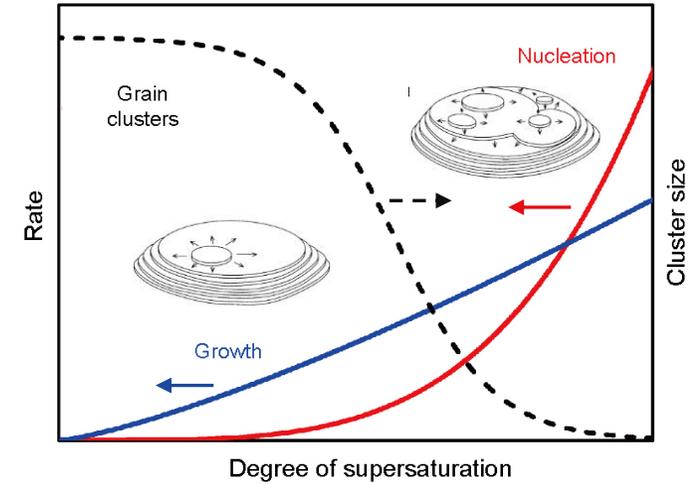
Длина свободного пробега  
 $10^7..10^9$  см



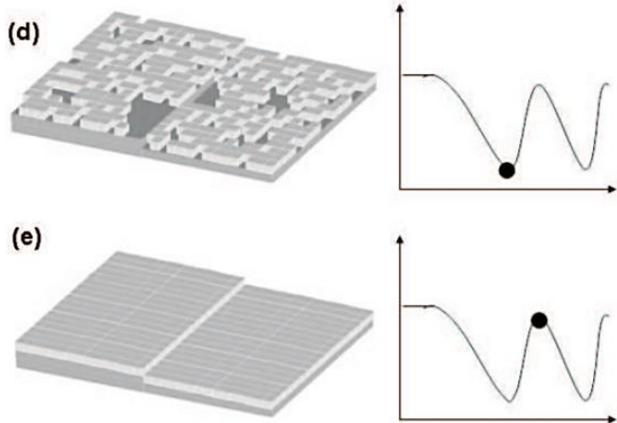
# Эпитаксиальный рост



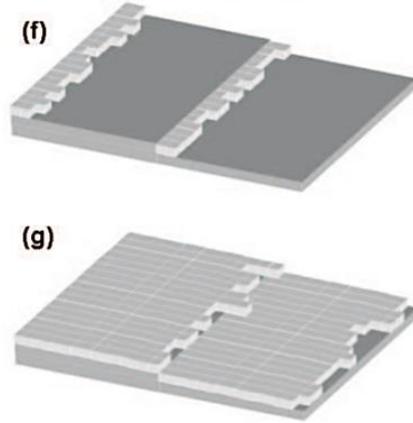
- Температура подложки -  $T_{\text{growth}}$  определяет диффузионную длину адатомов
- Перенасыщение -  $n/n_{eq}(T_{\text{growth}}, \text{ скорость роста})$  определяет процесс нуклеации



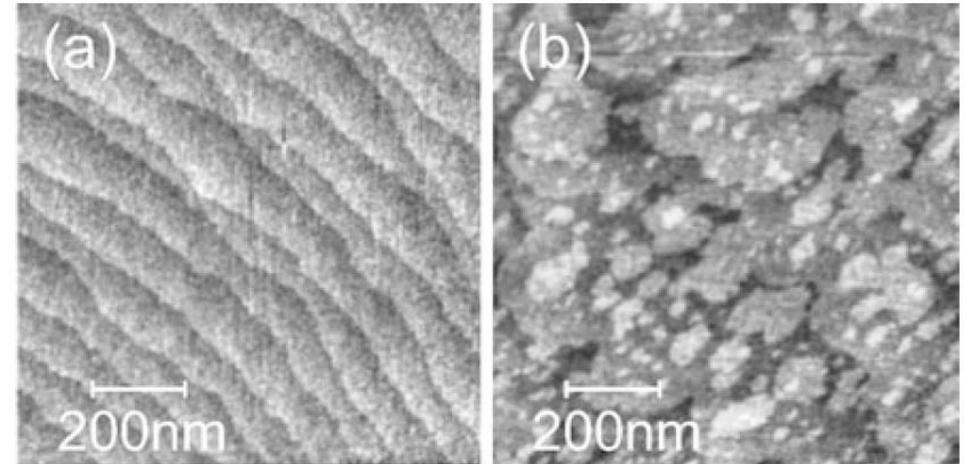
## • Послойный рост



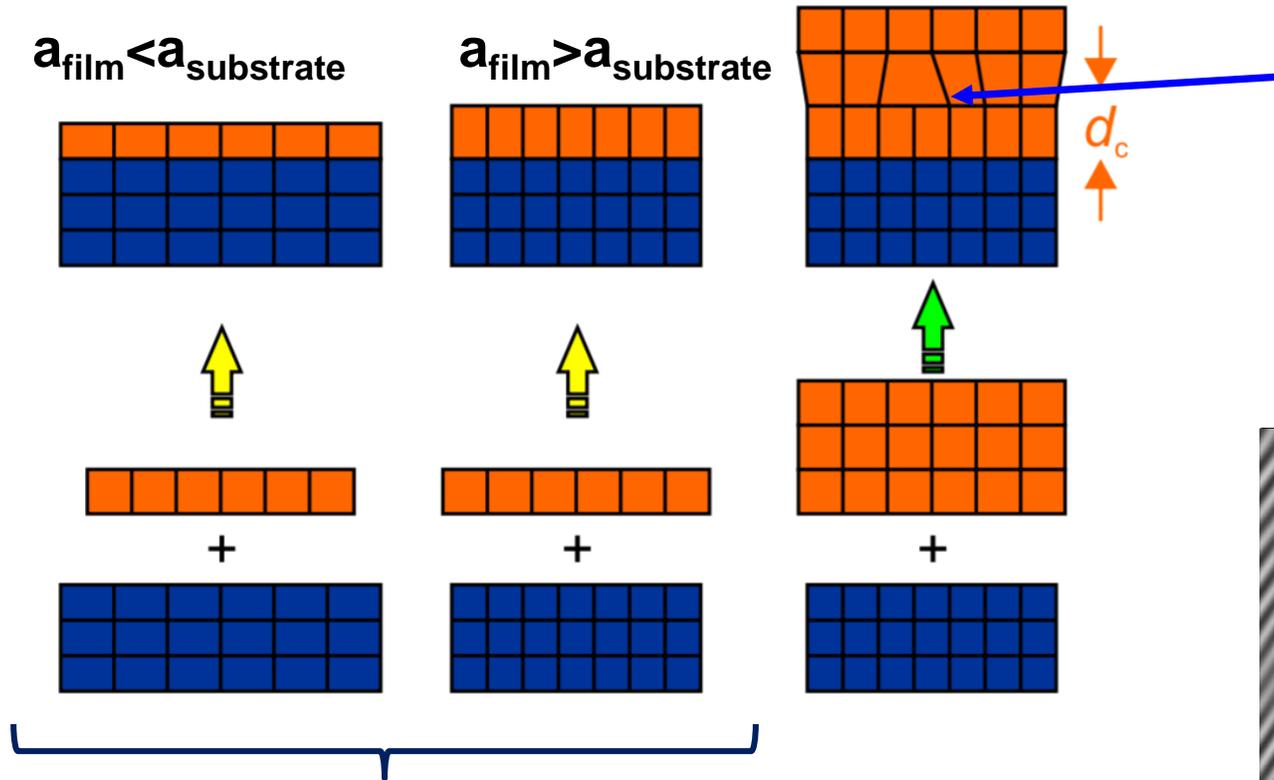
## • Рост через моноатомные ступени



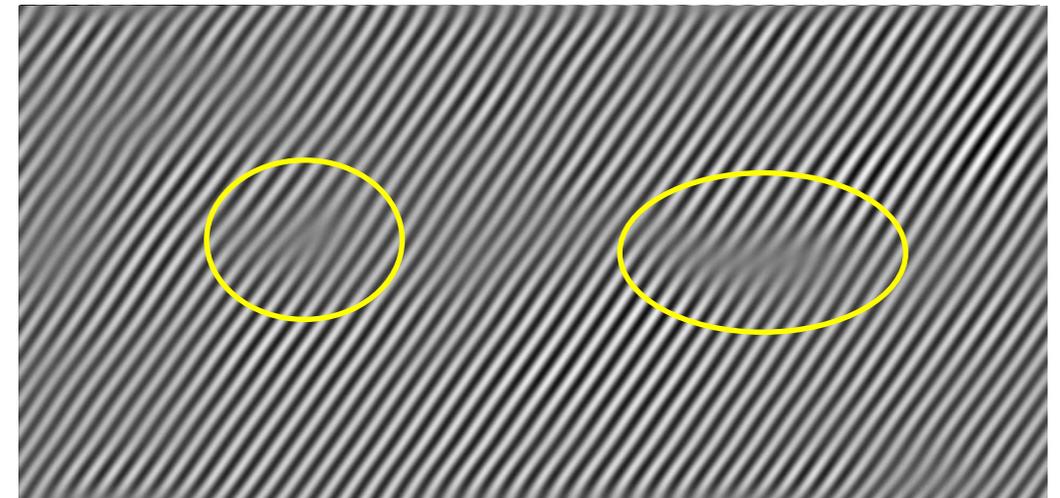
Гомоэпитаксия GaAs, АСМ изображения:  
570 °C                      530 °C



# Lattice stress in heteroepitaxy



- Stress relaxation via defect formation (*threading dislocations*)
- Threading dislocations can act as a recombination center

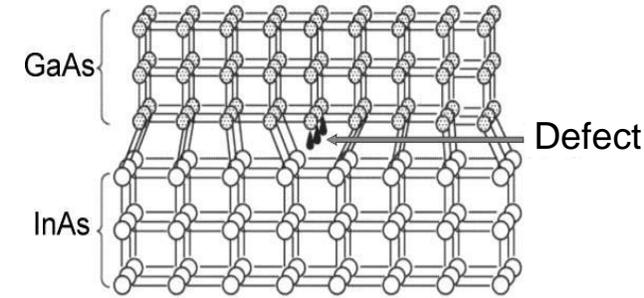


Cross-sectional view on the GaAs/Si heterointerface  
Transmission-Electron Microscopy

- If  $a_{\text{film}} = a_{\text{substrate}}$  – isoperiodic growth
- Otherwise pseudomorphic growth
- Film is uniformly stressed
- Stress is accumulated till critical thickness  $d_c$  is reached ( $d_c$  can be less than 1 ML)

## Heteroepitaxy problems:

- **Lattice matching**
- **Surface energy** mismatch → non-wetting; island growth; faceting
  - $\gamma_{\text{substrate surface}} \gg \gamma_{\text{heterointerface}} + \gamma_{\text{film surface}}$
- **Chemical stability** of heterointerface  
*interdiffusion*
- **Mismatch in crystal symmetries** between substrate and film → antiphase domain formation
- **Difference in thermal expansion** between substrate and film → cracking



*special growth techniques, nucleation or buffer layers are commonly needed*

# Alternative lattice matching in epitaxy

## ➤ **Lattice tilt**

Family of planes with different indexes can be matched

- (111) in plane 30° rotation –  $a_1/a_2 \sim \sqrt{3}/2$
- (001) in plane 45° rotation –  $a_1/a_2 \sim 1/\sqrt{2}$

*ZnO or AlN on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

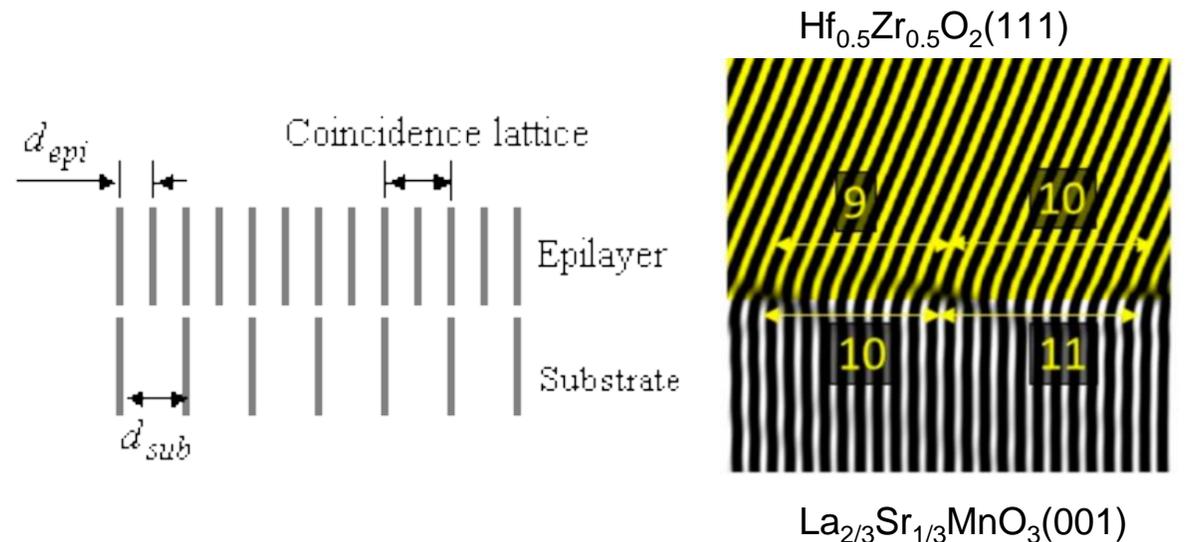
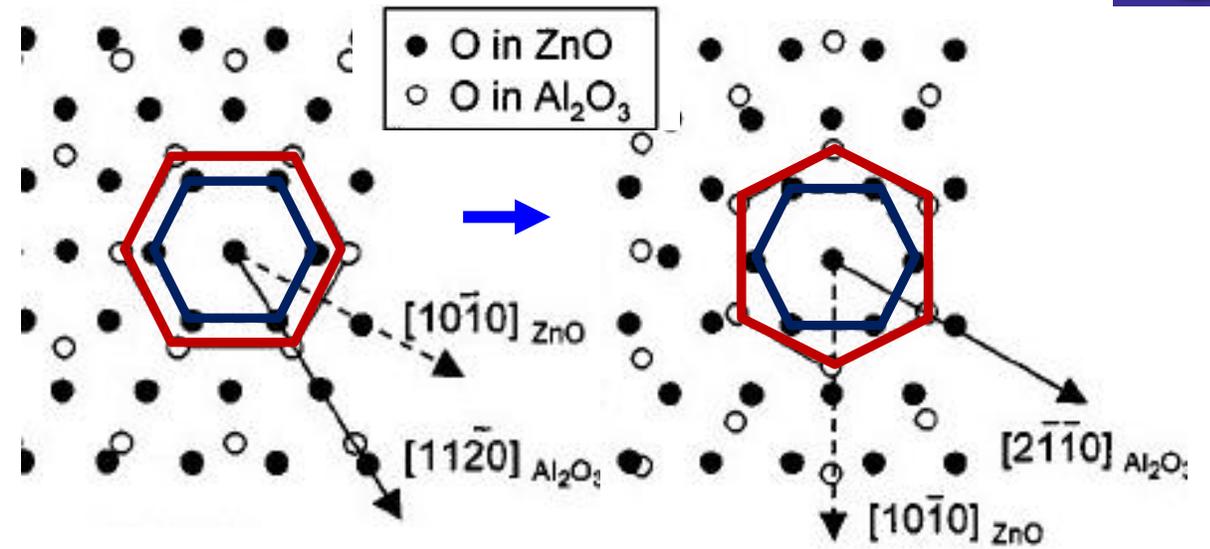
## ➤ **Domain matching epitaxy**

- In-plane lattice parameters of the film and substrate match not 1:1 but in some other ratio of integers such as 5:4 (for 20% mismatch)

*4/3 for MgO ( $a=4.216 \text{ \AA}$ ) or 5/4 for TiN ( $a=4.24 \text{ \AA}$ ) on Si (001) ( $a=5.43 \text{ \AA}$ )*

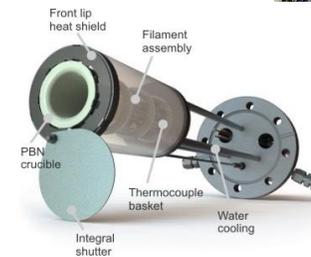
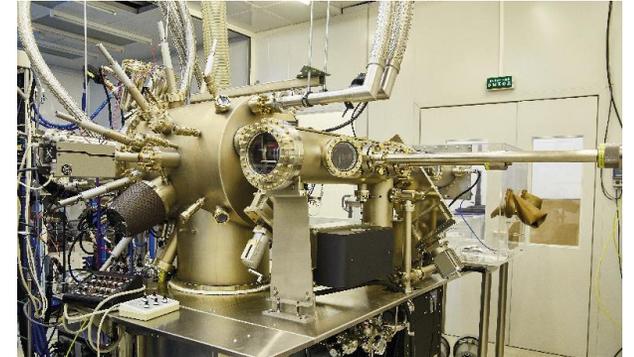
## ➤ **Coherent nucleation is crucial**

- Critical layer thickness should be less than 1 ML
- Layer should “wet” substrate surface (3D)



## Молекулярно-пучковая эпитаксия с плазменной активацией азота

- III-группа, Vi – эффузионные ячейки
- $P_2/As_4$  – крекеры
- Активация азота индуктивно-связанной радиочастотной (13.56 МГц) плазма :  $N_2^*$ ,  $N^*$ ,  $N_2^+$ ,  $N^+$



## Плазмохимическое атомно-слоевое осаждение

- Низкотемпературное (до  $400^\circ C$ ) ионно-стимулированное осаждение диэлектриков и полупроводников - Ga(B)P, a-Si:H,  $SiO_x$ ,  $SiN_x$  и др. с контролируемой стехиометрией.
- Аморфные и микрокристаллические конформные слои

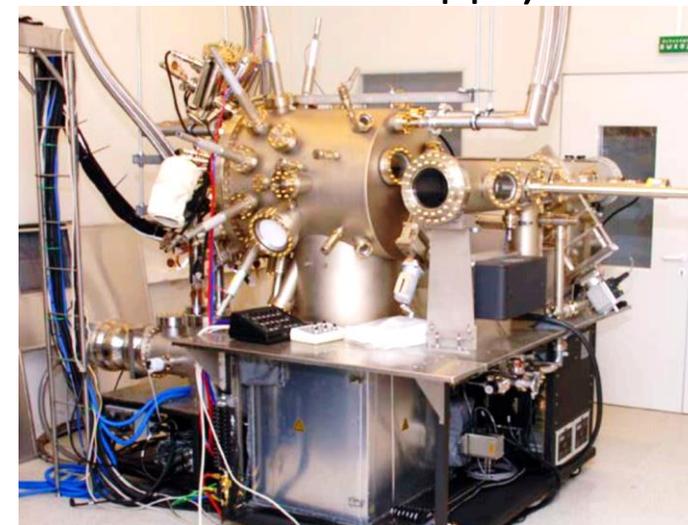


## Подложки:

- $\text{CaF}_2$  – сложность приготовления эпитаксиальной поверхности (скол), только ориентация (111)
- буферные слои  $\text{CaF}_2$  на  $\text{Si}$  – толщина д.б. более 500 нм (утечка оптической моды)
- $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  – не распространены
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) – дешевые и распространенные подложки

## Ростовые техники:

- МПЭ из твердотельных источников:  $\text{Ga} + \text{P}_2$
- Для улучшения кристаллического качества используются такие подходы, как migration-enhanced (МЕЭ) or metal-modulated (ММЕ) эпитаксии
- *In-situ* контроль структурных и морфологических характеристик с помощью дифракции быстрых электронов на отражение (RHEED)



МПЭ + RHEED  
↓  
АСМ+СЭМ  
↓  
XRD  
↓  
Оптическая  
характеризация

# Эпитаксиальный рост GaP

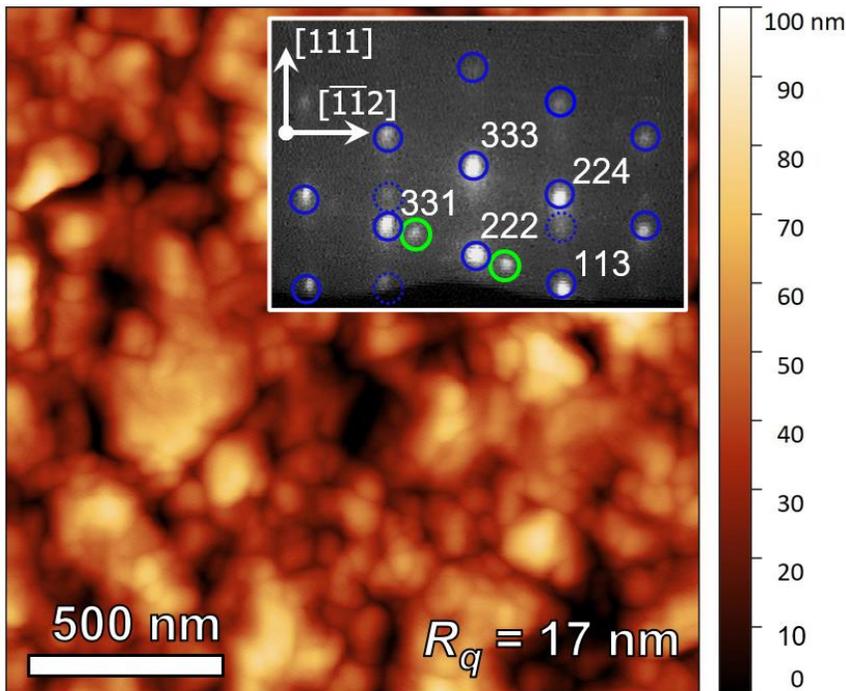


- Рост слоев GaP толщиной 150-200 нм при низких и высоких температурах
- Близкие к стехиометрическим потокам (превышение на 30%)
- Влияние предварительного экспонирования под потоком P

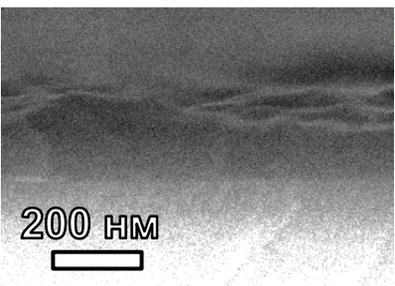
Высокая температура роста:  $T_{gr} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

Низкая температура роста:  $T_{gr} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

АСМ:

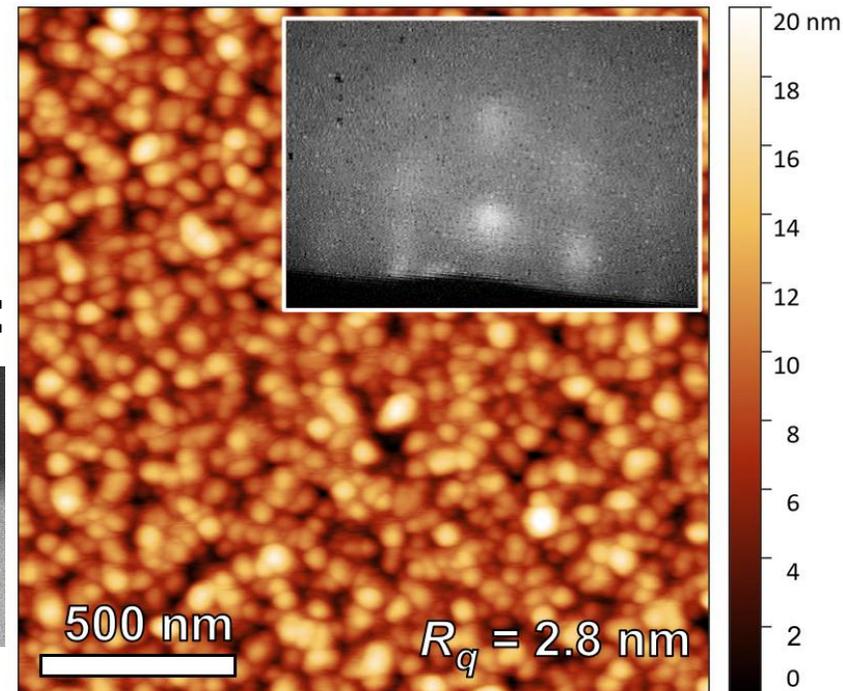


СЭМ (скол):

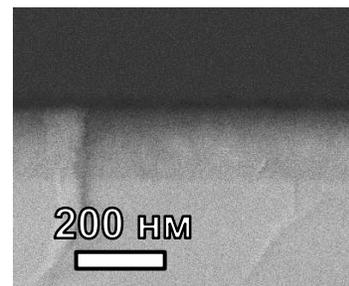


- ✓ **Контрастная RHEED картина**
- **Высокая шероховатость**

АСМ:



СЭМ (скол):



- **Размытая RHEED картина**
- ✓ **Гладкая поверхность**

# Двухстадийный эпитаксиальный рост

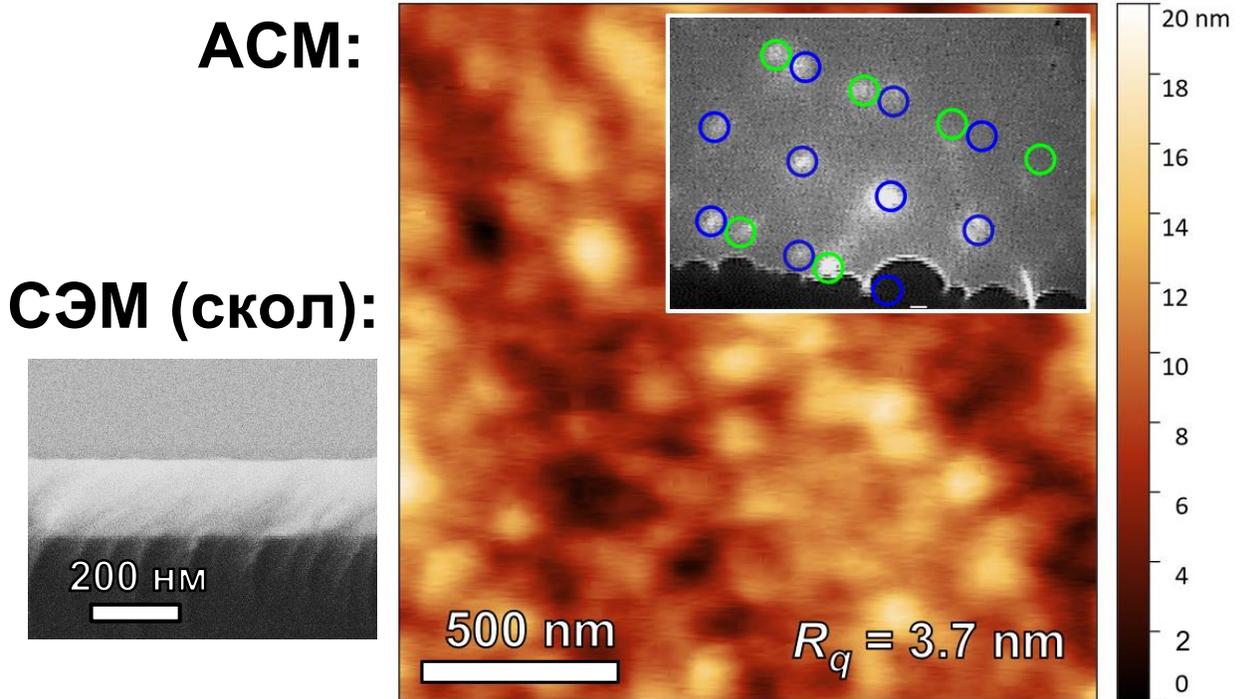
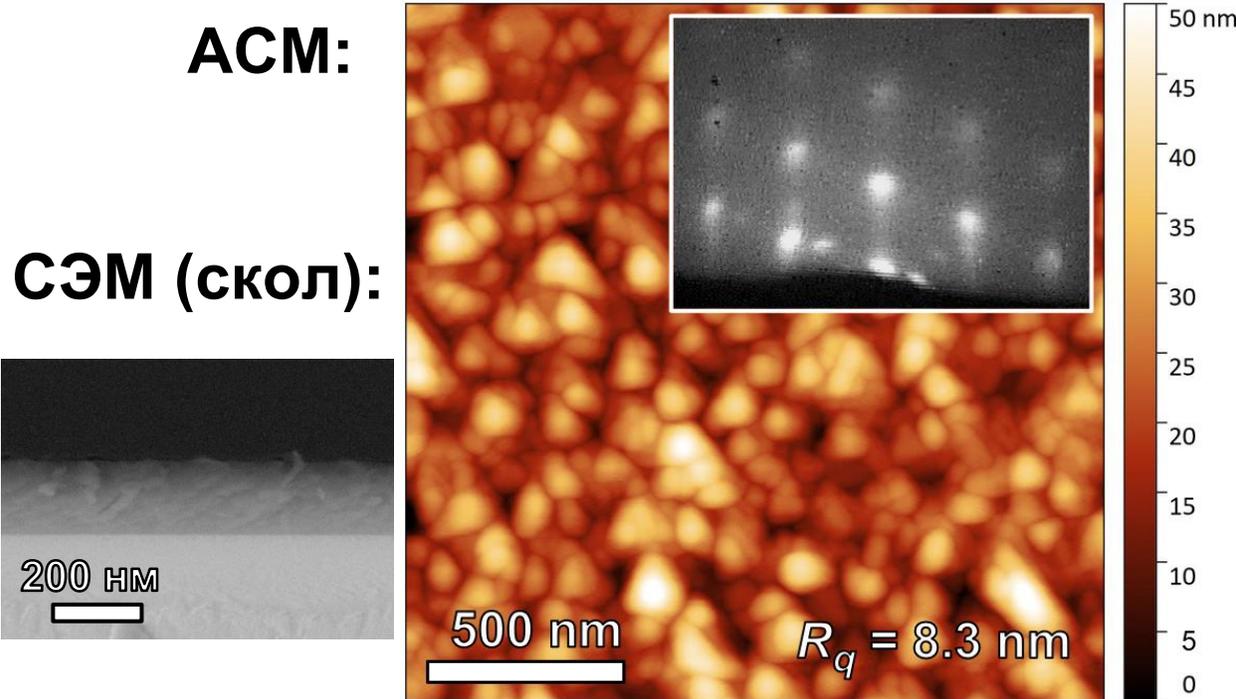
- Низкотемпературный рост затравочного слоя для достижения равномерной нуклеации по аналогии с GaP/Si(001) гетероэпитаксией

## Двухстадийный рост (вариант #А)

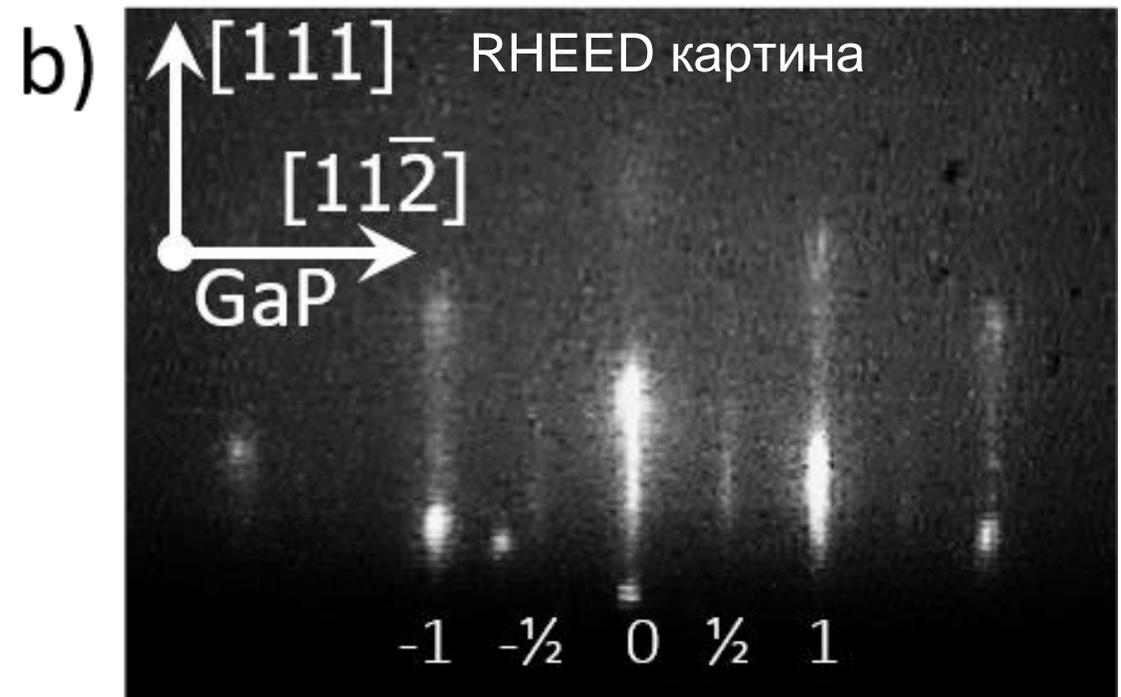
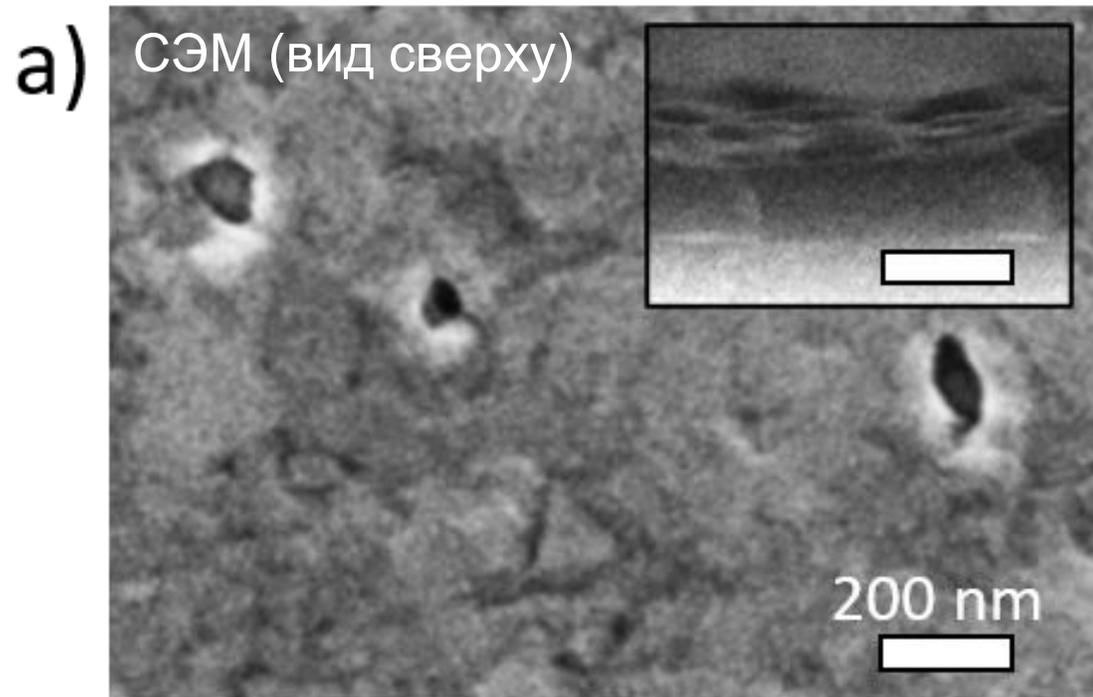
- 3 нм затравочный слой при  $T_{gr} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- Последующий рост при  $T_{gr} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

## Двухстадийный рост (вариант #В)

- 45 нм слой при  $T_{gr} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- Последующий рост при  $T_{gr} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

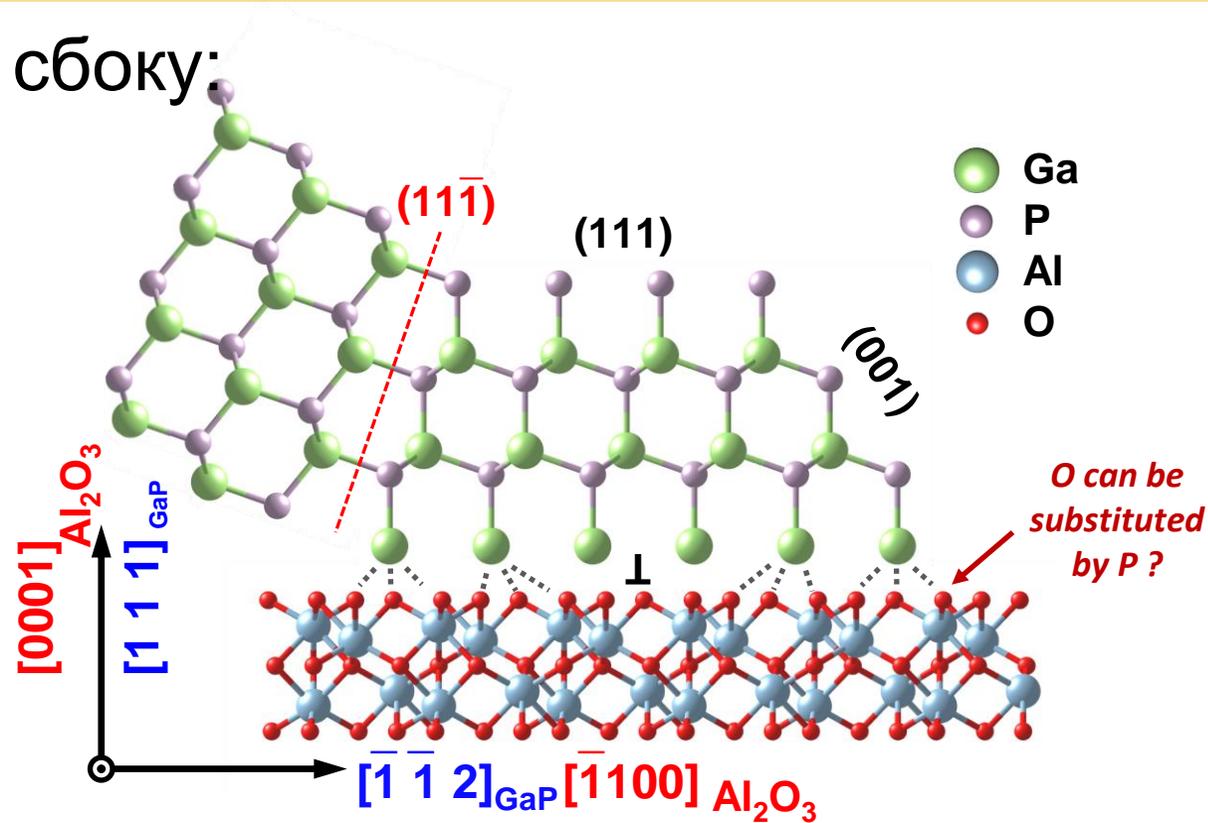


Двухстадийный рост улучшает однородность и кристаллическое качество слоя

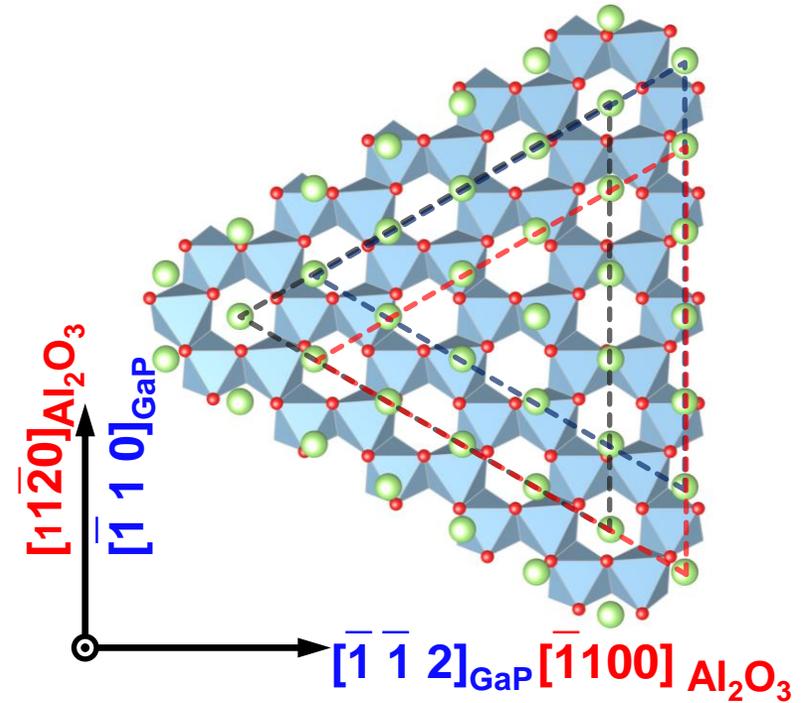


- Высокотемпературный отжиг при  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  (10 мин) в потоке  $\text{P}_2$ : ростовой образец (#А)
- Формирование больших пиков, ухудшающих оптические свойства GaP слоя
- Поверхностная реконструкция (2x2)  
doi: 10.1103/PhysRevB.32.8473.

Вид сбоку:



Вид сверху:

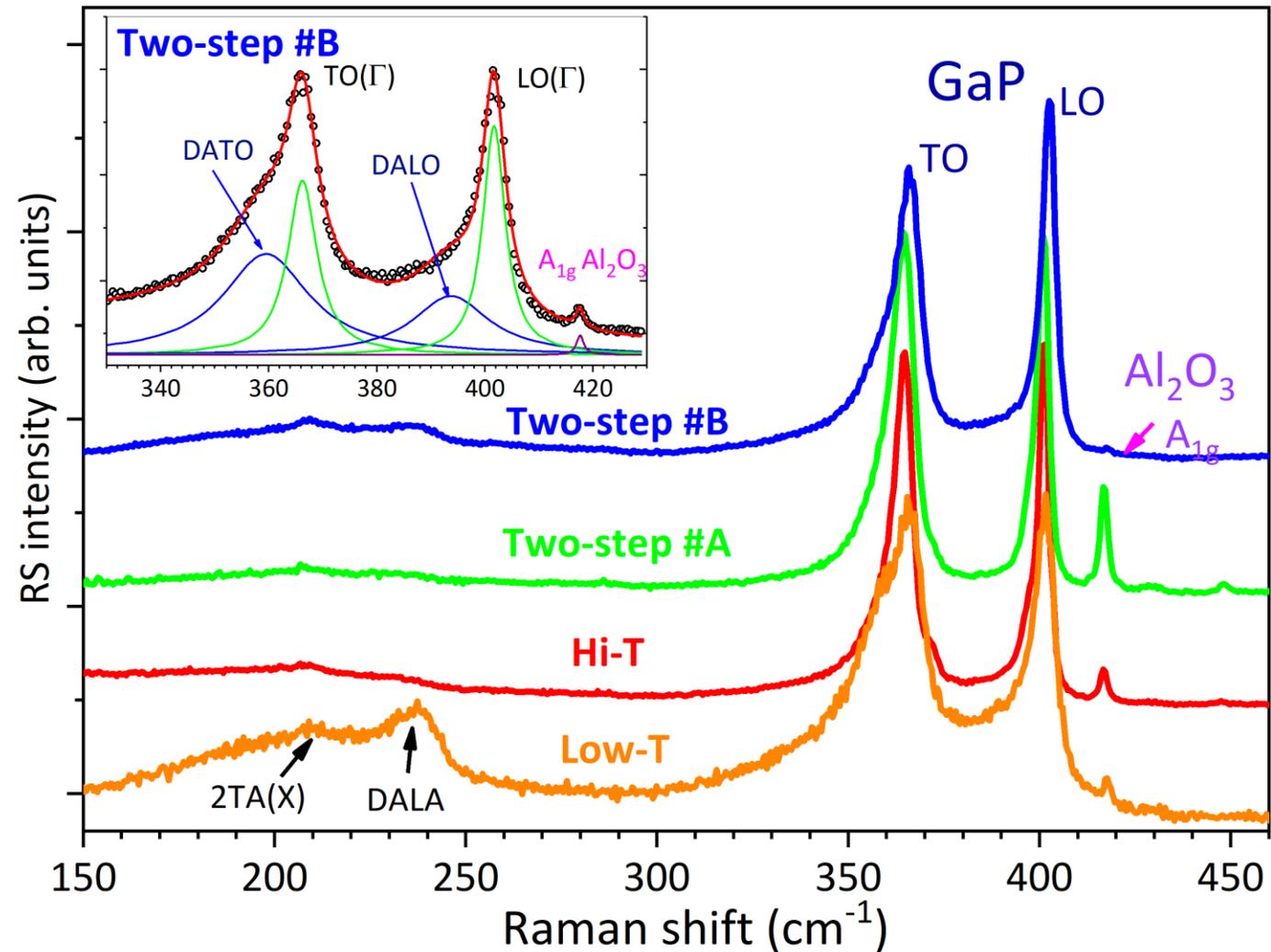


- $\{-1-12\}$  межплоскостное расстояние GaP соответствует межплоскостному расстоянию  $\{-1100\}$   $m$ -плоскостей  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в соотношении  $5/4$  с точностью  $(\Delta a^*/a^*)$  на уровне 1%
- Эпитаксиальное согласование доменов – 5 к 4 для GaP- $\text{Al}_2\text{O}_3$
- Возникновение дислокаций в виду некогерентной нуклеации островков

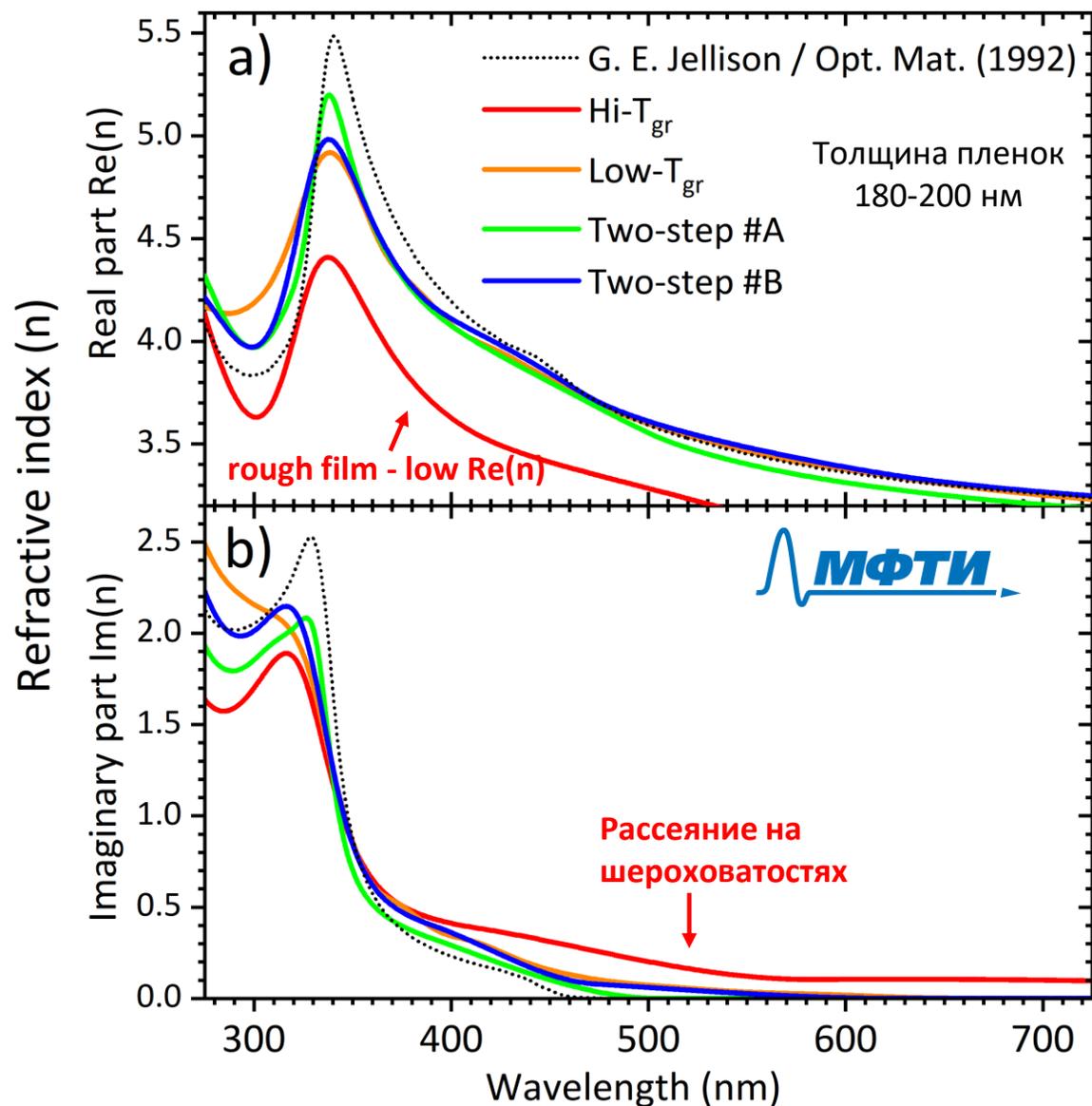
- Ассиметричные и смещенные (в красную область) GaP вибрационные моды – малый размер кристаллитов для низкотемпературных слоев
- Оптические и акустические моды, связанные с нарушением порядка решетки (Disorder-activated DATO, DALO, DATA и DALA)
- КРС спектры, соответствующие объемному GaP для высокотемпературных толстых пленок, выращенных по оптимизированному рецепту

➤ Двухстадийный рост улучшает кристаллическое качество слоев

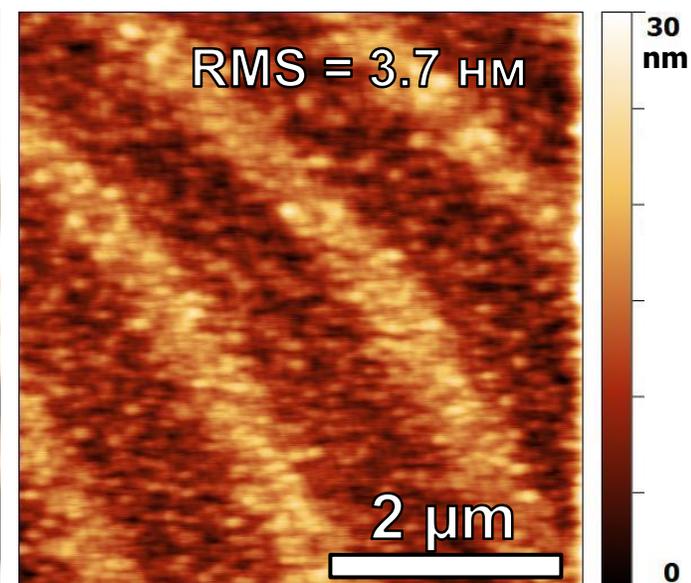
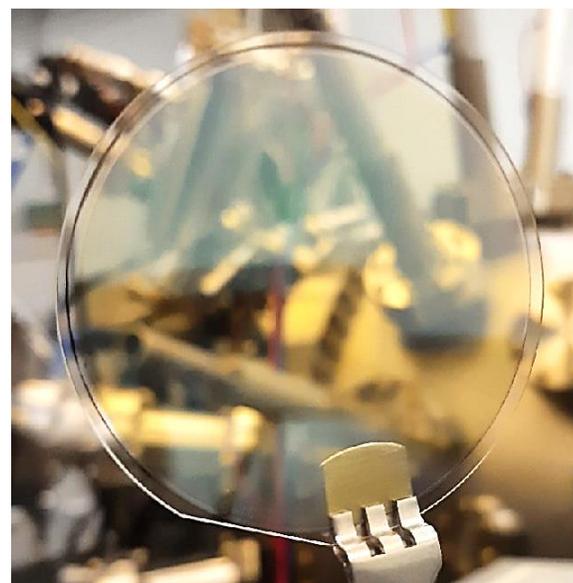
КРС спектры при 300К и возбуждении 532 нм лазера:



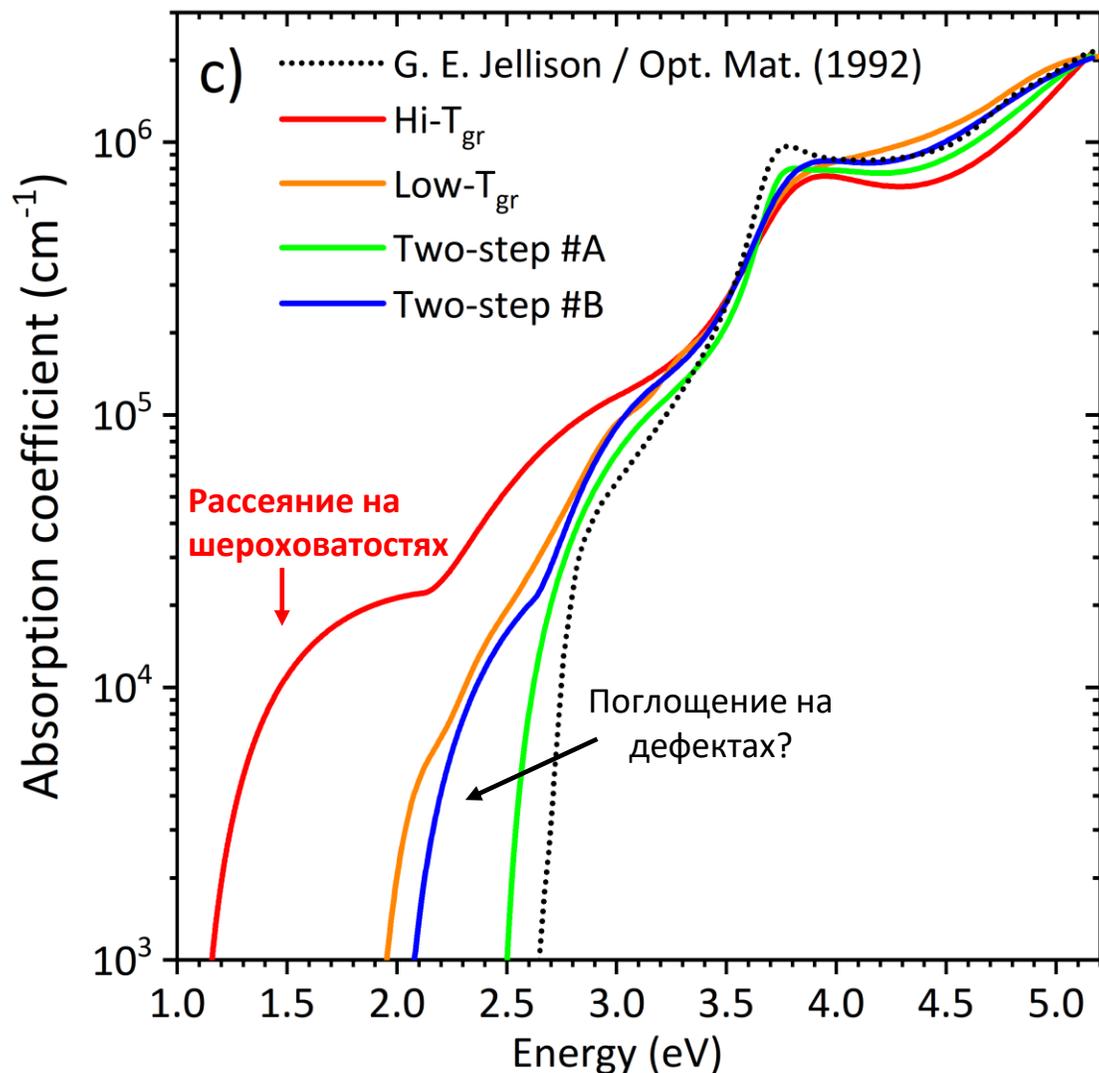
спектральная эллипсометрия с выбором угла – 235..1700 нм



- Потери на рассеяние в шероховатых образцах
- Низкая кристалличность = низкая оптическая плотность
- Оптическая плотность выращенных пленок сопоставима с данным параметром для объемных образцов



спектральная эллипсометрия с выбором угла – 235..1700 нм



- Потери на рассеяние в шероховатых образцах
- Низкая кристалличность = дополнительное поглощение

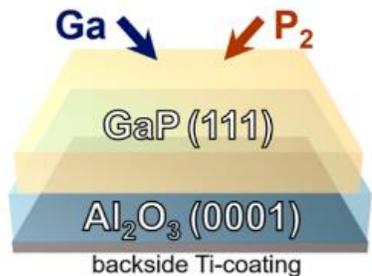
- Двухстадийный режим роста улучшает оптические свойства пленок

Определение оптических потерь – метод призмного ввода излучения

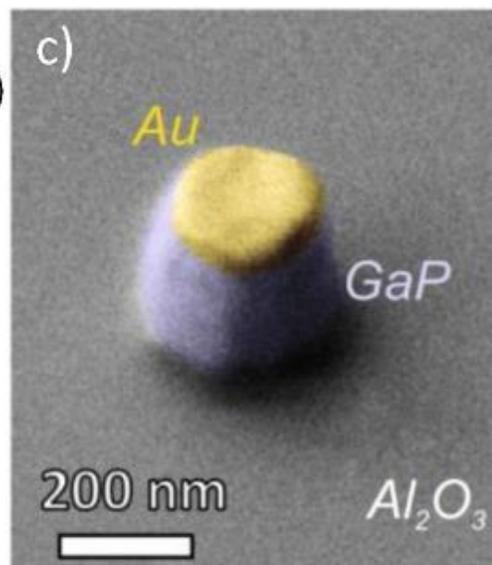
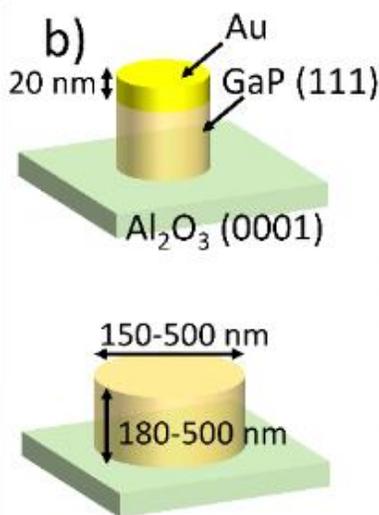
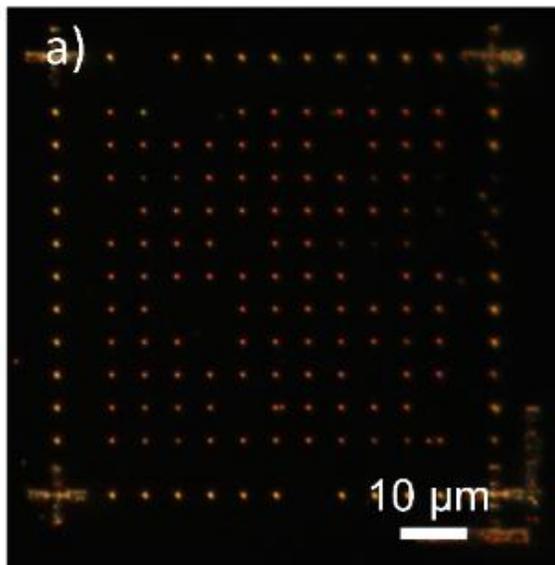
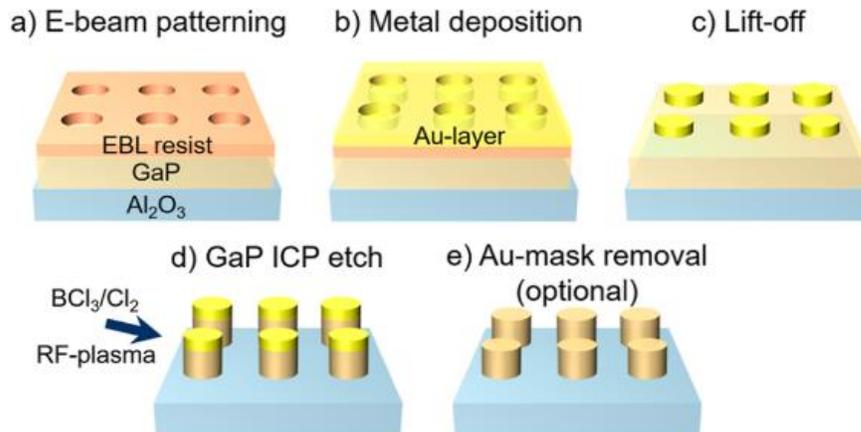
Основная мода		
Толщина (n=3.178), мкм	Эфф. ПП	Потери, дБ/см
0,3688	2,8541	0,38
Вторая мода		
Толщина (n=3.178), мкм	Эфф. ПП	Потери, дБ/см
0,1274	2,1754	2,13



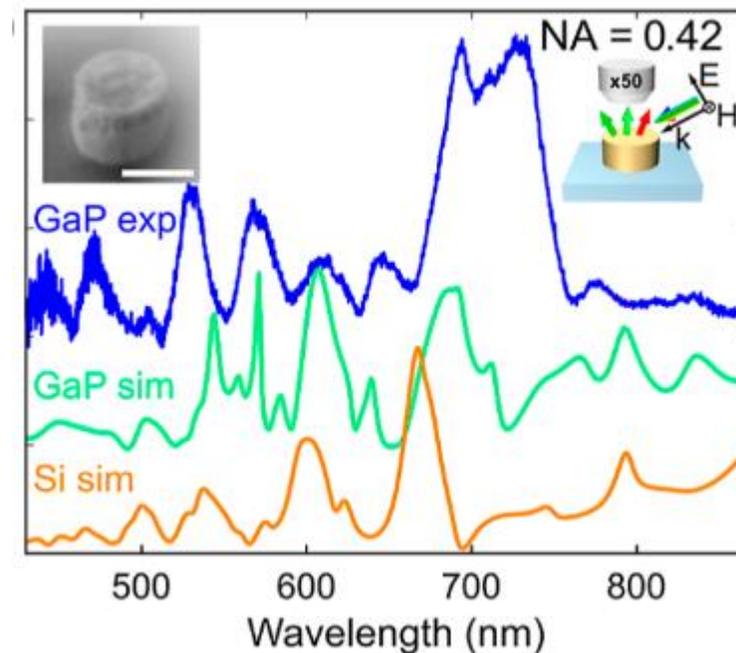
## I. GaP-on-sapphire epitaxial growth



## II. Nanopatterning

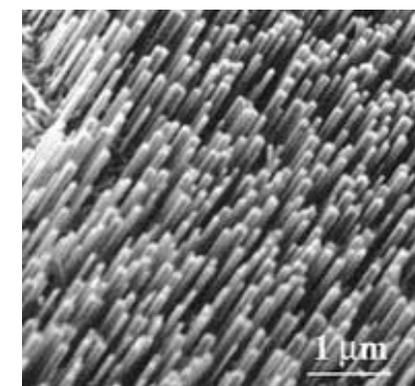
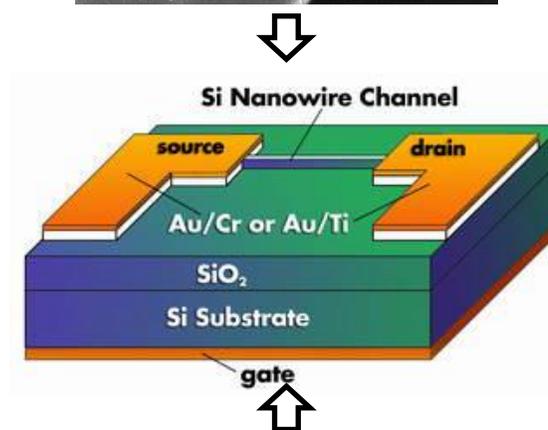
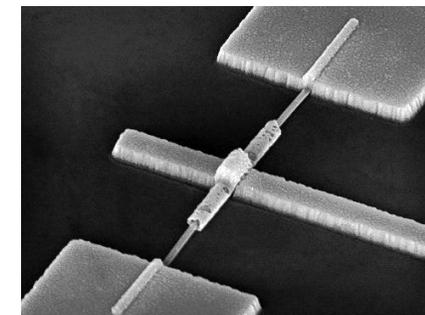
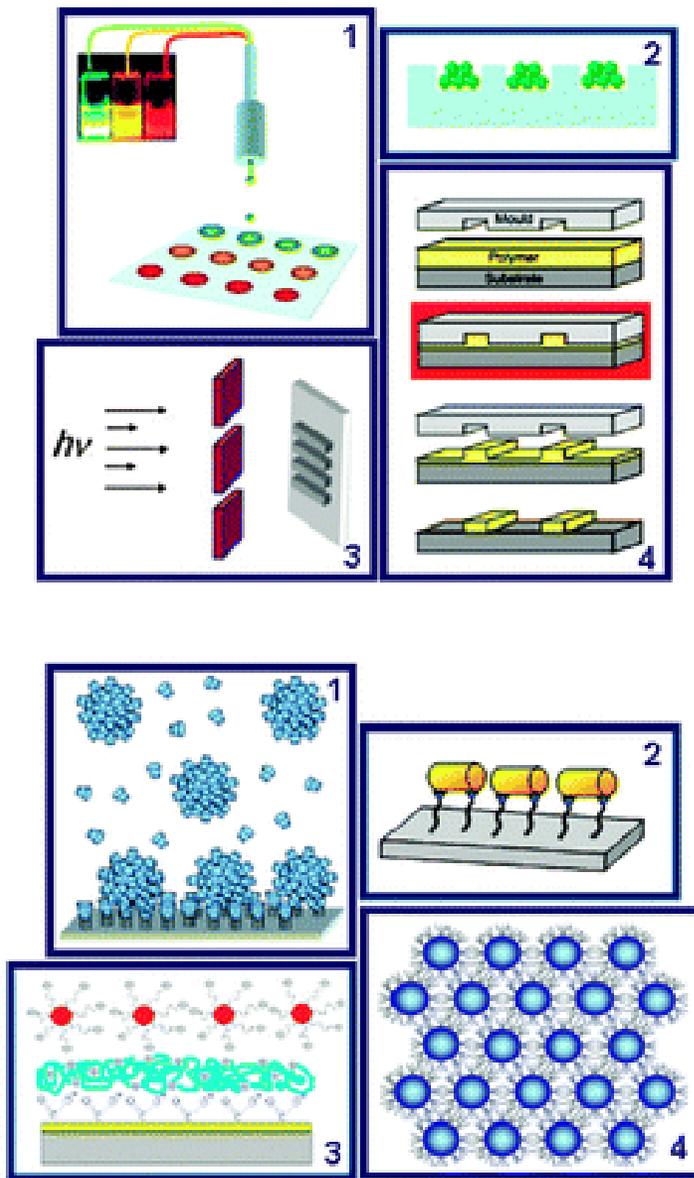
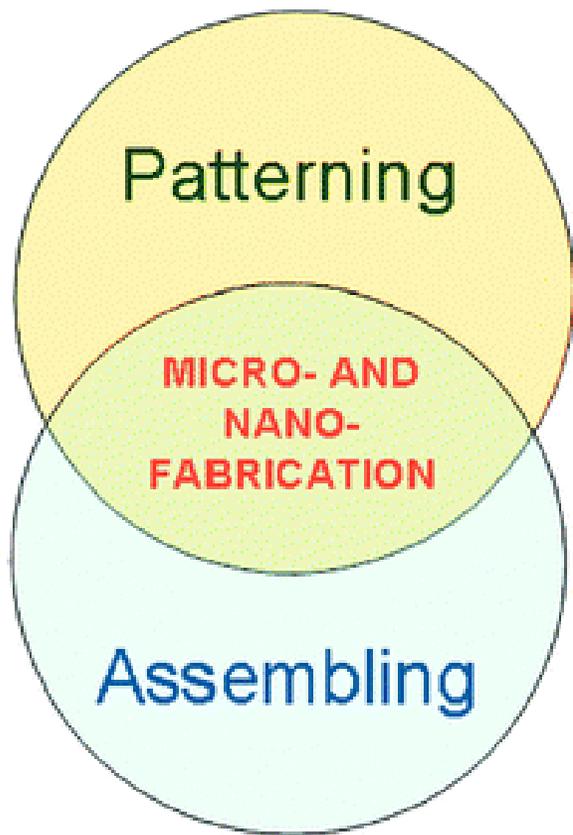


➤ Минимальный диаметр порядка 50 нм

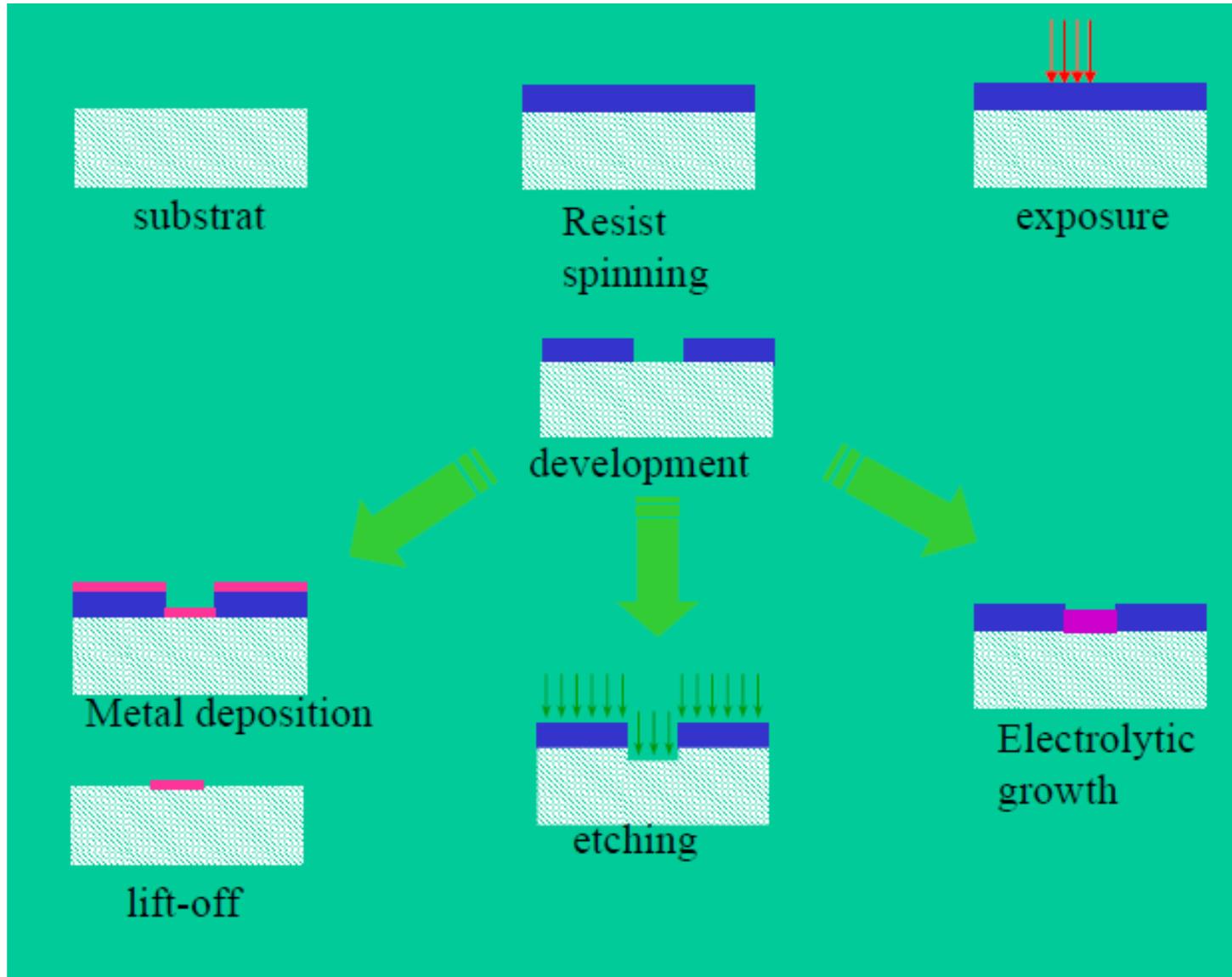


- Высокодобротные оптические резонансы Ми старших порядков.
- На порядок более высокая добротность резонансов в сравнении с Si

# Основные подходы к изготовлению наноструктур



# Основные стадии литографического процесса

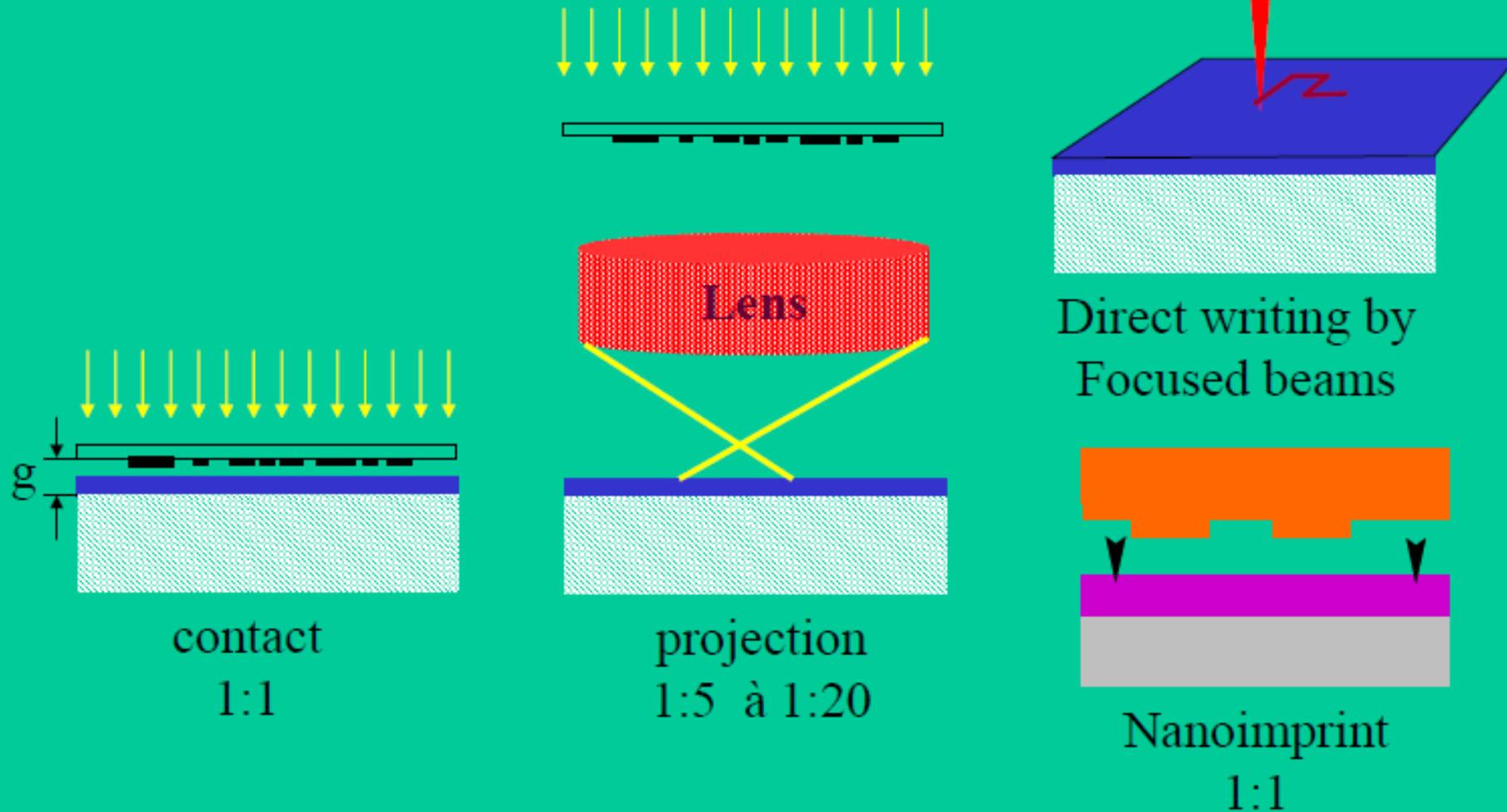


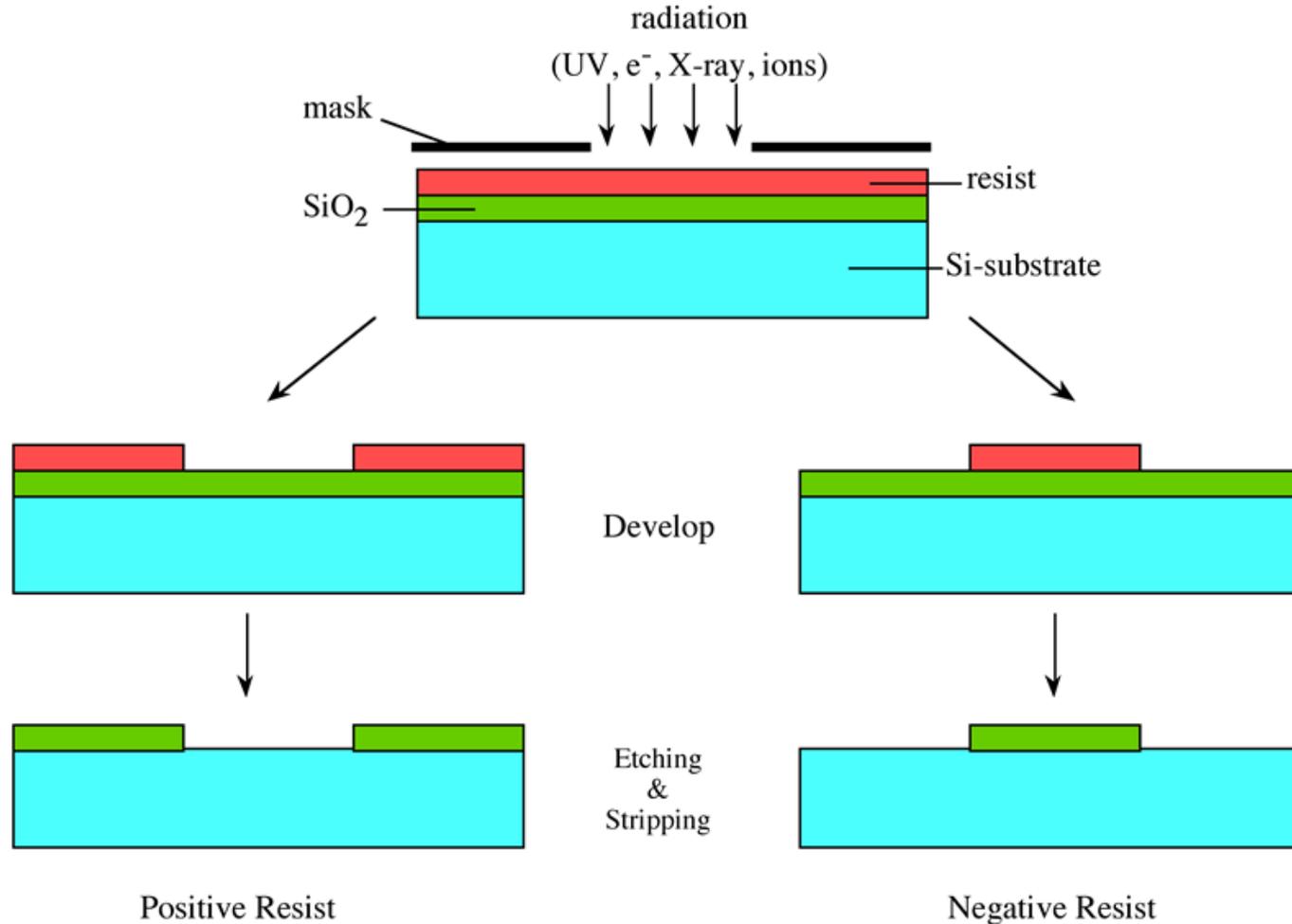
## Semiconductor manufacturing processes

- [10  \$\mu\text{m}\$](#)  — 1971
- [3  \$\mu\text{m}\$](#)  — 1975
- [1.5  \$\mu\text{m}\$](#)  — 1982
- [1  \$\mu\text{m}\$](#)  — 1985
- [800 nm](#) — 1989
- [600 nm](#) — 1994
- [350 nm](#) — 1995
- [250 nm](#) — 1997
- [180 nm](#) — 1999
- [130 nm](#) — 2002
- [90 nm](#) — 2004
- [65 nm](#) — 2006
- [45 nm](#) — 2008
- [32 nm](#) — 2010
- [22 nm](#) — 2012
- [14 nm](#) — 2014
- [10 nm](#) — 2018
- [7 nm](#) — 2020
- [5 nm](#) — 2022
- [3 nm](#) — 2024
- [2 nm](#) — 2025

Reproduction of a pattern  $\Rightarrow$  expose a resist to open windows in a controlled way

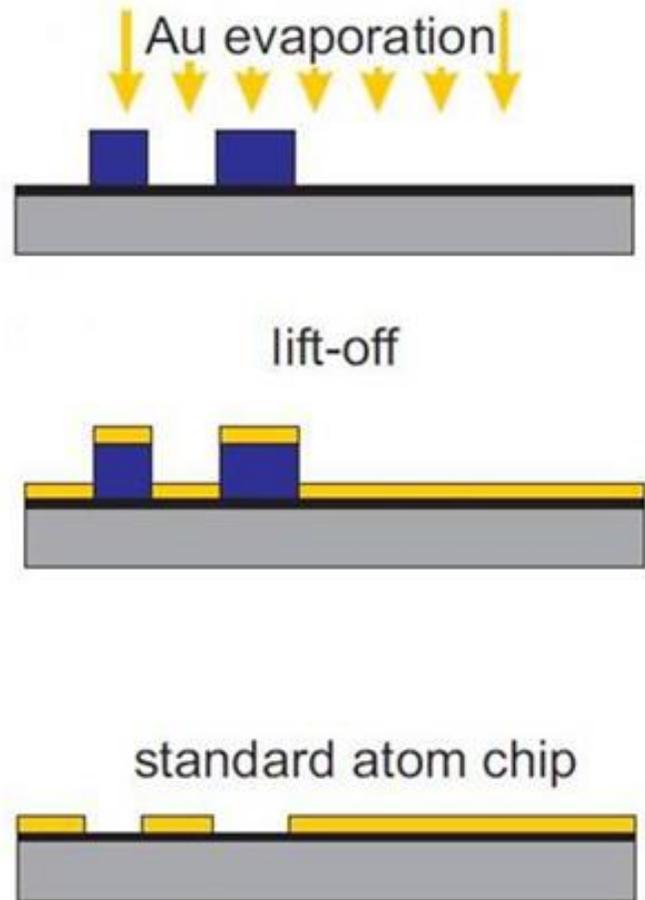
Crucial step which will fix the size of the pattern



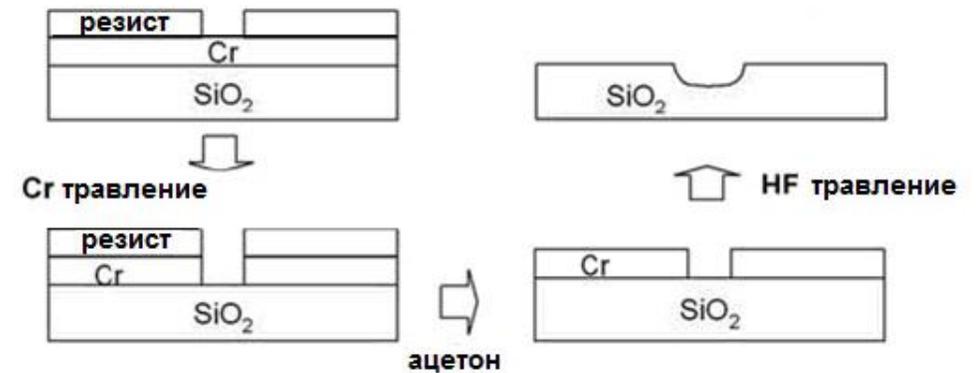


**Основные параметры фоторезистов:**  
*Толщина слоя, спектральная чувствительность*

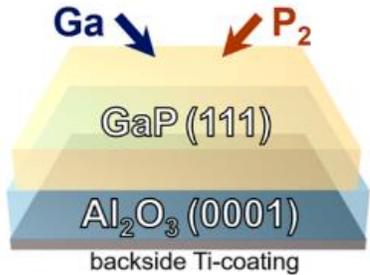
## Lift off



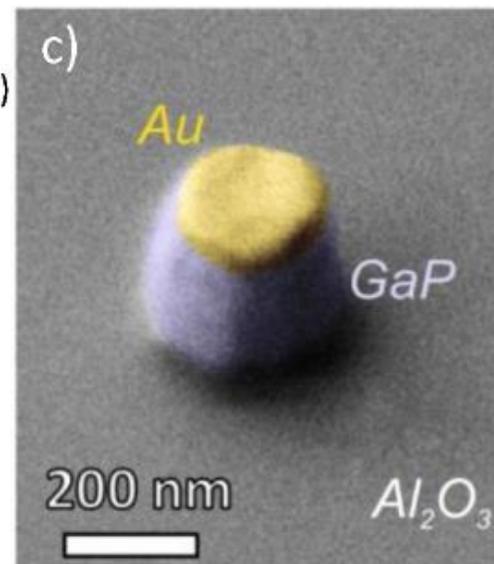
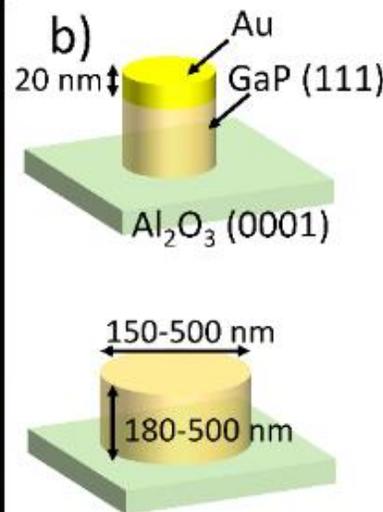
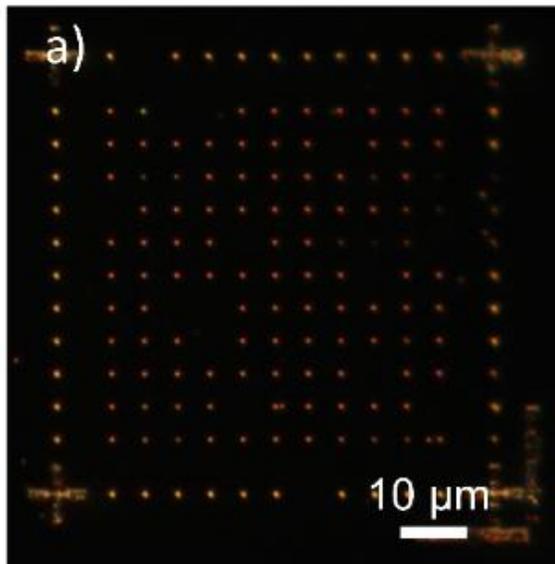
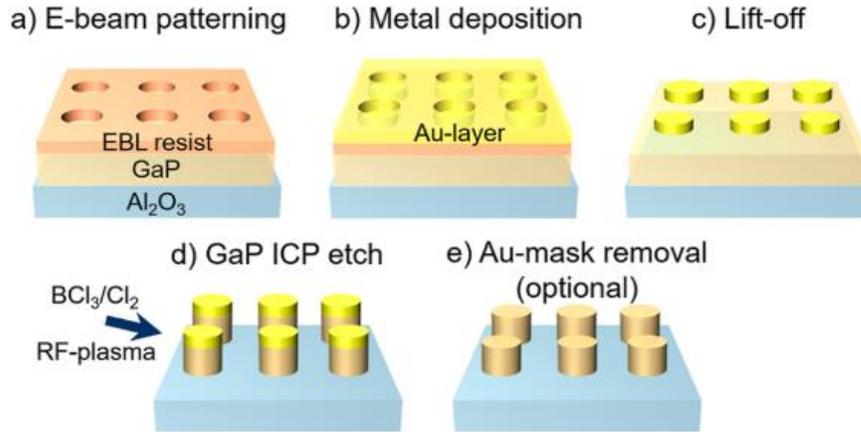
## Травление



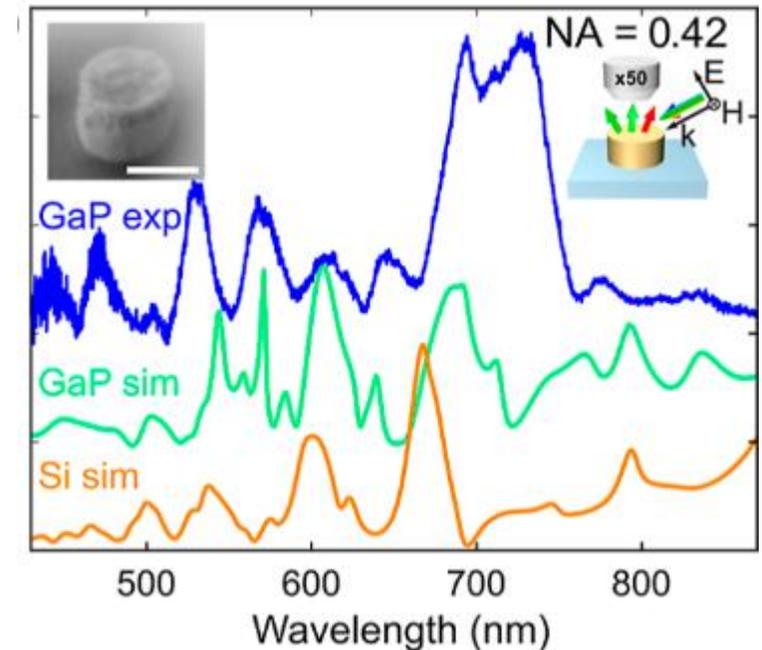
## I. GaP-on-sapphire epitaxial growth



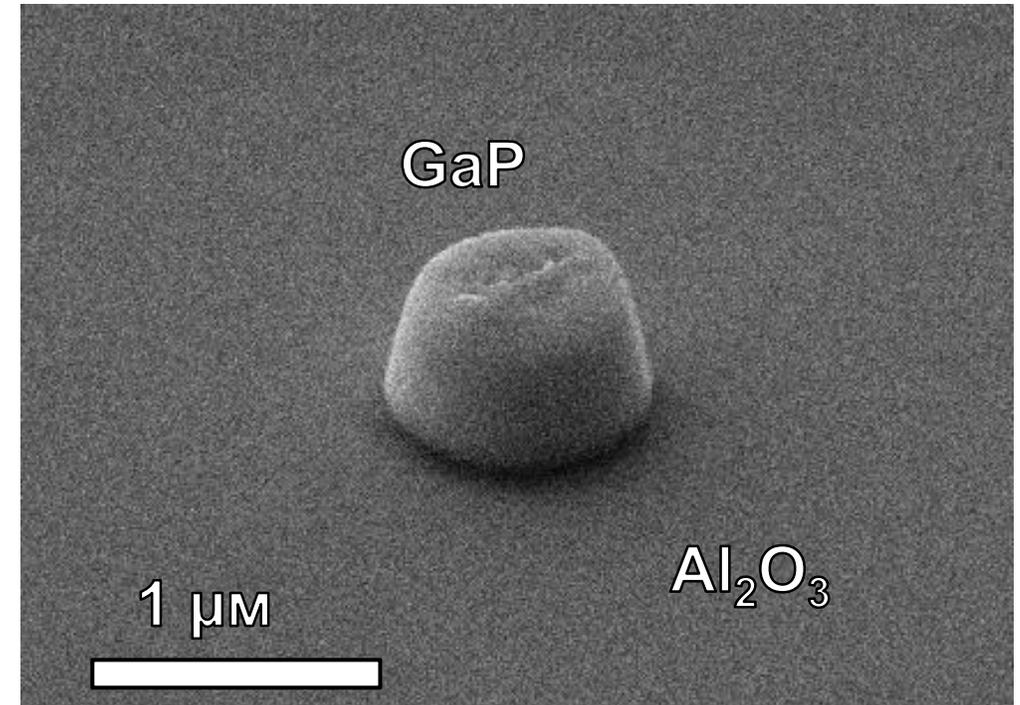
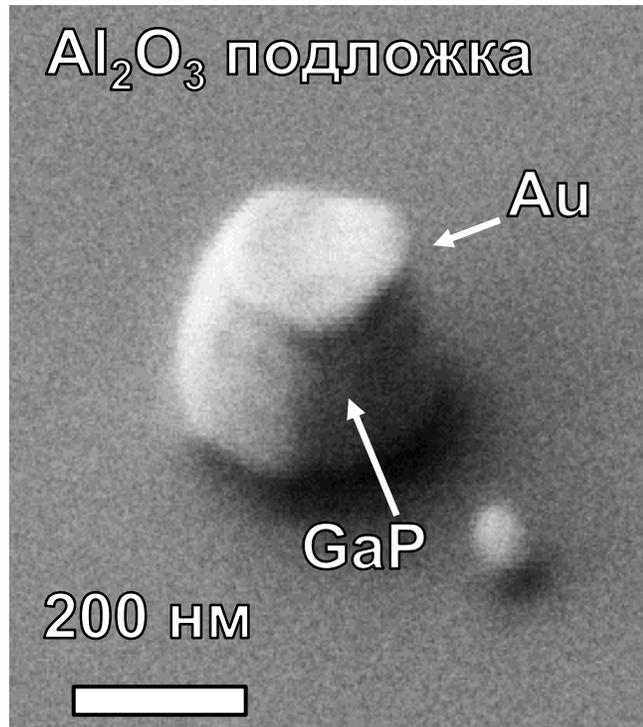
## II. Nanopatterning



➤ Минимальный диаметр порядка 50 нм



- Высокодобротные оптические резонансы Ми старших порядков.
- На порядок более высокая добротность резонансов в сравнении с Si

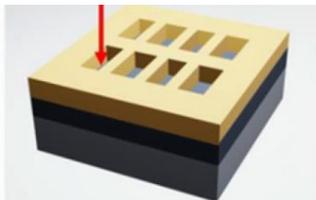


- Электронная литография

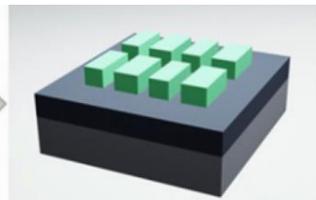
- Травление фокусированным ионным пучком (FIB)

- FIB обеспечивает более гладкую и вертикальную боковую стенку при сохранении разрешения
- FIB более предпочтителен для толстых пленок

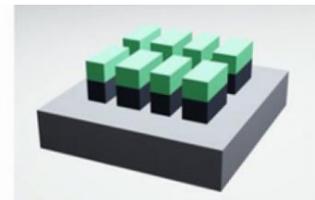
Электронная литография



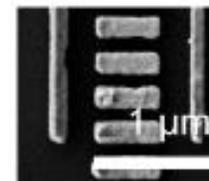
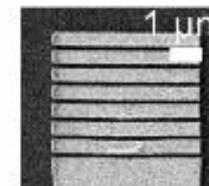
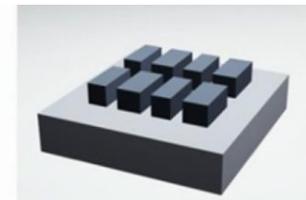
Осаждение Au маски // lift-off



ICP травление

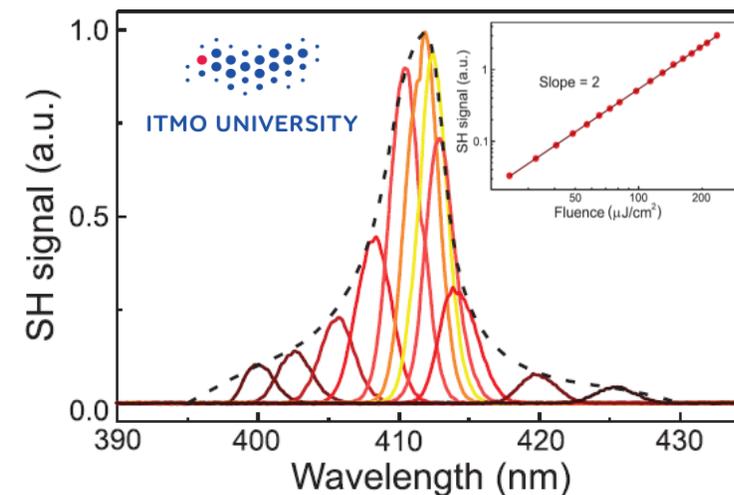
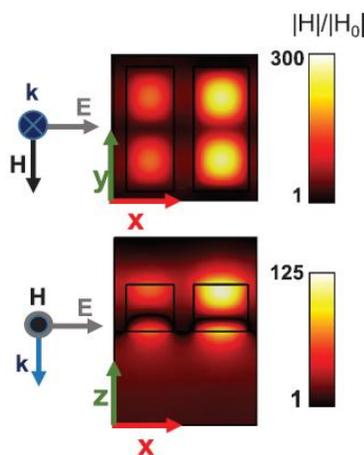
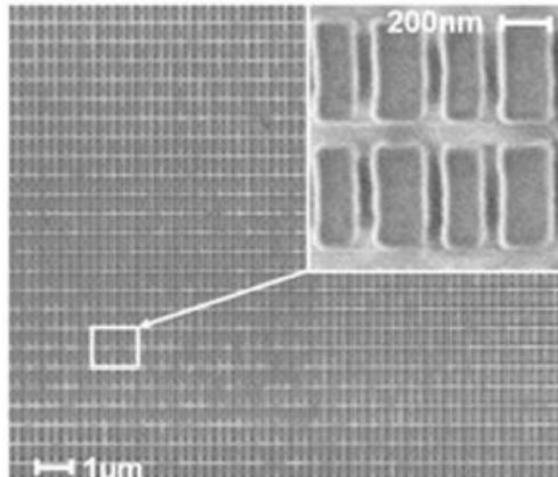
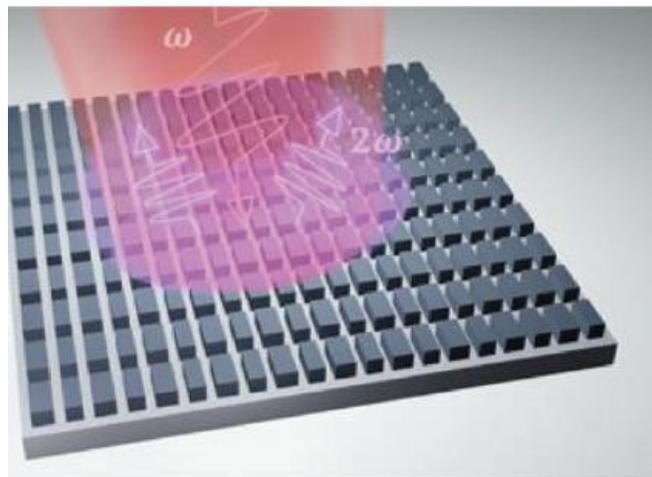


Удаление Au маски



➤ Минимальный размер менее 100 нм

- Генерация второй гармоники, усиленная квази-ВВС резонансом (834 нм) в GaP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> метаповерхности



# Advanced photonic structure based on flexible NW-embedded membranes. Flexible transparent IR visualizer

ACS NANO

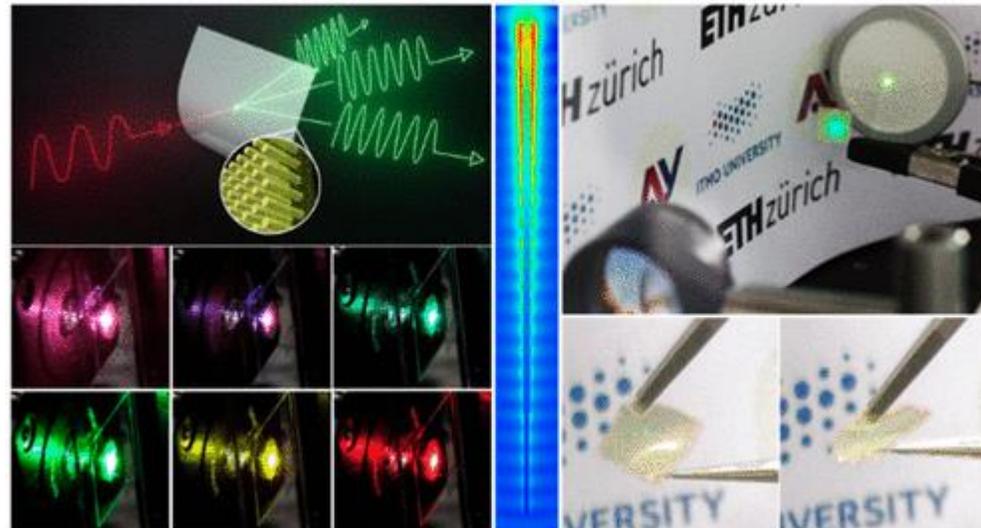
Subscriber access provided by CARLETON UNIVERSITY

Article

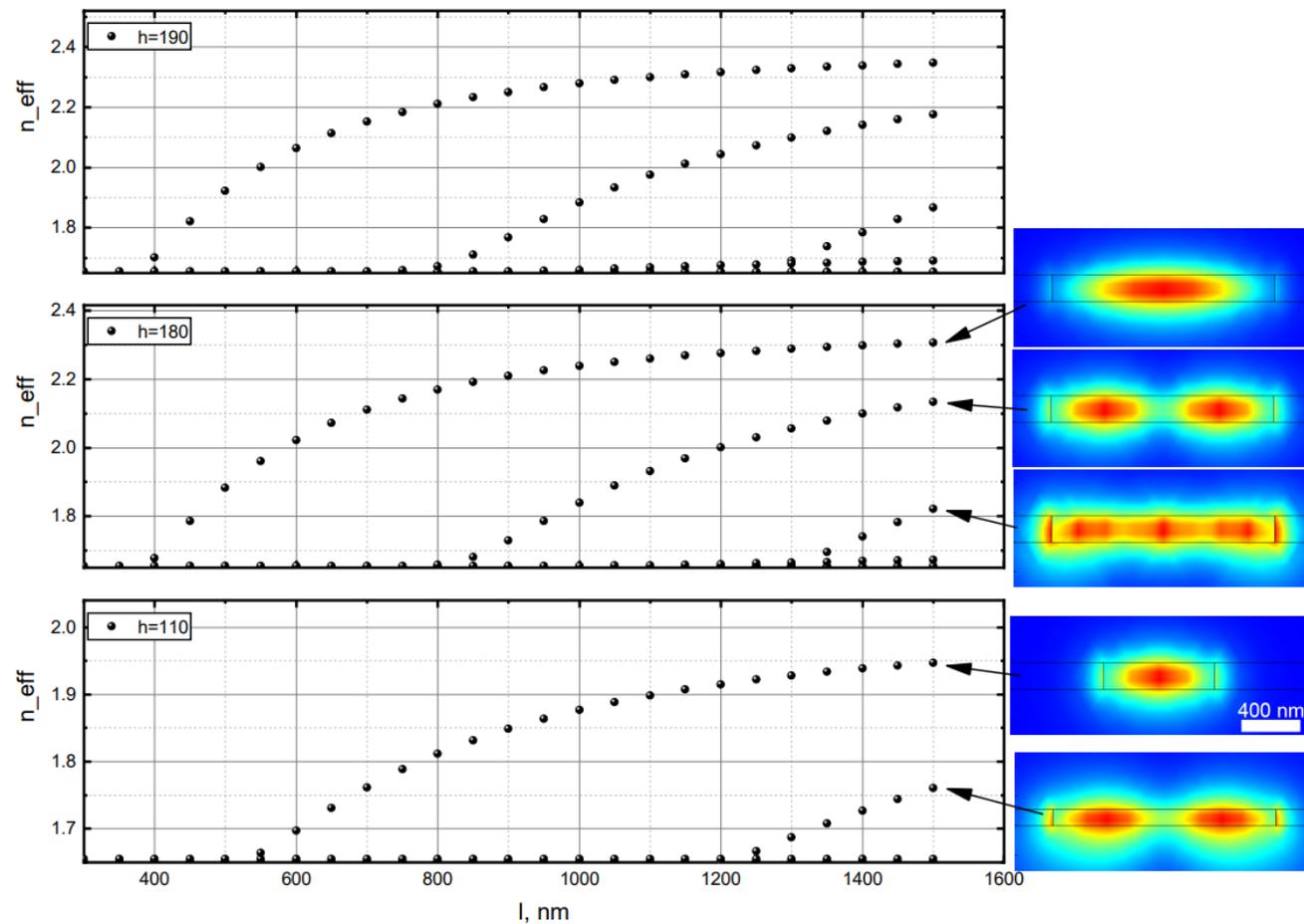
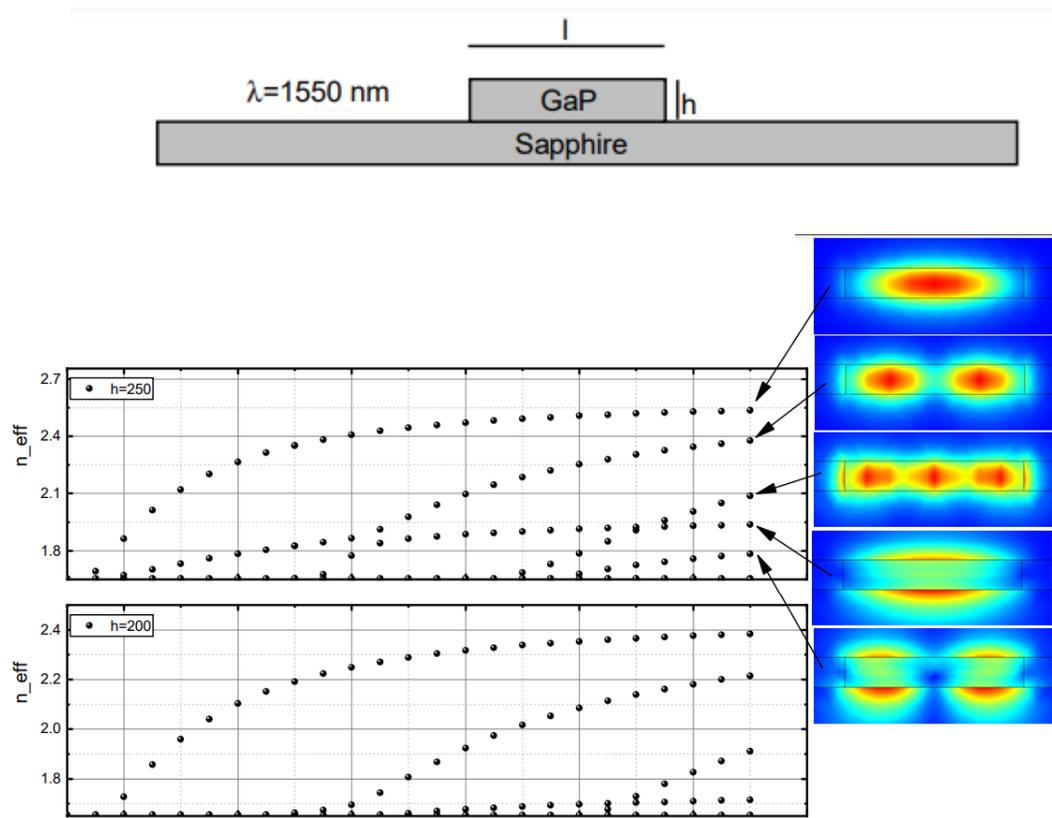
## Gallium Phosphide Nanowires in a Free-Standing, Flexible, and Semitransparent Membrane for Large-Scale Infrared-to-Visible Light Conversion

Vladimir V. Fedorov, Alexey Bolshakov, Olga Sergaeva, Vladimir Neplokh, Daria Markina, Stéphanie Bruyère, Grégoire Saerens, Mihail I Petrov, Rachel Grange, Maria Timofeeva, Sergey V. Makarov, and Ivan S. Mukhin

ACS Nano, Just Accepted Manuscript • DOI: 10.1021/acsnano.0c04872 • Publication Date (Web): 06 Aug 2020



Программное обеспечение Comsol Multiphysics

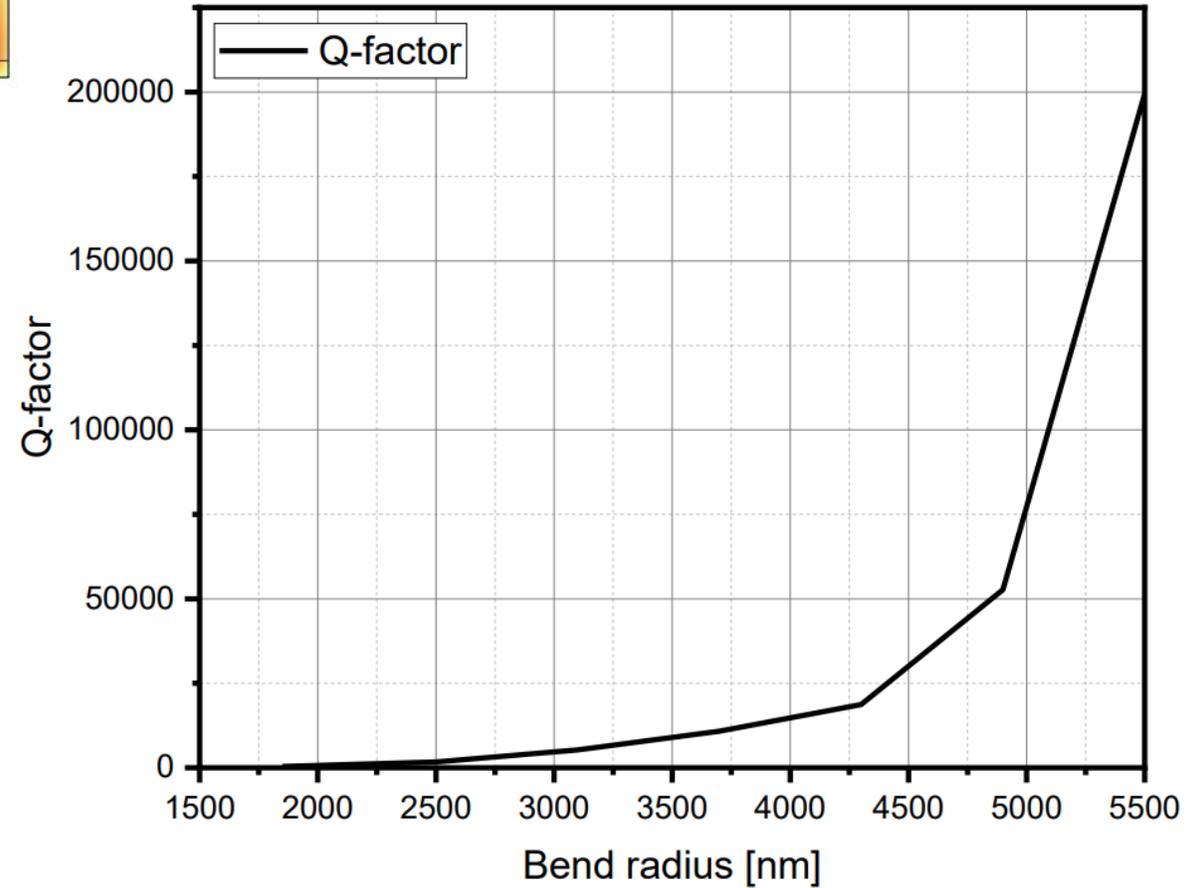
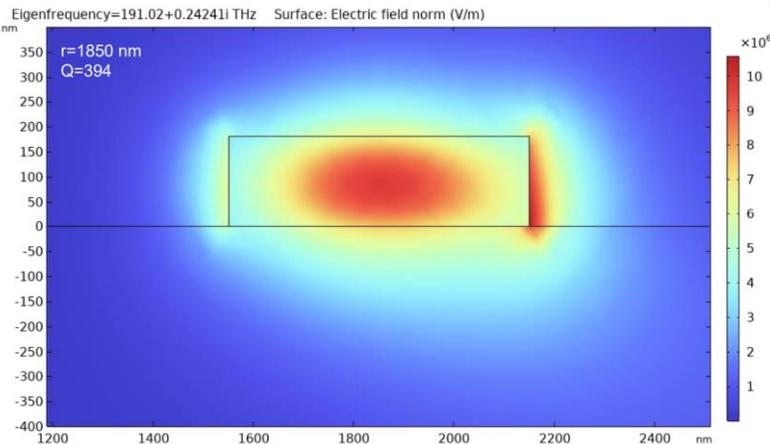
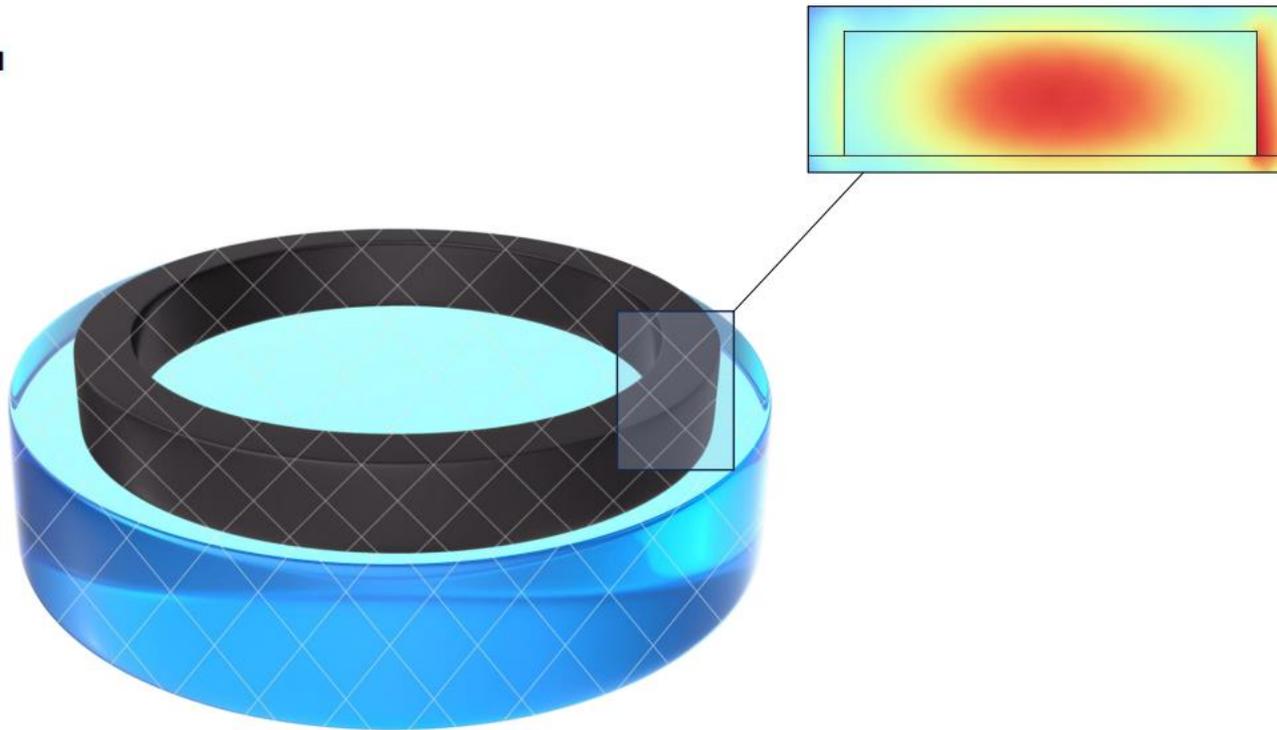


Для волноводов с малой толщиной возможен большой диапазон ширин, для которых поддерживается распространения только основной моды

# Численный расчет потерь в изогнутых волноводах



Программное обеспечение Comsol multiphysics

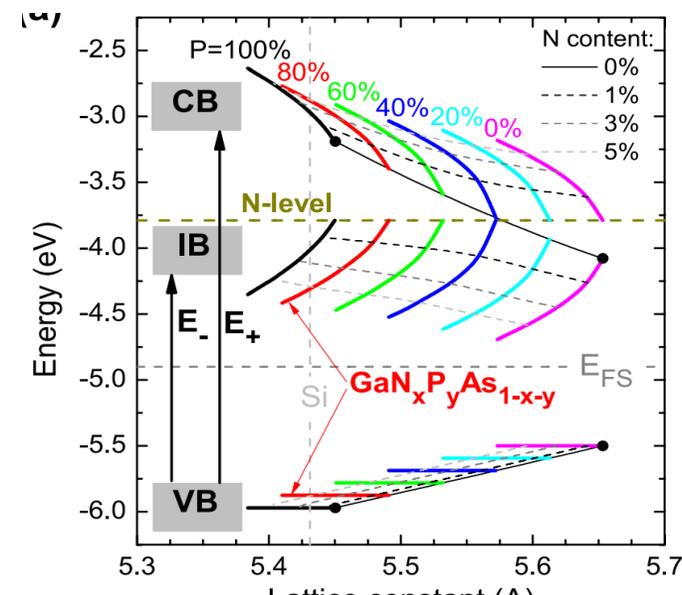
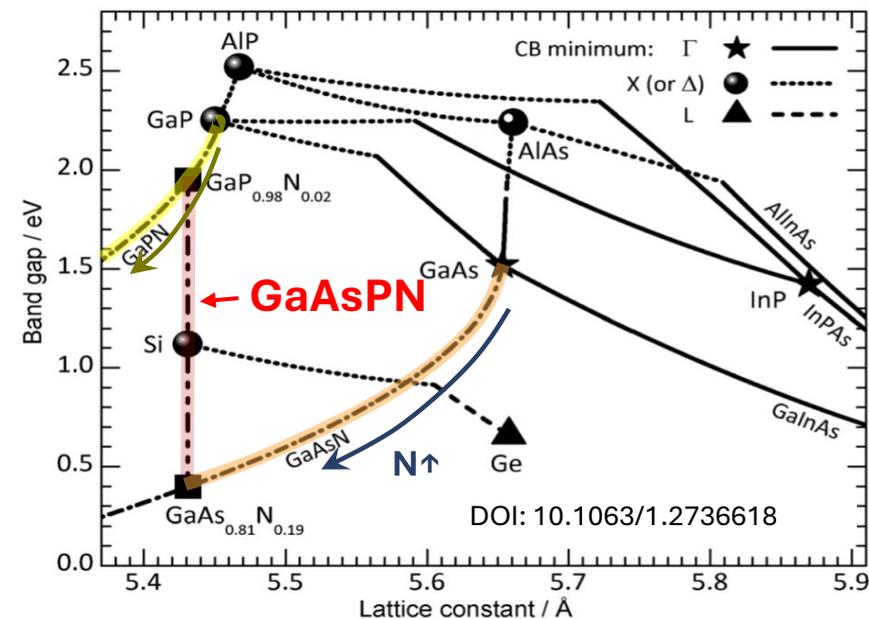


Для радиусов закругления более 5 мкм наблюдается высокая локализация моды в волноводе и высокие добротности кольцевых резонаторов – малые оптические потери

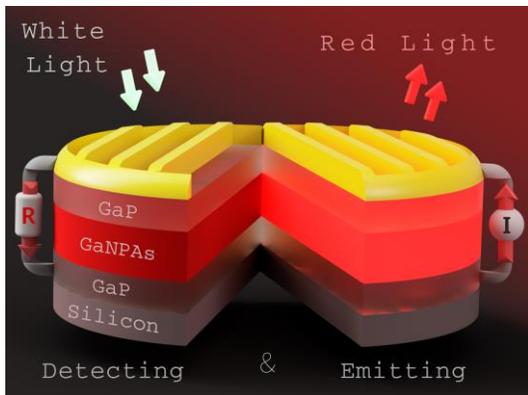
## Азотсодержащие твердые растворы

- Для твердого раствора GaPN наблюдается переход к прямозонной энергетической структуре при содержании азота  $> 0.3-0.4\%$
- Сужение запрещённой зоны ( $E_g$ ) при добавлении азота ( $\sim 100$  мэВ/ $\%$ ) сопровождается уменьшением постоянной решётки.
- Четверные твердые растворы позволяют варьировать энергию запрещённой зоны ( $E_g$ ), сохраняя параметр решётки неизменным.

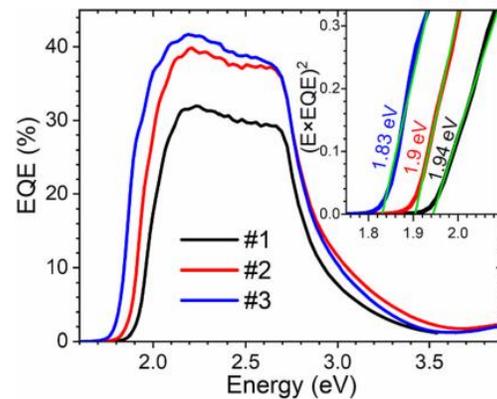
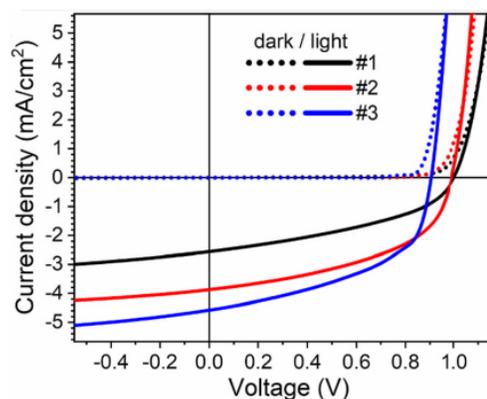
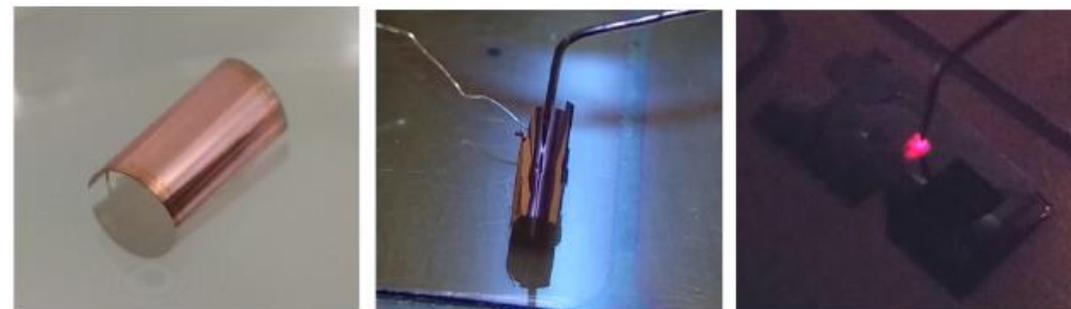
- GaAsPN
- InGaPN
- GaPNBi



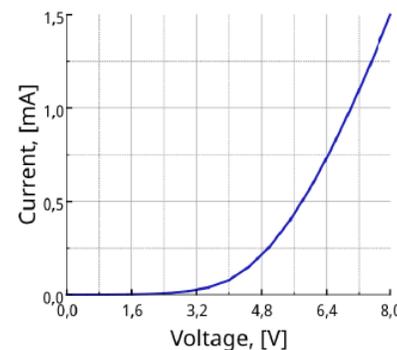
## Свето- и фотодиод GaAsPN-на-Si



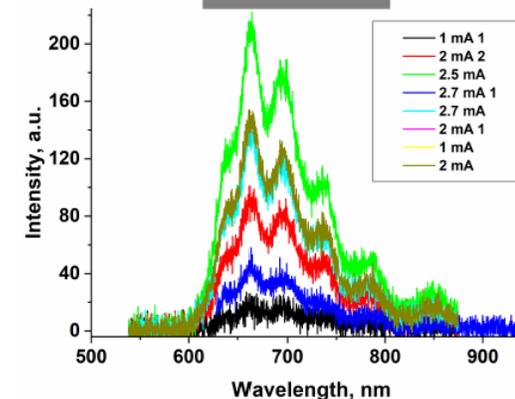
## Гибкий СИД на основе GaAsPN



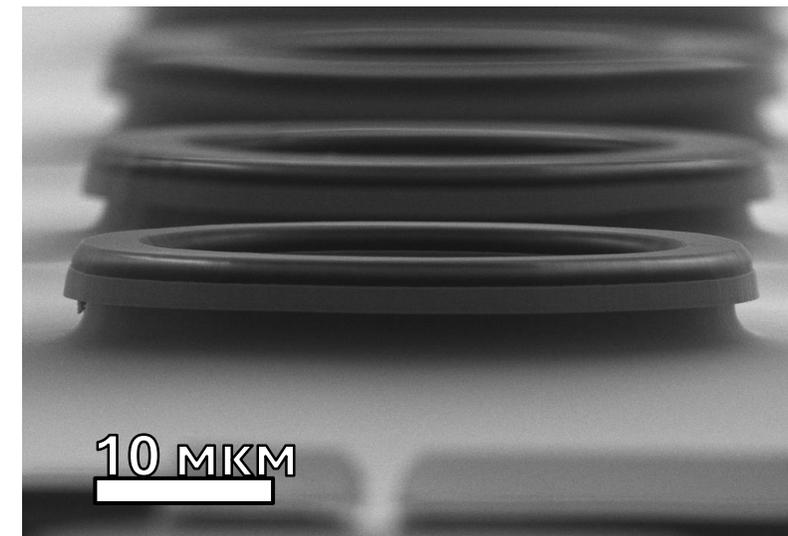
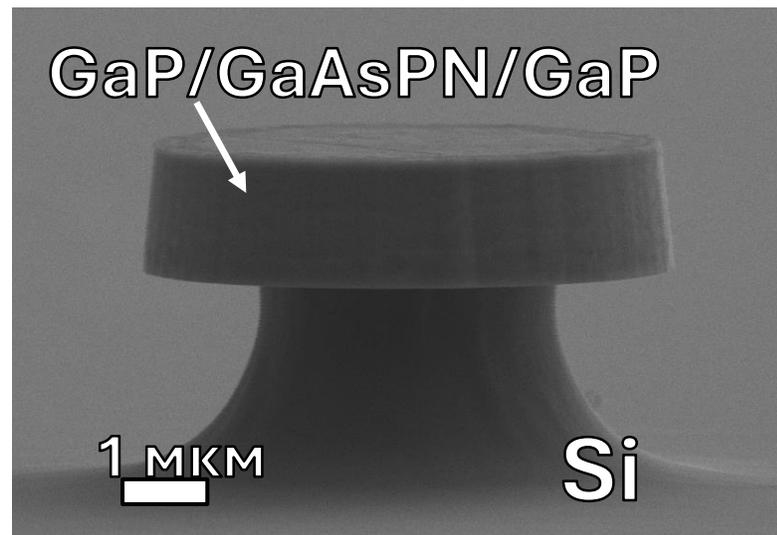
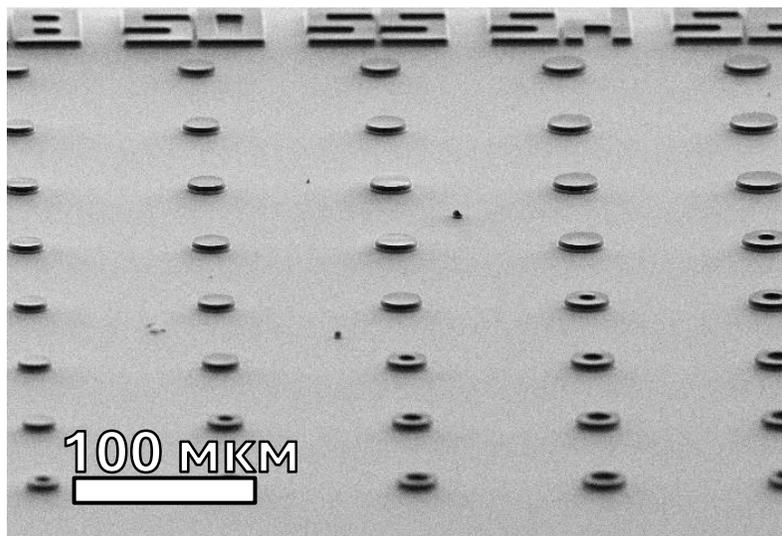
I-V



EL

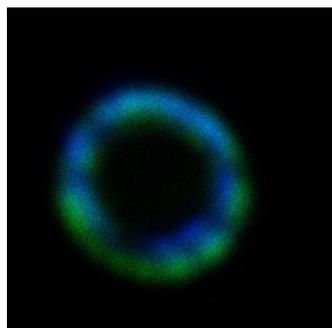


Fedorov et.al.  
MSSP 2023, 168 107867



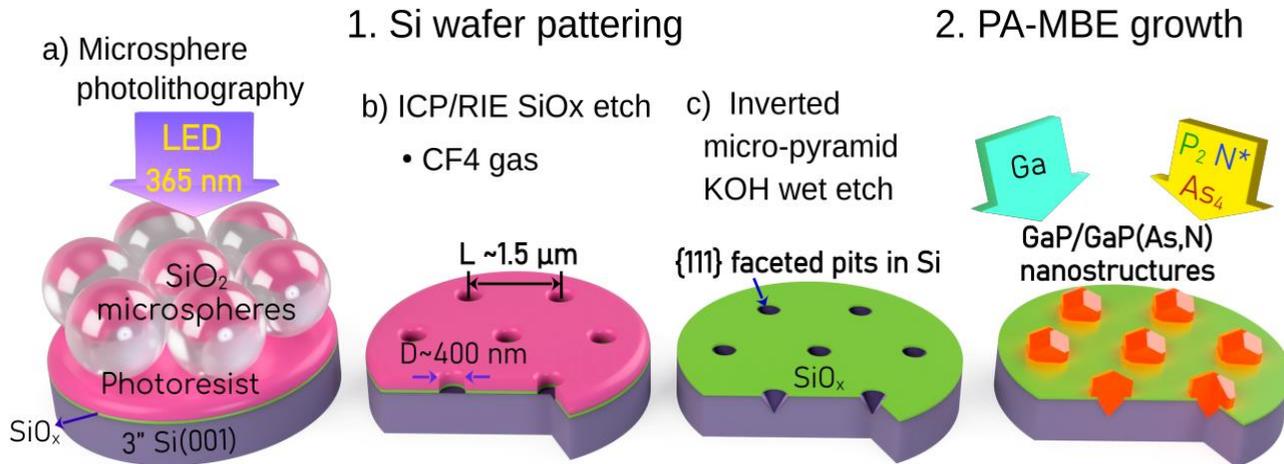
- Генерация второй гармоники (ГВГ)
- 2-фотонная ФЛ

$\lambda_{\text{накачки}} = 920 \text{ nm}$

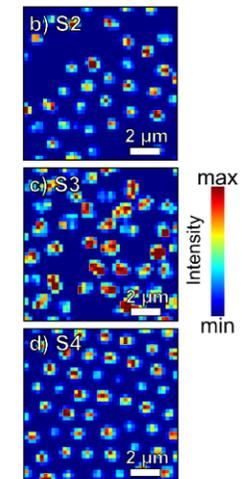
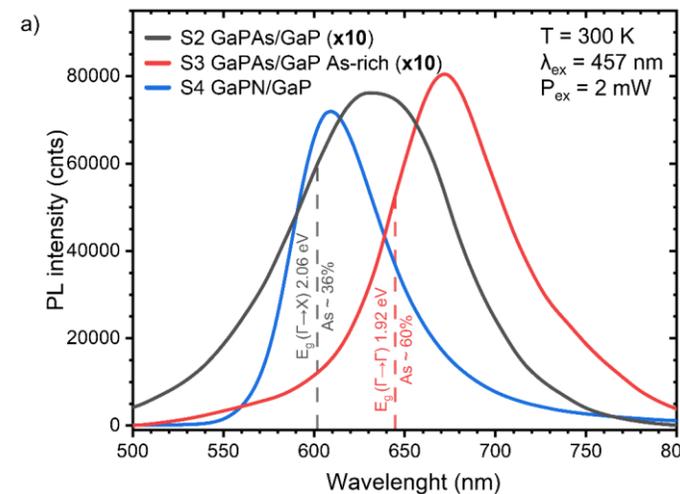
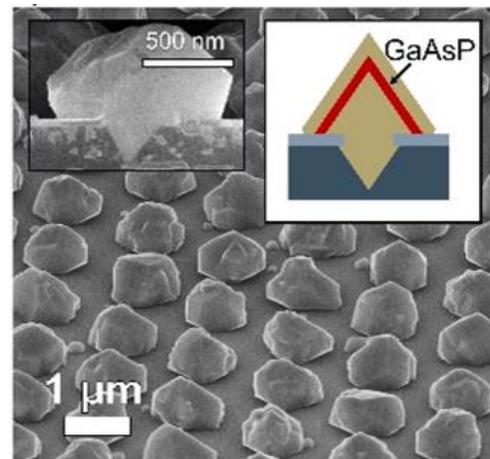
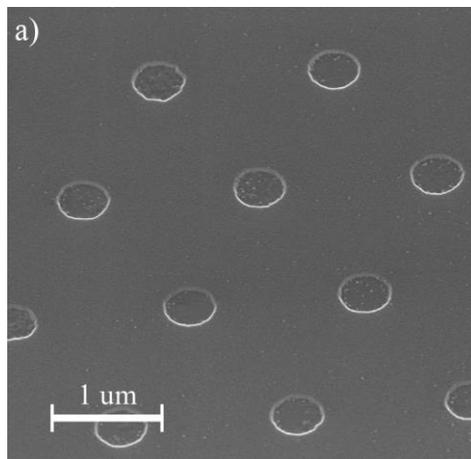


- Слои  $A^{III}B^V$  и Si можно травить селективно, что позволяет создавать частично “подвешенные” структуры
- Селективное удаление материала ростовой подложки позволяет снизить оптические потери

# Селективная эпитаксия GaP(N,As) наноструктур



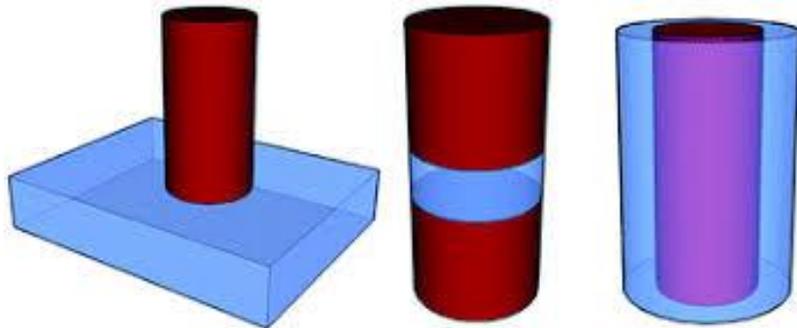
- Определены условия селективного формирования GaP на Si
- Метод селективной эпитаксии позволяет формировать упорядоченные массивы наноструктур GaP(N,As) или тонкие пленки с текстурой заданной топологии
- В качестве маски выступает слой диэлектрика - SiO<sub>x</sub>



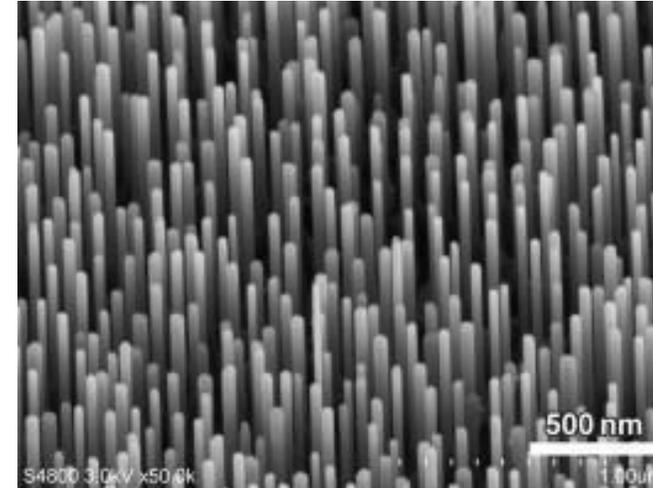
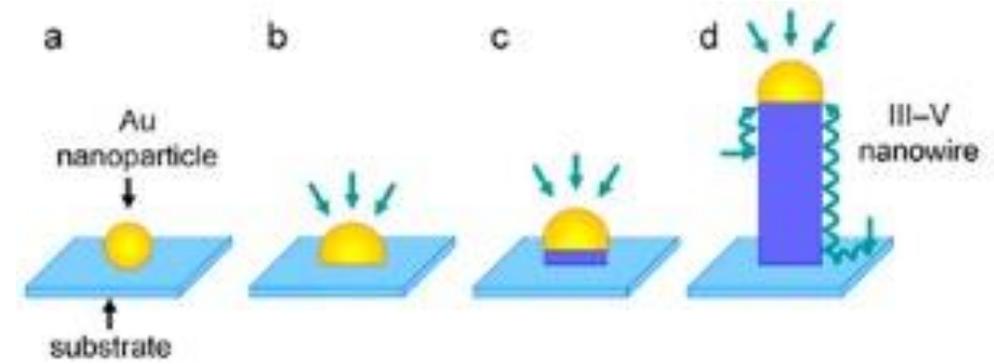
# III-V Nanowires

## Nanowires-based heterostructures

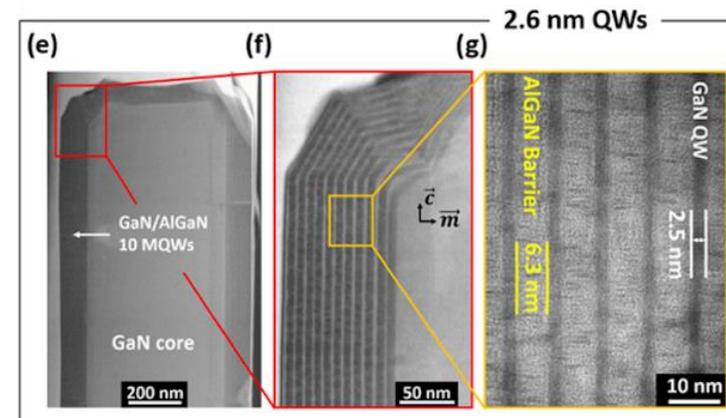
- can be synthesized on lattice mismatched substrates
- high crystal quality
- Bandgap and doping profile engineering
- excellent waveguide properties
- excellent mechanical properties
- Compatible with Si technology



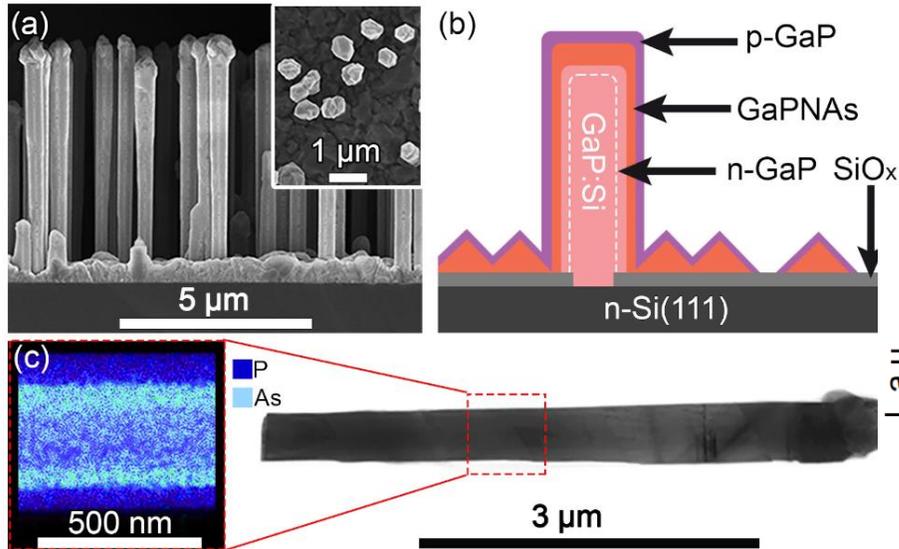
High aspect ratio  
Radial and axial p-i-n  
structures



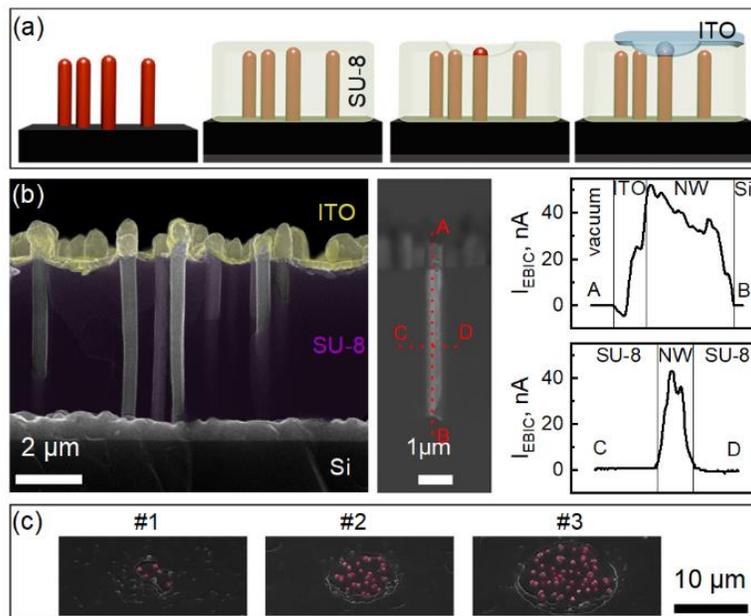
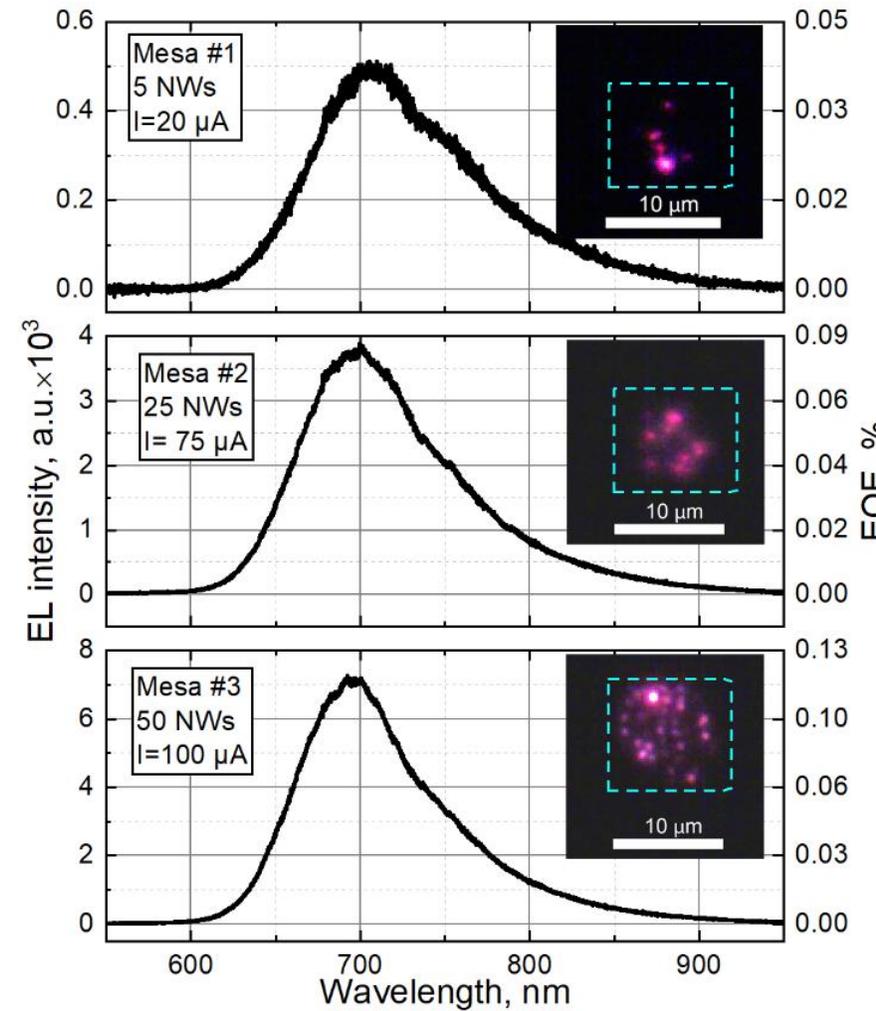
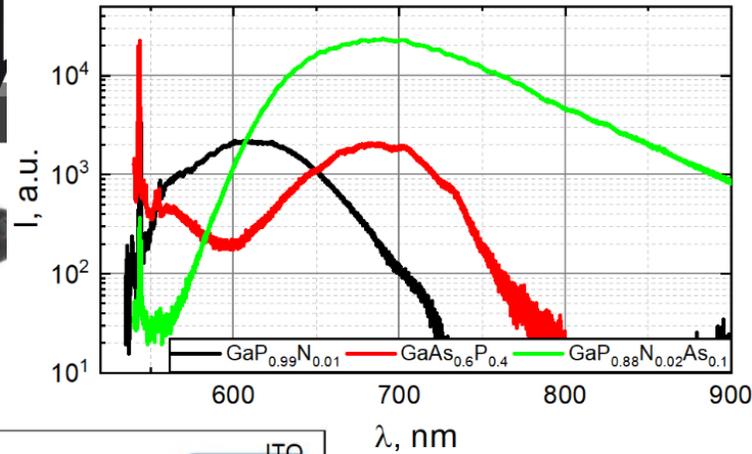
SEM and TEM images of NWs



# Светодиоды на основе GaP(N,As) нитевидных нанокристаллов

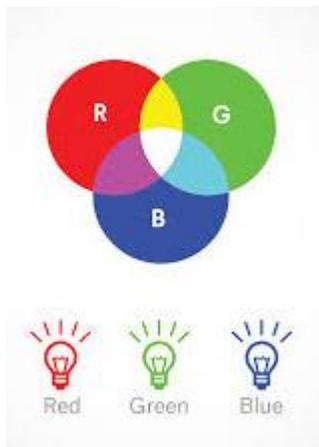
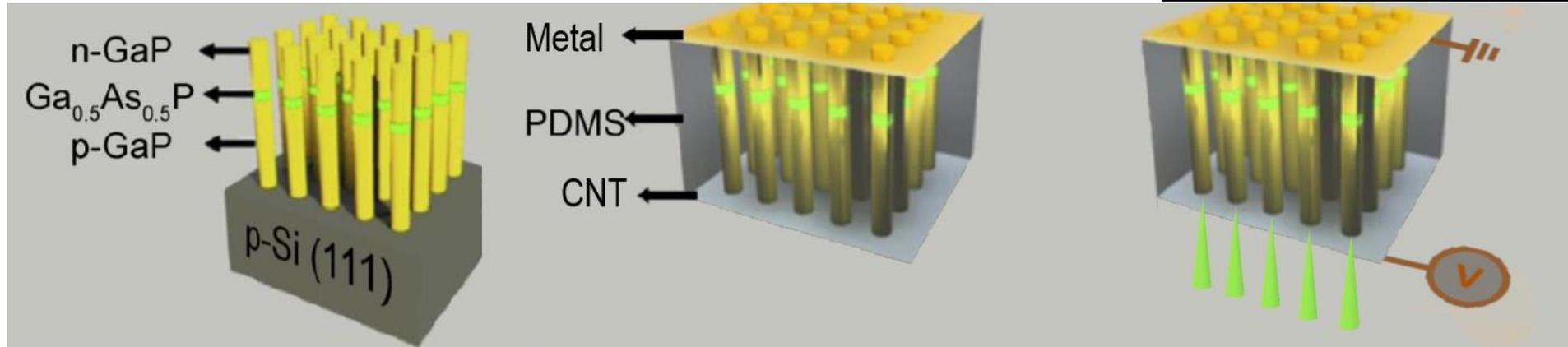
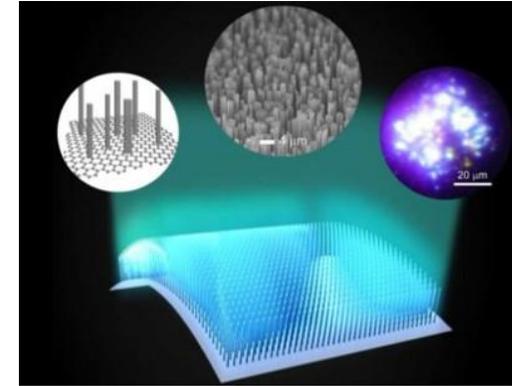


За счет малой площади контакта с подложкой – рост на рассогласованных подложках.  
Аксиальные и радиальные гетероструктурированные ННК



# NW-based flexible LEDs

Due to a small NW footprint and outstanding mechanical properties, NW arrays can be encapsulated into a polymer matrix and then this membrane can be released from the rigid substrate.

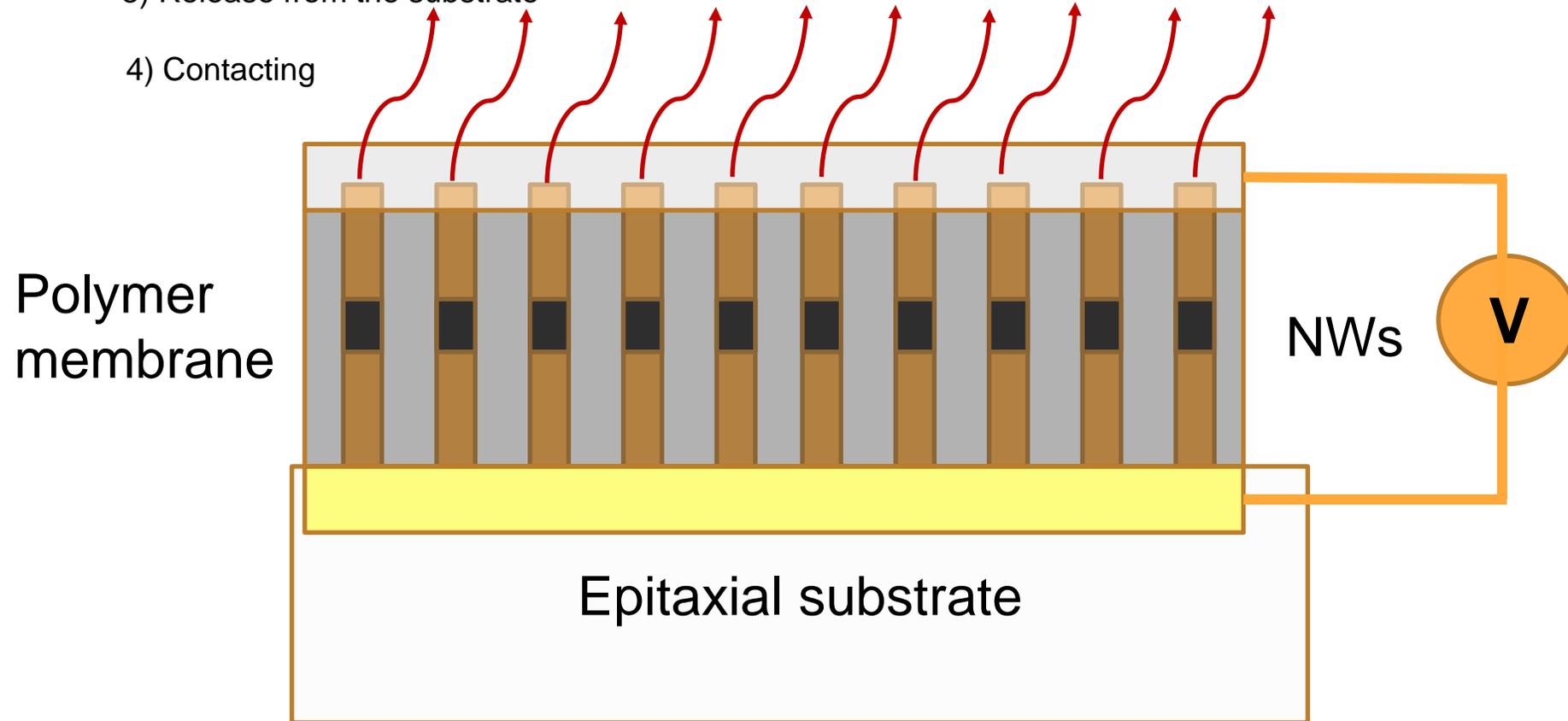


Currently, Blue and Green NW-based flexible LEDs are realized on the base of InGaN (M. Tchernycheva group, C2N) or ZnO (Y. J. Hong group, Sejong University).

To achieve RGB displays efficient Red LEDs are required.

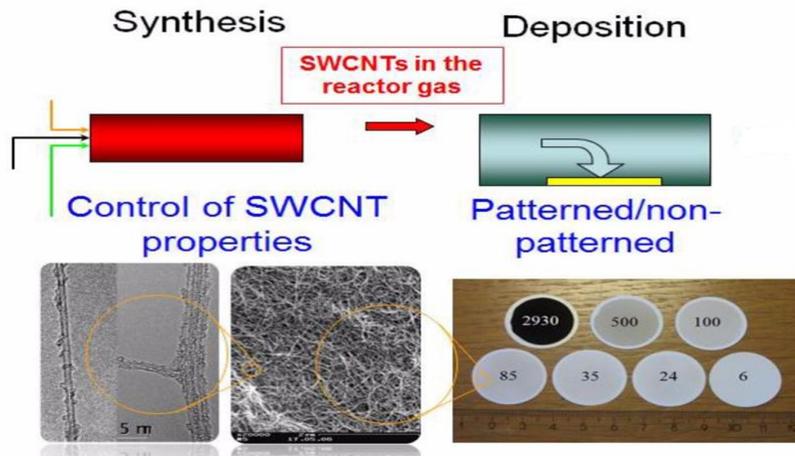
# LED fabrication workflow

- 1) NWs growth
- 2) Encapsulation into polymer
- 3) Release from the substrate
- 4) Contacting



# Flexible transparent contacts based on SWCNTs

Single walled carbon nanotubes (SWCNTs) are excellent candidates for flexible transparent contacts (p-, n- types)



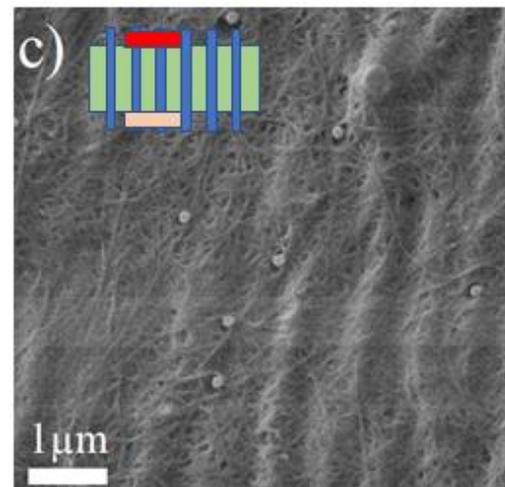
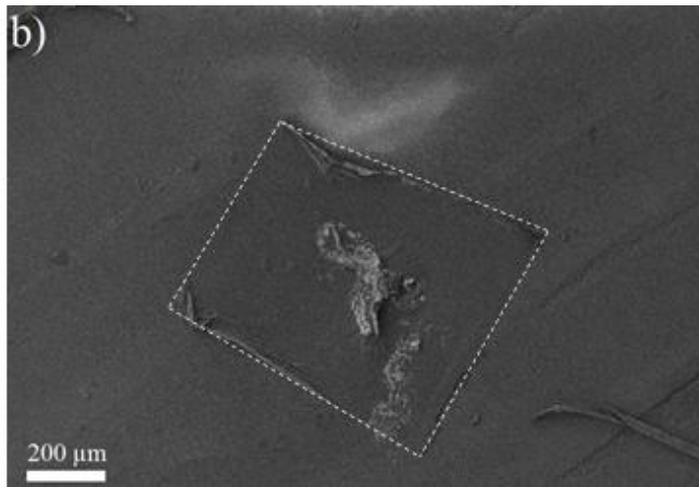
Densification (isopropyl alcohol) and doping (gold chloride)



Prof. Albert Nasibulin



Dr. Dmitry Mitin

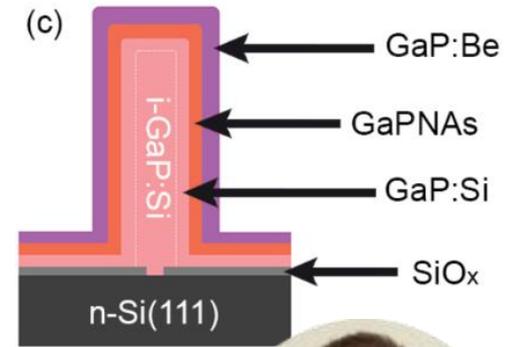
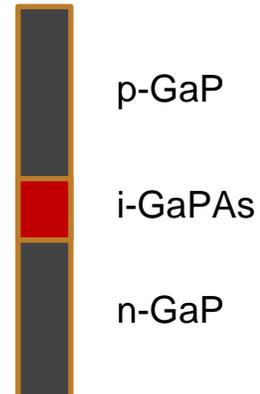
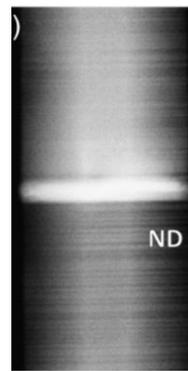


*Energy Sci Eng.*, 2020, 8:2938

*ACS Appl. Mat. Inter.*, 2020, 12(49)

# GaPAs/GaP NWs with axial p-i-n structure

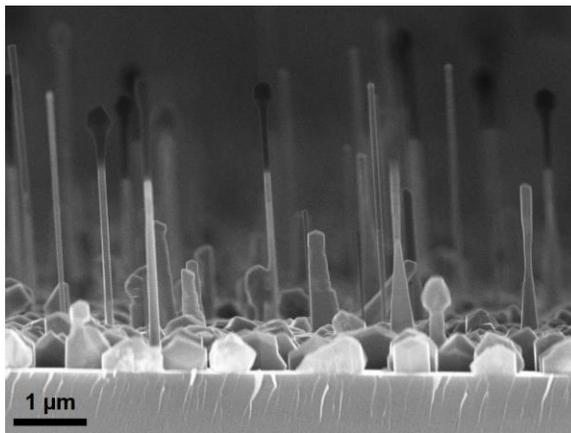
GaPAs and GaPNAs  
 $E_g = 1.7 - 2.05 \text{ eV}$   
 MBE growth



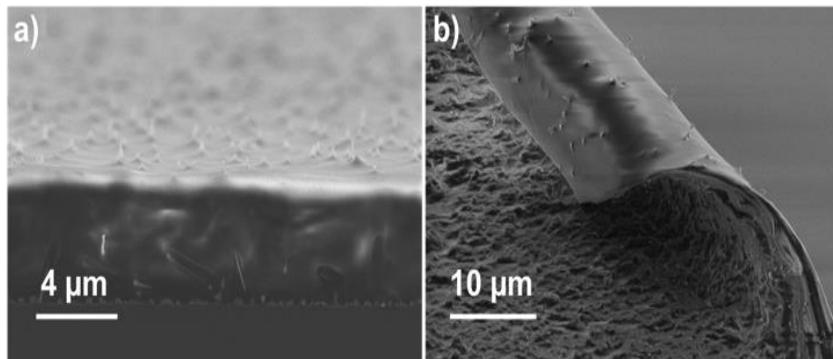
Si (111) substrate



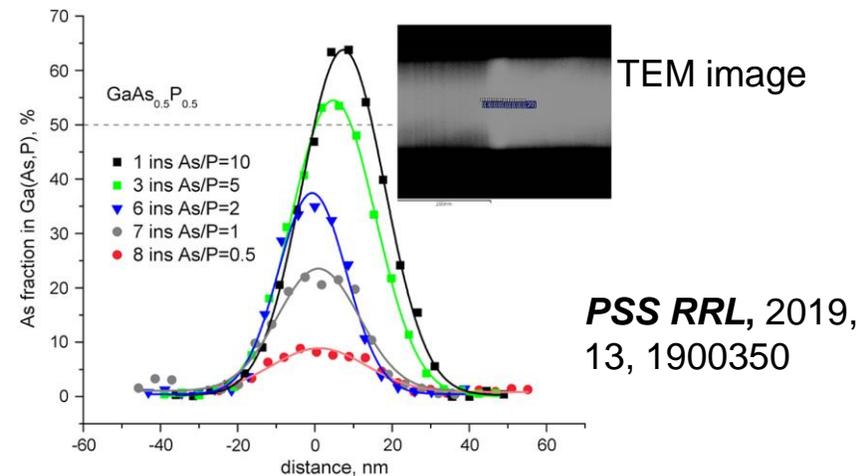
Dr. Vladimir Fedorov



SEM images



Molecular beam epitaxy



# Characterization and results

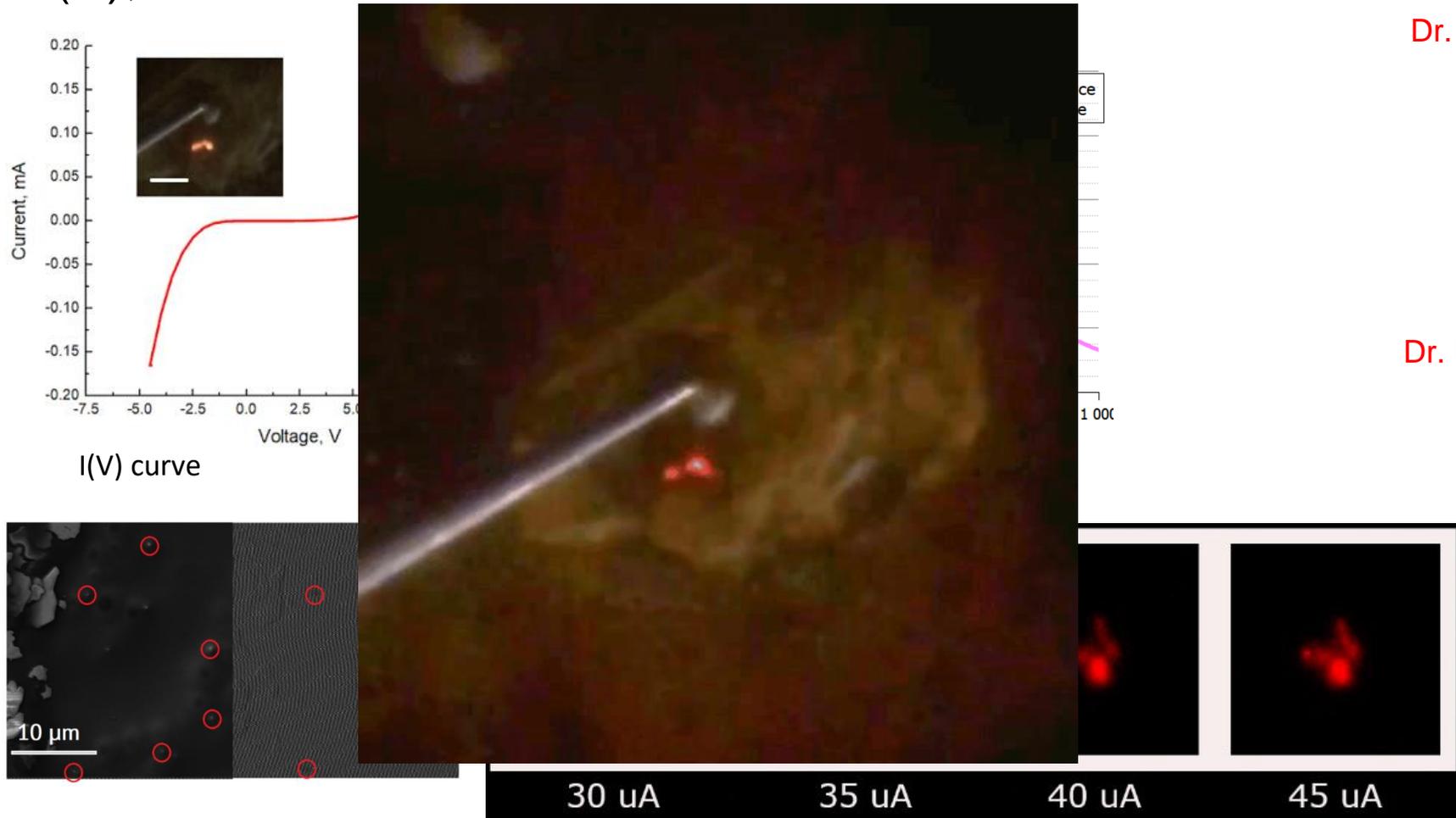


Dr. Vladimir Neplokh



Dr. Fedor Kochetkov

## I(V), EBIC and EL measurements

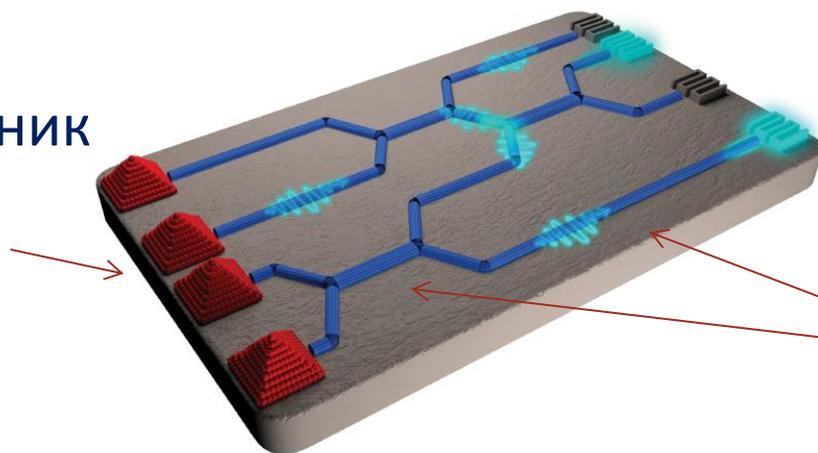


SEM image and EBIC map of NWs connected by SWCNT (red circles)

*Nanomaterials*, 2021  
11(10), 2549.



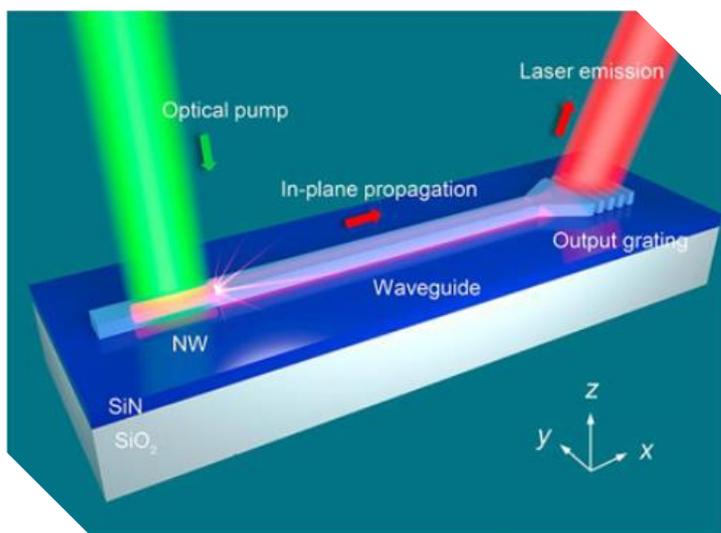
(II) Планарный источник одиночных фотонов



(I) Планарный детектор одиночных фотонов



(III) Планарные волноводы



## Integrating a Nanowire Laser in an on-Chip Photonic Waveguide

Ruixuan Yi, Xutao Zhang, Fanlu Zhang, Linpeng Gu, Qiao Zhang, Liang Fang, Jianlin Zhao, Lan Fu, Hark Hoe Tan, Chennupati Jagadish, and Xuetao Gan\*

Cite this: *Nano Lett.* 2022, 22, 24, 9920–9927  
Publication Date: December 14, 2022  
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c03364>  
Copyright © 2022 American Chemical Society  
[RIGHTS & PERMISSIONS](#)

Article Views | Altmetric | Citations  
**825** | - | -  
[LEARN ABOUT THESE METRICS](#)

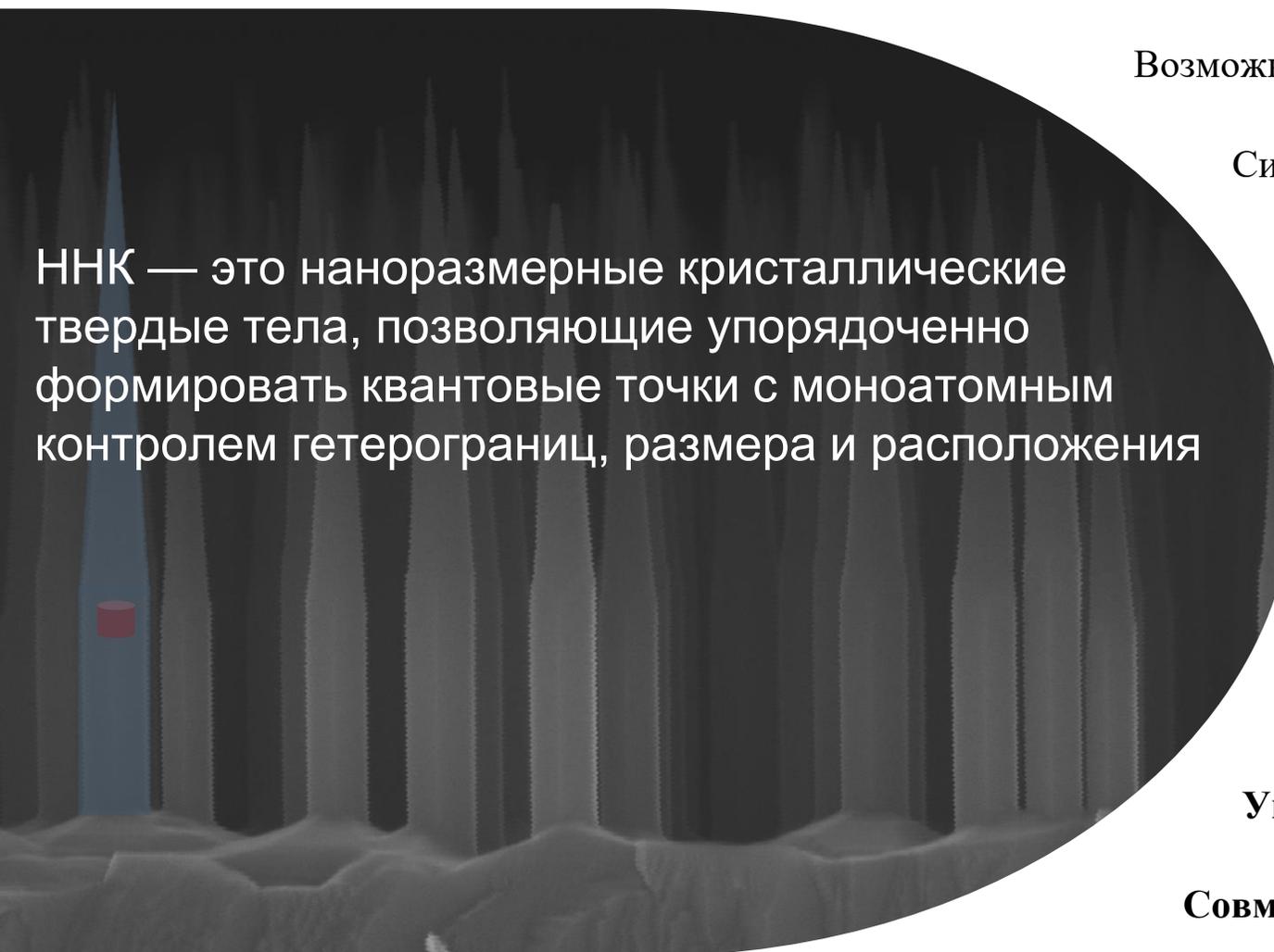


Open Access Published by De Gruyter June 22, 2020

## Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information

Lixing You ✉

From the journal *Nanophotonics*  
<https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0186>



ННК — это наноразмерные кристаллические твердые тела, позволяющие упорядоченно формировать квантовые точки с моноатомным контролем гетерограниц, размера и расположения

## **Уникальная комбинация свойств:**

Возможность создавать объекты переменной размерности в теле ННК

Синтез монокристаллических гетероструктурных ННК на дешёвых подложках (например, Si)

Дешевле в сравнении с традиционными технологиями роста планарных гетероструктур

Оптическая и электрическая накачка одного ННК с КТ

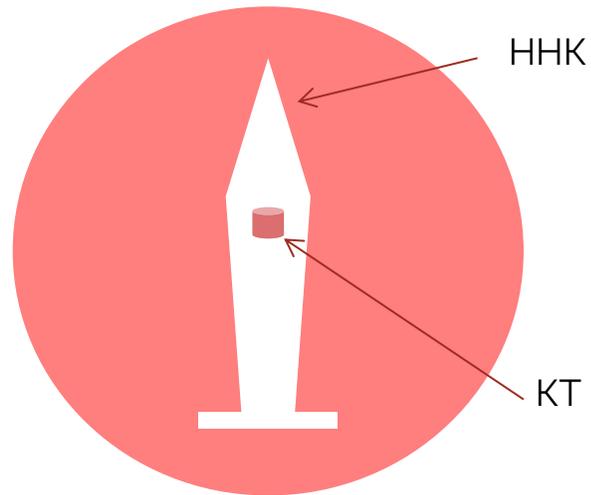
Излучение «по запросу» («on-demand operation»)

**Перенос на заданные поверхности без изменений свойств**

**Управление направленностью излучения**

**Совместимы с интегральными фотонными схемами**

## Нитевидные нанокристаллы с квантовыми точками (группа Г.Э. Цырлина)



**A3B5 низкоразмерные структуры  
на основе нитевидных  
нанокристаллов (ННК) с  
квантовыми точками (КТ)**

Nanowire	Quantum dot	Emission range, nm
AlGaIn	InGaIn	500-700
AlGaAs	GaAs	700-800
AlGaAs	InGaAs	900-1300
InP	InAsP	1300-1600



## AlGaAs ННК



Геометрические параметры ННК:

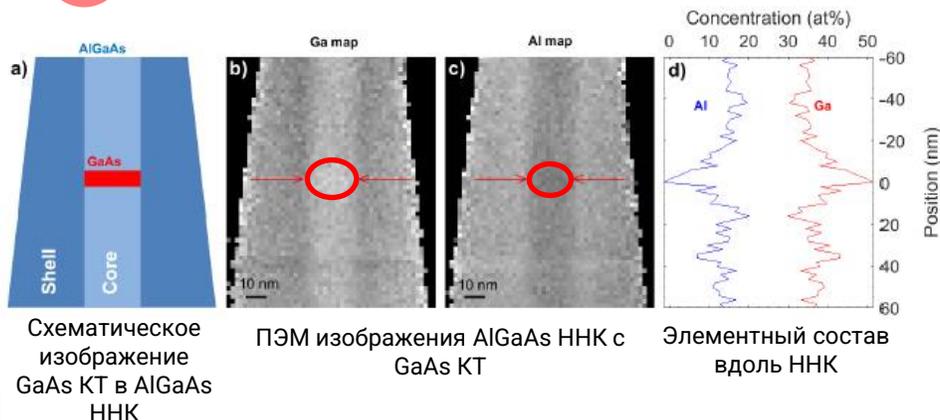
Типичная высота до 10 мкм.  
Задаём временем роста

Типичный диаметр от 10 до 200 нм.  
Задаём размером предварительно осажденных капель, из которых растёт ННК

Плотность ННК  $\sim 10^6 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$   
Задаём плотностью осажденных капель



## КТ GaAs в AlGaAs ННК



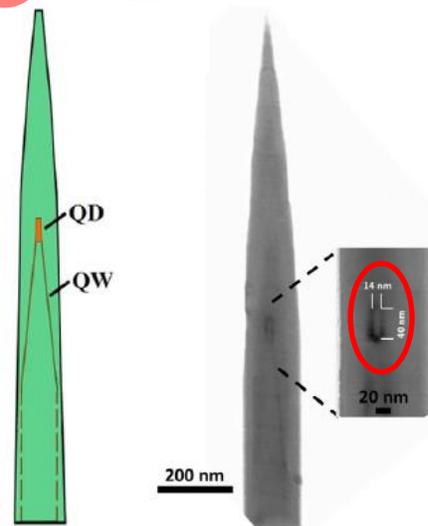
Article | Open Access | Published: 20 January 2020  
**Wurtzite AlGaAs Nanowires**  
 L. Leandro, R. Reznik, J. D. Clement, J. Repán, M. Reynolds, E. V. Ubyivkov, I. V. Shtrom, G. Cirlin & N. Akopian  
 Scientific Reports 10, Article number: 735 (2020) | Cite this article  
**SCIENTIFIC REPORTS**  
 nature research



Research Article  
**Molecular-Beam Epitaxy Growth and Properties of AlGaAs Nanowires with InGaAs Nanostructures**  
 Rodion R. Reznik, Igor V. Il'kiv, Konstantin P. Kotlyar, Vladislav O. Gridchin, Dariya N. Bondarenko, Vera V. Lendyshova, Evgenii V. Ubyivkov, Anna S. Dragunova ... See all authors  
 First published: 08 April 2022 | https://doi.org/10.1002/psrr.202200056



## КТ InGaAs в (Al)GaAs ННК



Схематическое изображение AlGaAs ННК с InGaAs КТ

ПЭМ изображение AlGaAs ННК с InGaAs КТ

News: [Optoelectronics](#)

12 May 2022

InGaAs/AlGaAs nanowires on silicon



Researchers based in Russia report on molecular beam epitaxy (MBE) of indium gallium arsenide (InGaAs) quantum dots/wires (QDs/QWs) in aluminium gallium arsenide (AlGaAs) nanowires (NWs) on silicon (Si) "for the first time" [Rodion R. Reznik et al., Phys. Status Solidi RRL, p2200056, 2022].

### Direct Band Gap AlGaAs Wurtzite Nanowires

Daniele Baretin\*, Igor V. Shtrom, Rodion R. Reznik, Sergey V. Mikushev, George E. Cirlin, Matthias Auf der Maur, and Nika Akopian

Cite this: *Nano Lett.* 2023, 23, 3, 895–901  
 Publication Date: January 17, 2023  
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04184>  
 Copyright © 2023 American Chemical Society  
[RIGHTS & PERMISSIONS](#)

Article Views 296  
 Altmetric -  
 Citations -  
[LEARN ABOUT THESE METRICS](#)



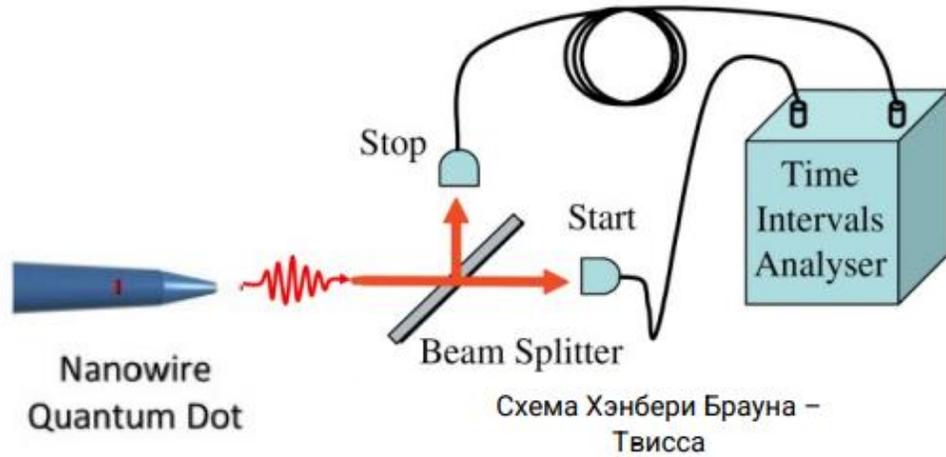
### Nanowire Quantum Dots Tuned to Atomic Resonances

Lorenzo Leandro, Christine P. Gunnarsson, Rodion Reznik, Klaus D. Jöns, Igor Shtrom, Artem Khrebtov, Takeshi Kasama, Valery Zwiller, George Cirlin, and Nika Akopian\*

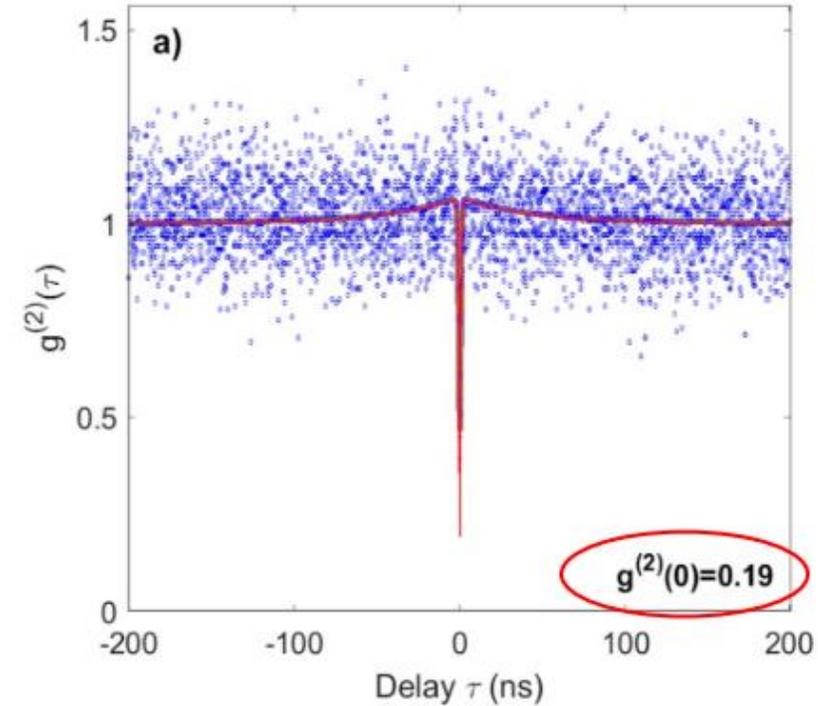
Cite this: *Nano Lett.* 2018, 18, 11, 7217–7221  
 Publication Date: October 15, 2018  
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b03363>  
 Copyright © 2018 American Chemical Society  
[RIGHTS & PERMISSIONS](#)

Article Views 1486  
 Altmetric 1  
 Citations 29  
[LEARN ABOUT THESE METRICS](#)





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



0.01 now

Autocorrelation measurements  
 $g^{(2)}(\tau)$  of AlGaAs NWs with GaAs QDs

**NANO** LETTERS

Communication

## Nanowire quantum dots tuned to atomic resonances

Lorenzo Leandro, Christine Pepke Gunnarsson, Rodion Reznik, Klaus Dieter Jöns, Igor V. Shtrom, Artem I. Khrebtov, Takeshi Kasama, Valery Zwiller, George E Cirlin, and Nika Akopian

Nano Lett., Just Accepted Manuscript • DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b03363 • Publication Date (Web): 15 Oct 2018

npj | Quantum Information

Article | Open Access | Published: 04 December 2020

## Resonant excitation of nanowire quantum dots

Lorenzo Leandro, Jacob Hastrup, Rodion Reznik, George Cirlin & Nika Akopian

npj Quantum Information 6, Article number: 93 (2020) | Cite this article

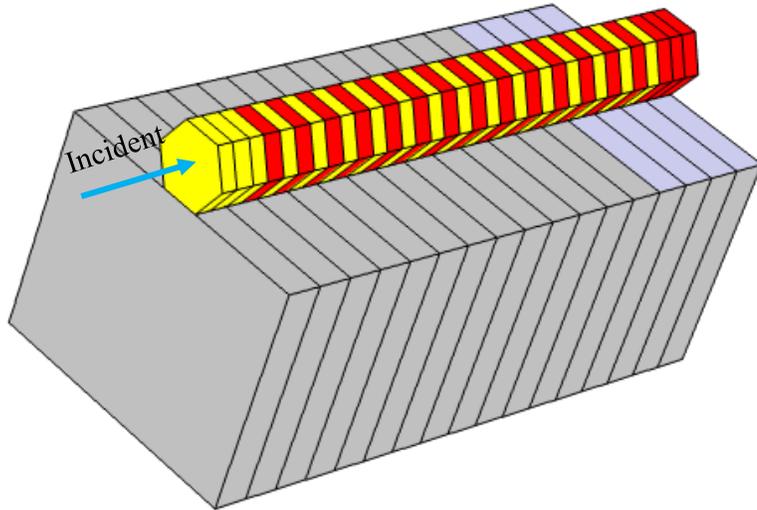
# Bragg Mirror Reflection (Bragg Mirror Wavelength)

Hangkai Fan, Andrey Bogdanov



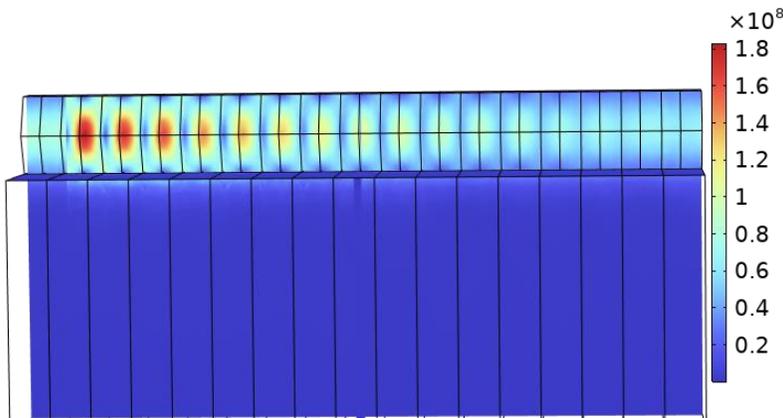
哈爾濱工程大學  
HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

Bragg Mirror wavelength in 700nm

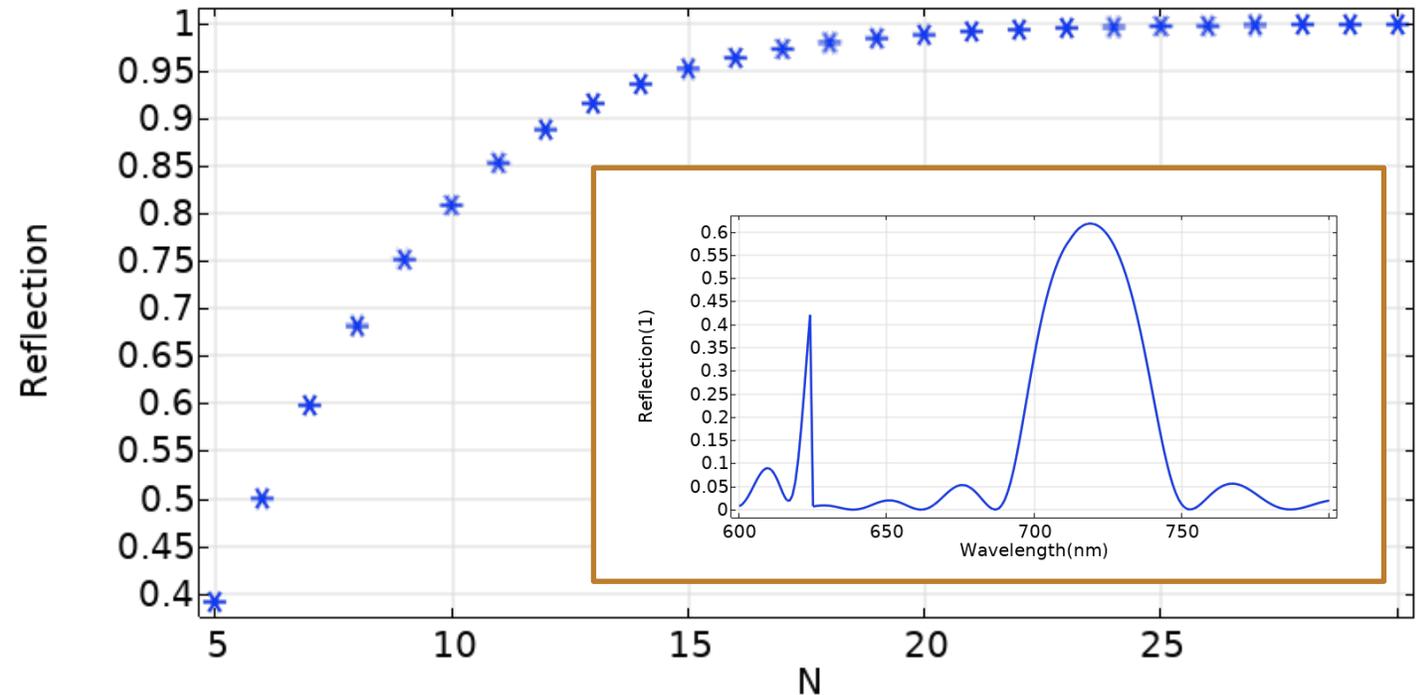


Name	Expression	Value	Description
h0	250[nm]	2.5E-7 m	Diameter
h1	0.8[um]	8E-7 m	
w1	1.4[um]	1.4E-6 m	
pml	200[nm]	2E-7 m	
lda_B	700[nm]	7E-7 m	Bragg Wavelength
d1	lda_B/4/neff_GaPAs[nm]	60.076	GaPAs
d2	lda_B/4/neff_GaP[nm]	67.988	GaP
d	d1+d2	128.06	period

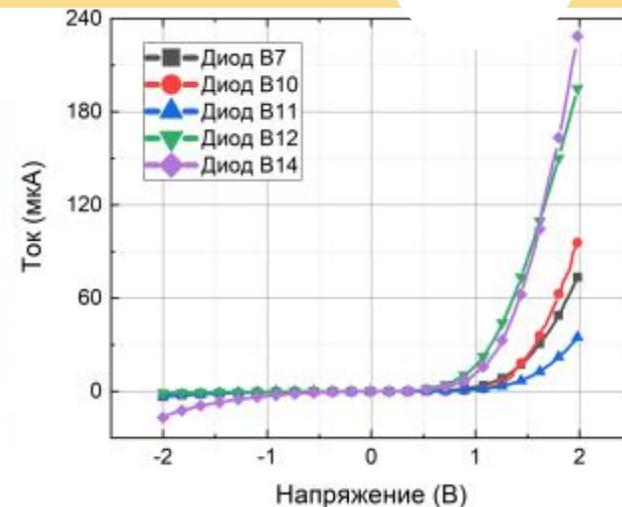
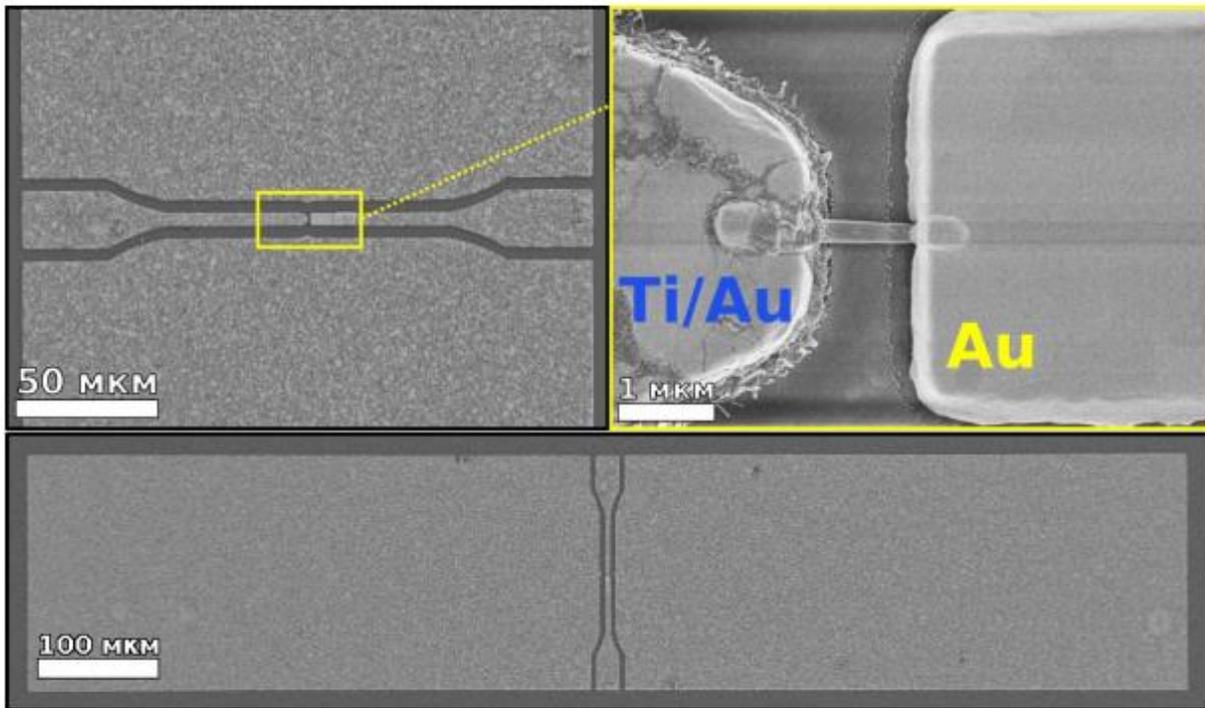
$$R_0 = \left[ \frac{(n_H / n_L)^{2N} - n_s}{(n_H / n_L)^{2N} + n_s} \right]^2$$



E field in 720nm wavelength

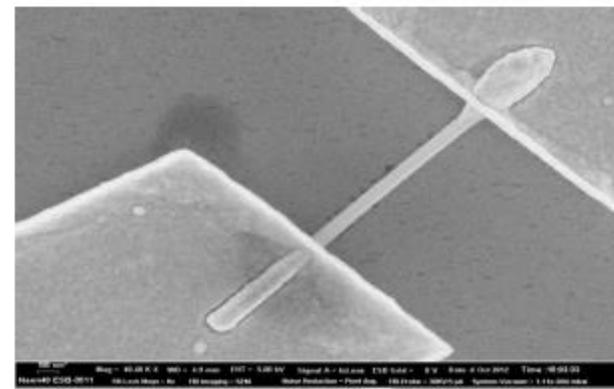
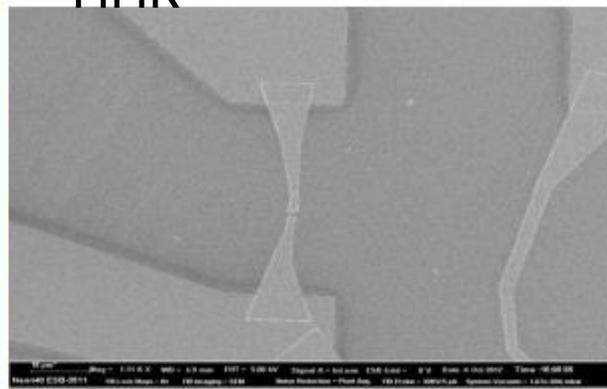


# Формирование контактов к одиночным ННК: задел

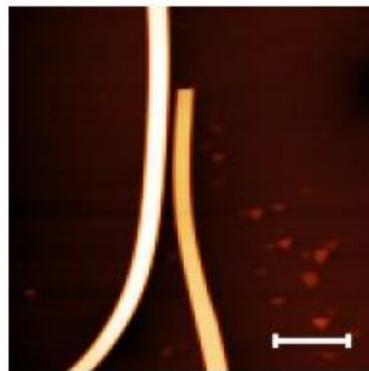
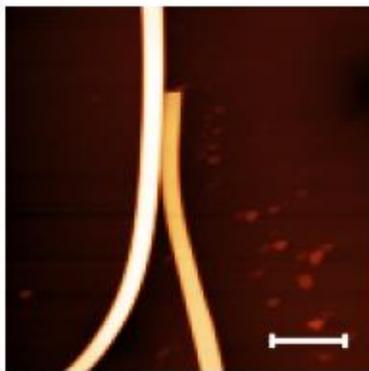
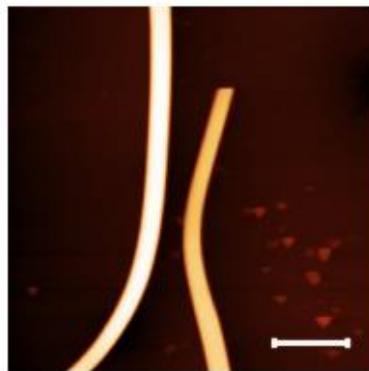
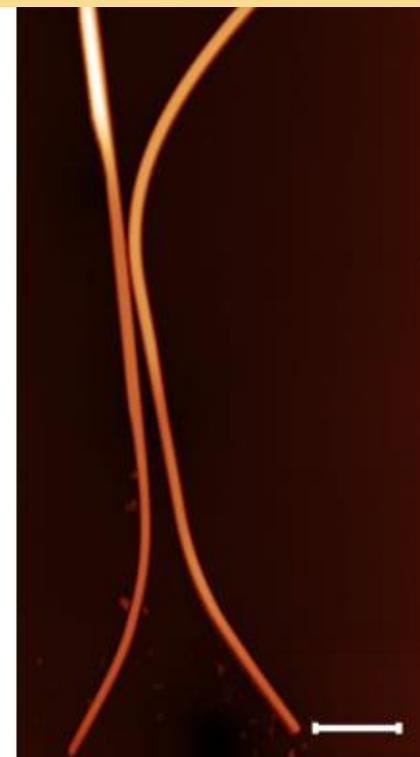
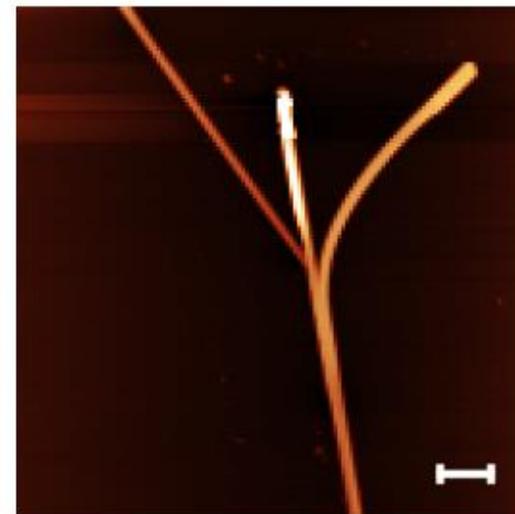
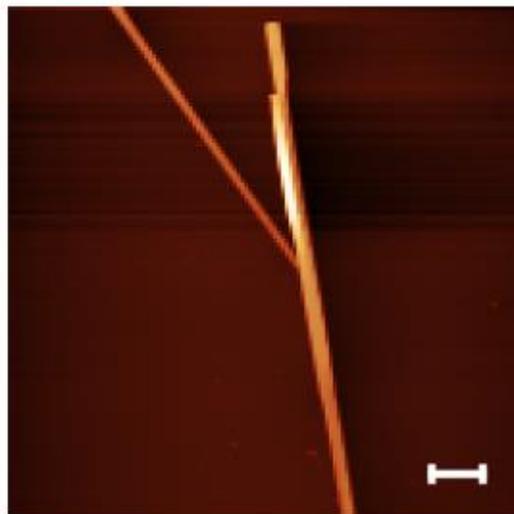
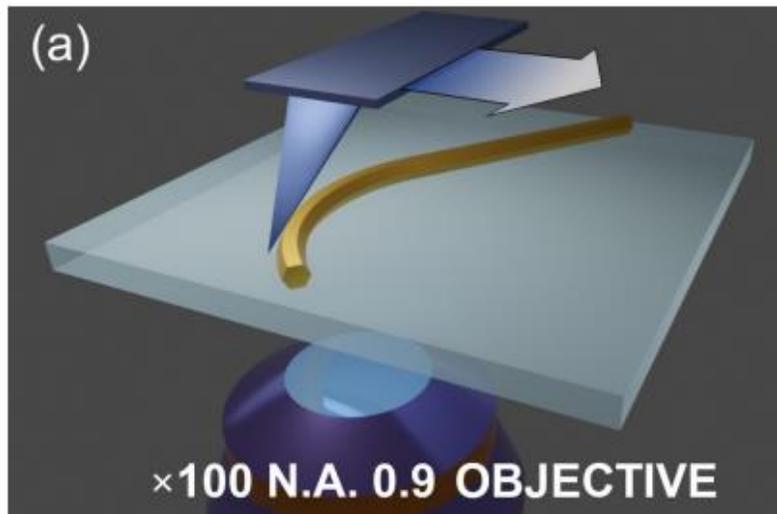


СЭМ изображения диодной/транзисторной структуры на основе одиночного ННК

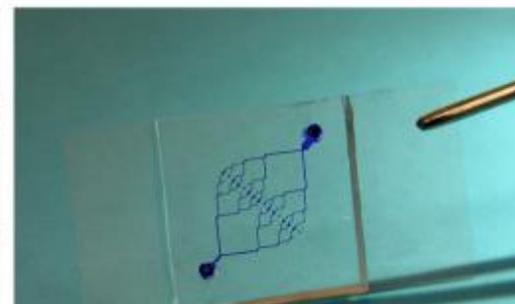
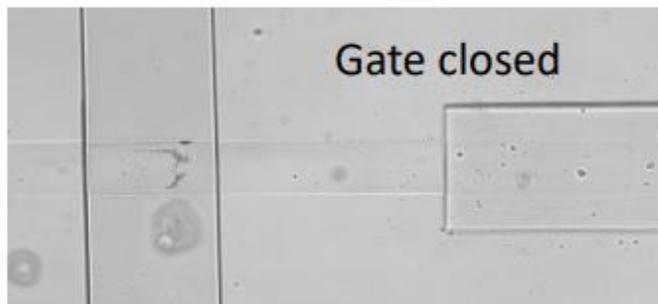
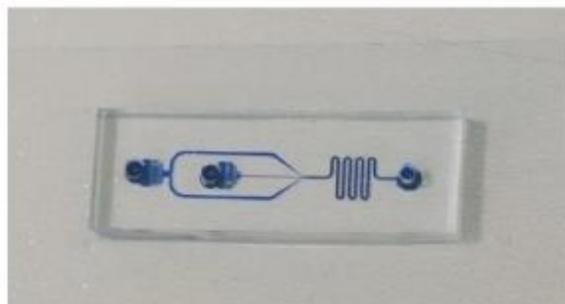
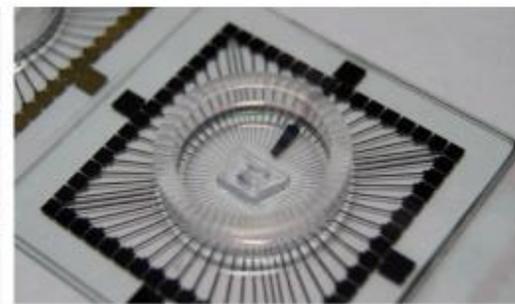
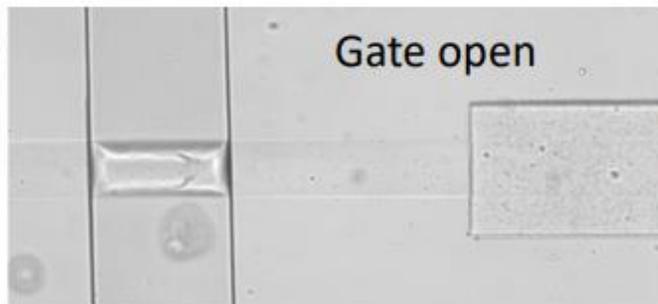
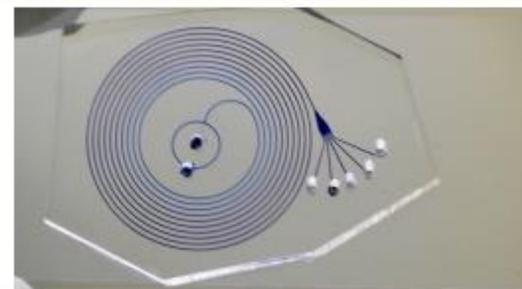
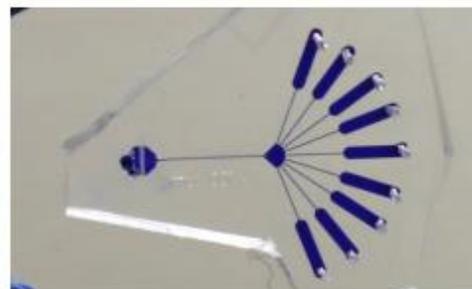
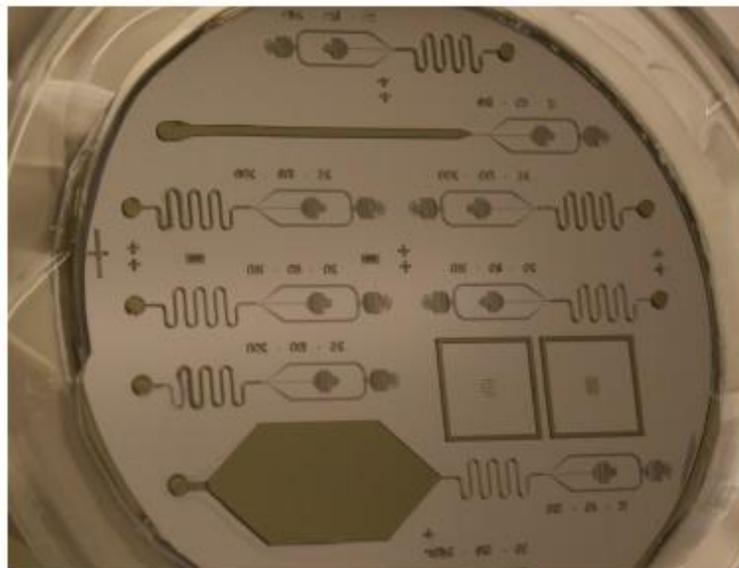
Омические контакты к одиночным GaAs и GaN ННК



# Манипулирование одиночными ННК с помощью зонда АСМ



# Микрофлюидные чипы для манипулирования НКК

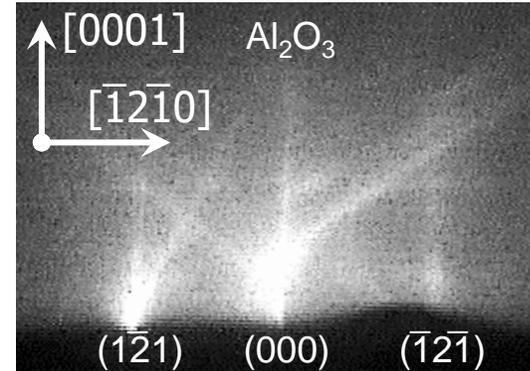
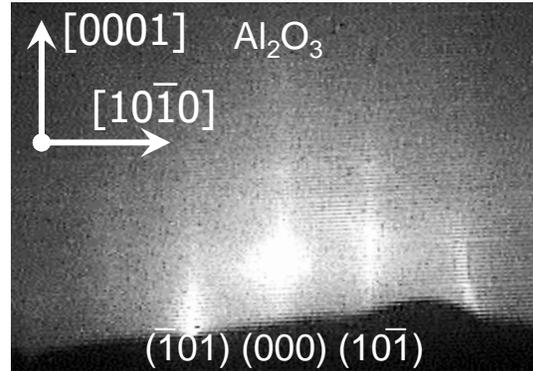


- GaP слои с шероховатостью менее 3 нм эпитаксиально выращены на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) подложках диаметром 2 дюйма
- Реализуется режим роста с эпитаксиальным согласованием доменов
- Показатель преломления пленок близок к объемному GaP  $\Delta n \approx -0.05$
- Пленки толщиной от 500 нм характеризуются спектральными оптическими свойствами близкими к объемным
- Электронная литография и травление фокусированным ионным пучком позволяют создавать микро- и наноструктуры, волноводы
- Высокие нелинейные свойства GaP на  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- Интеграция с источниками одиночных фотонов на основе квантовых точек в нитевидных нанокристаллах
- **Планарные слои GaP и НК АЗВ5 - материальная платформа для создания фотонных интегральных схем**

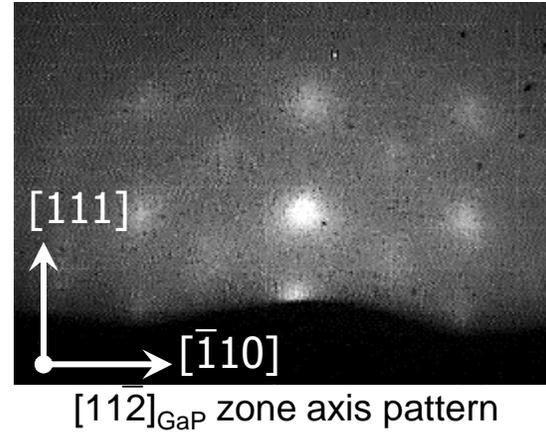
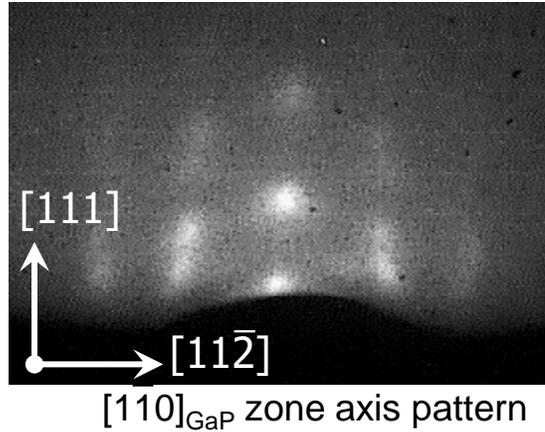
**Спасибо за внимание**

**[imukhin@yandex.ru](mailto:imukhin@yandex.ru)**

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrate prior to the growth



Low-T growth



High-T growth

