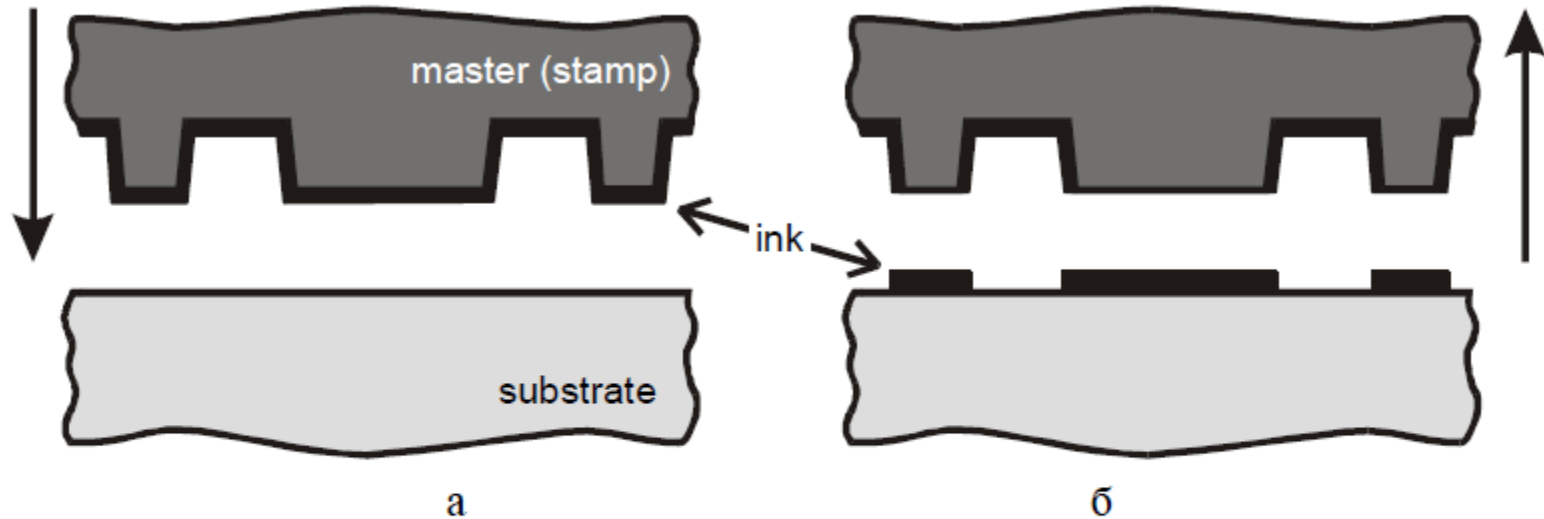


**Процеси  
самоорганізації.  
Квантові точки,  
квантові шнури, та  
квантові ями.**

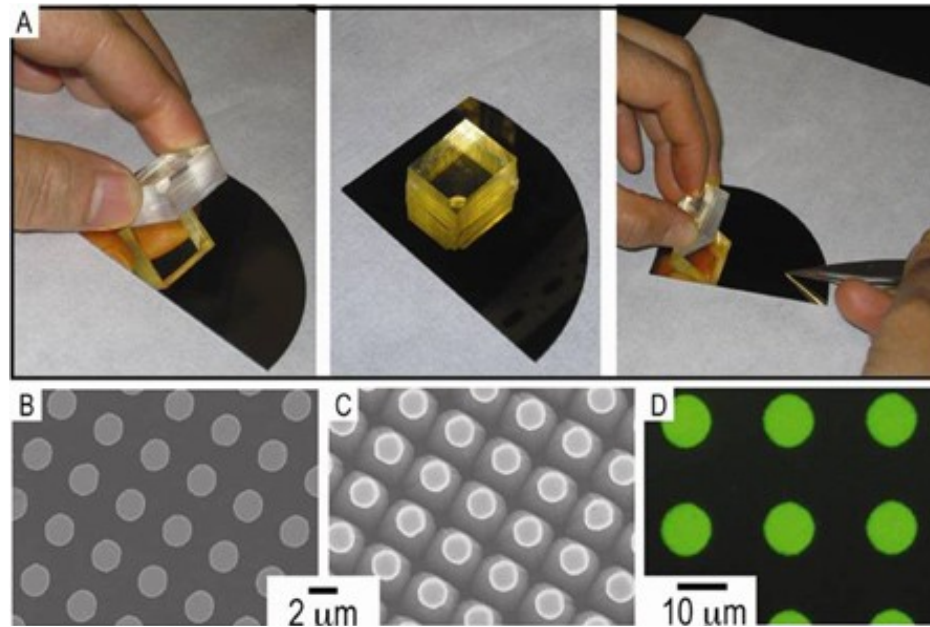
# Нанодрук



**Рис. 3.11. Чернильная печать**

а – штамп, покрытый чернилами из мономера, и подложка перед печатью;  
б – рисунок пленки, оставшейся на поверхности подложки после удаления штампа

# Приклади структур, створених по технології нанодруку



(A) Photographs of three major steps involved in  $\mu$ CP. (B) An SEM image of silver disks fabricated by  $\mu$ CP of SAM followed by selective etching of silver film. (C) An SEM image of structures fabricated by using silver (B) as resist layer for underneath Si(100) etching. (D) Fluorescence optical micrograph of an array of IgG dots fabricated by  $\mu$ CP.

# Молекулярно-пременеві методи

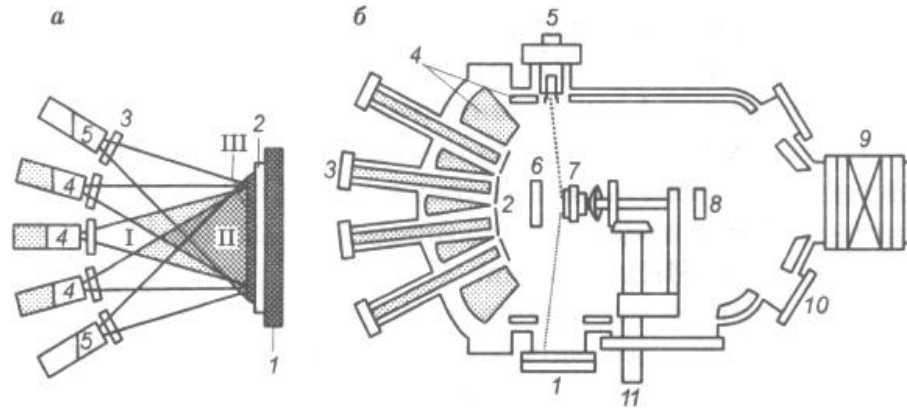


Рис. 8.1

Схема эпитаксиального наращивания (а)  
и общая схема ростовой камеры (б)

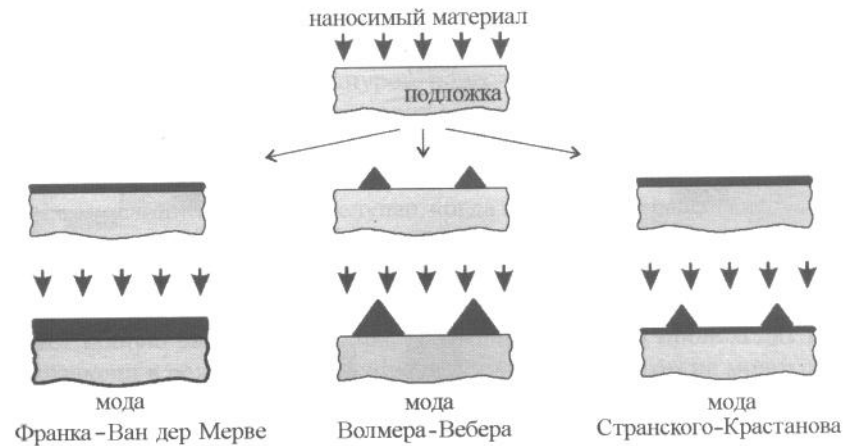
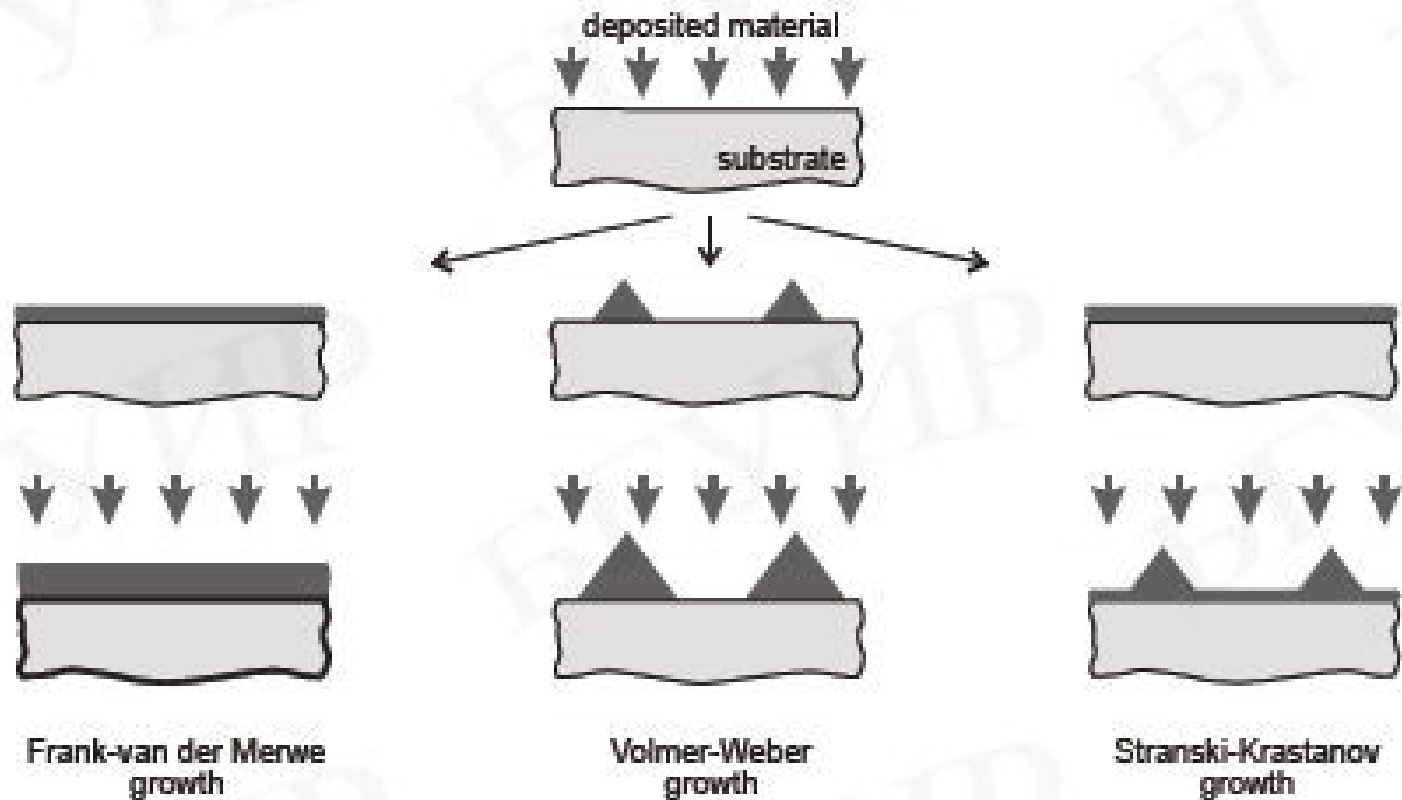
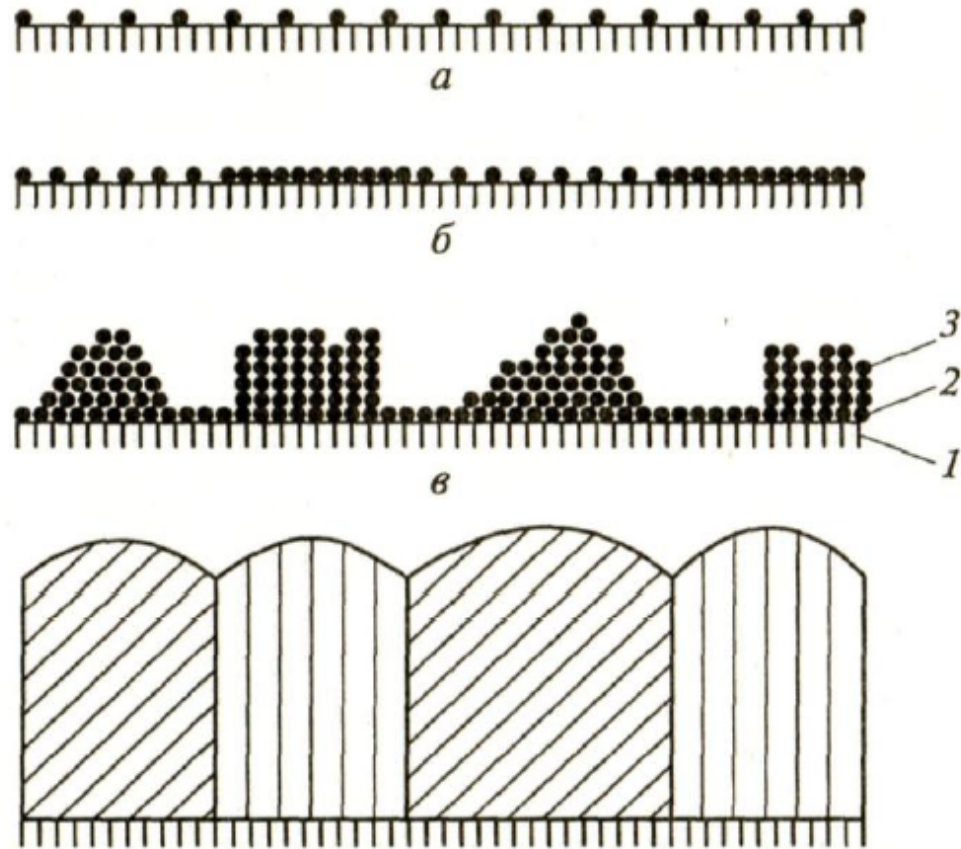


Рис. 2.17. Режимы роста тонких пленок

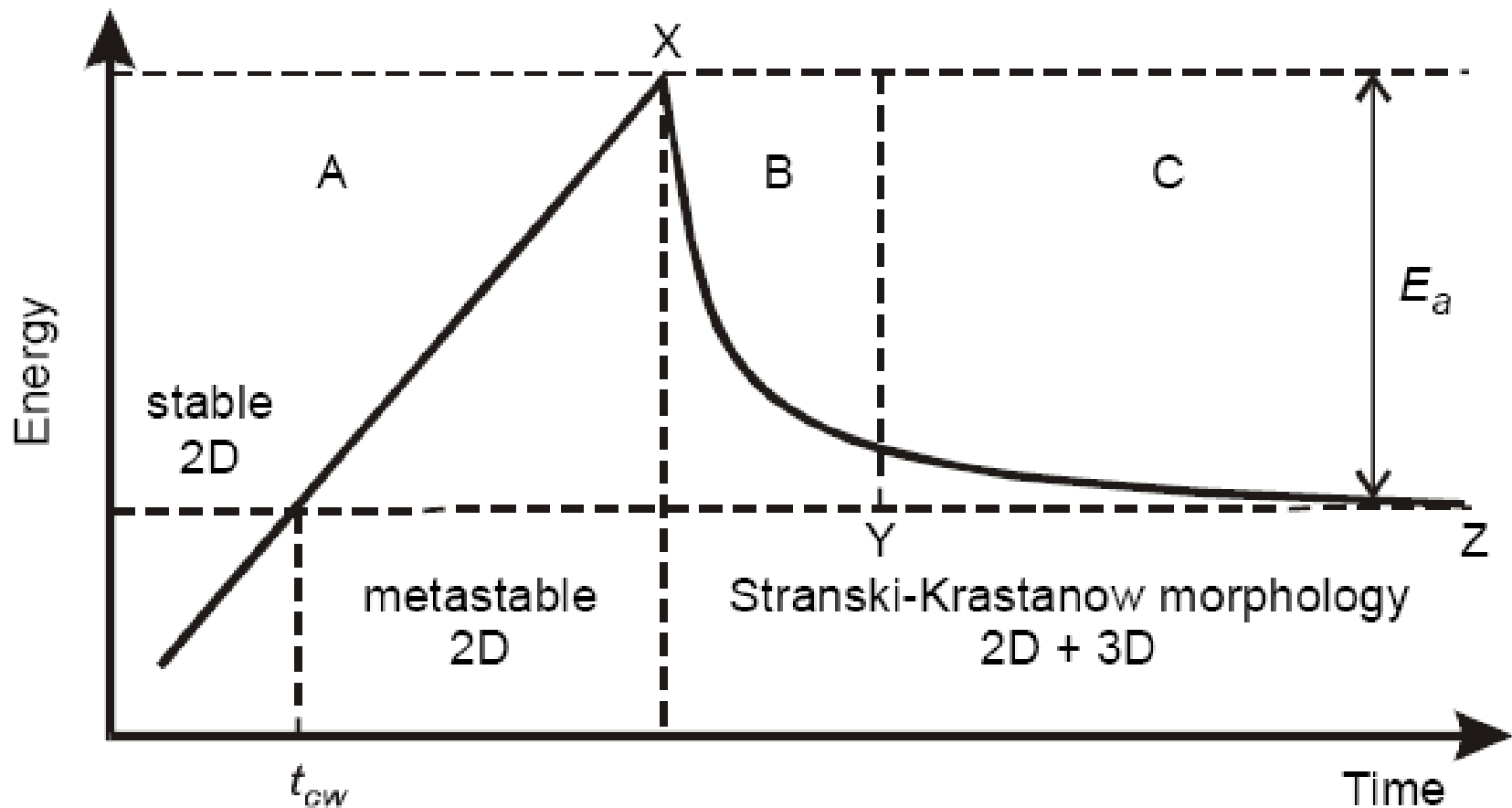
# Самоорганізація



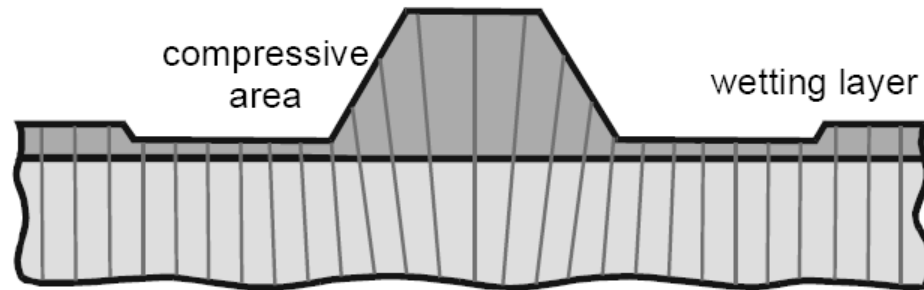
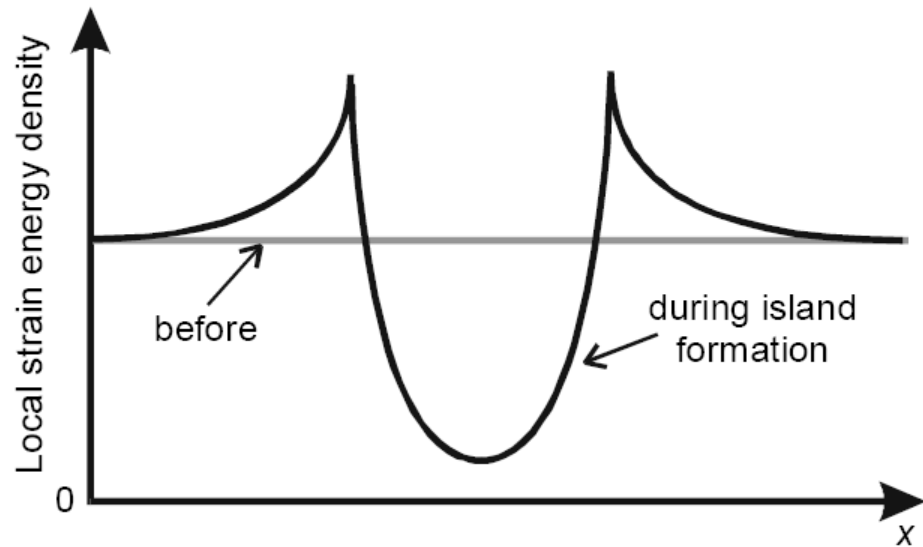
# Структурні перетворення в режимі Странскі-Крастанова



# Залежність повної енергії від часу формування

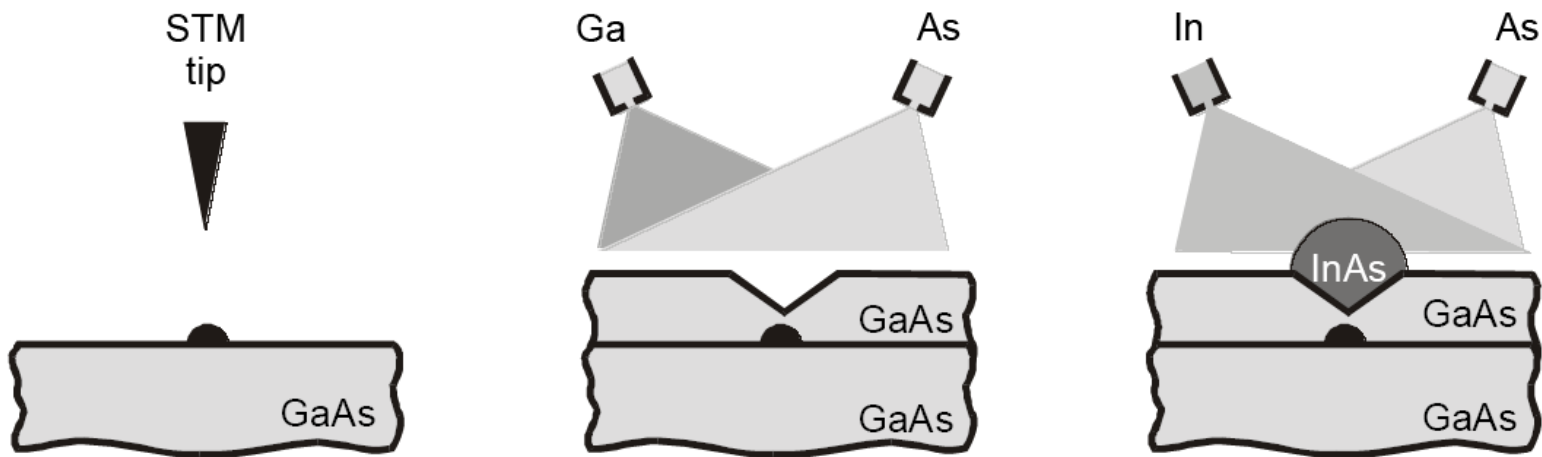


# Локальні напруження навколо квантової точки





# Метод модифікації зондом



# Квантові колодязі

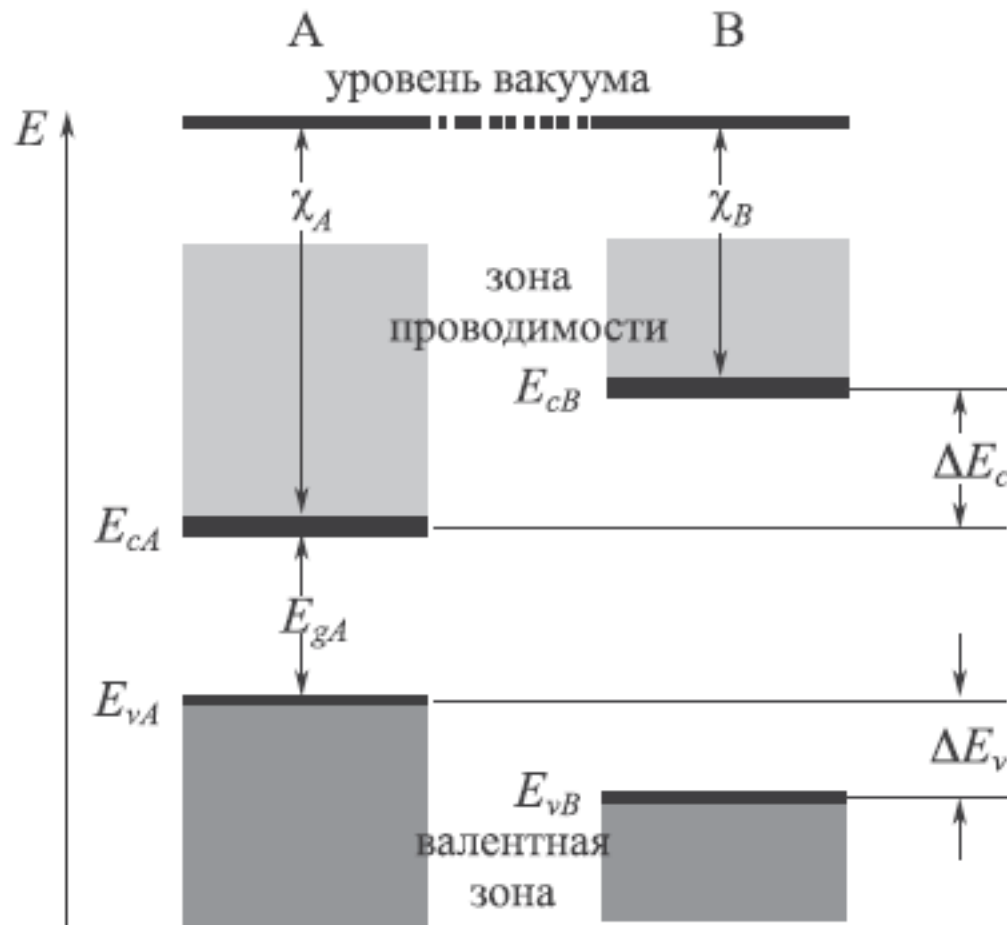
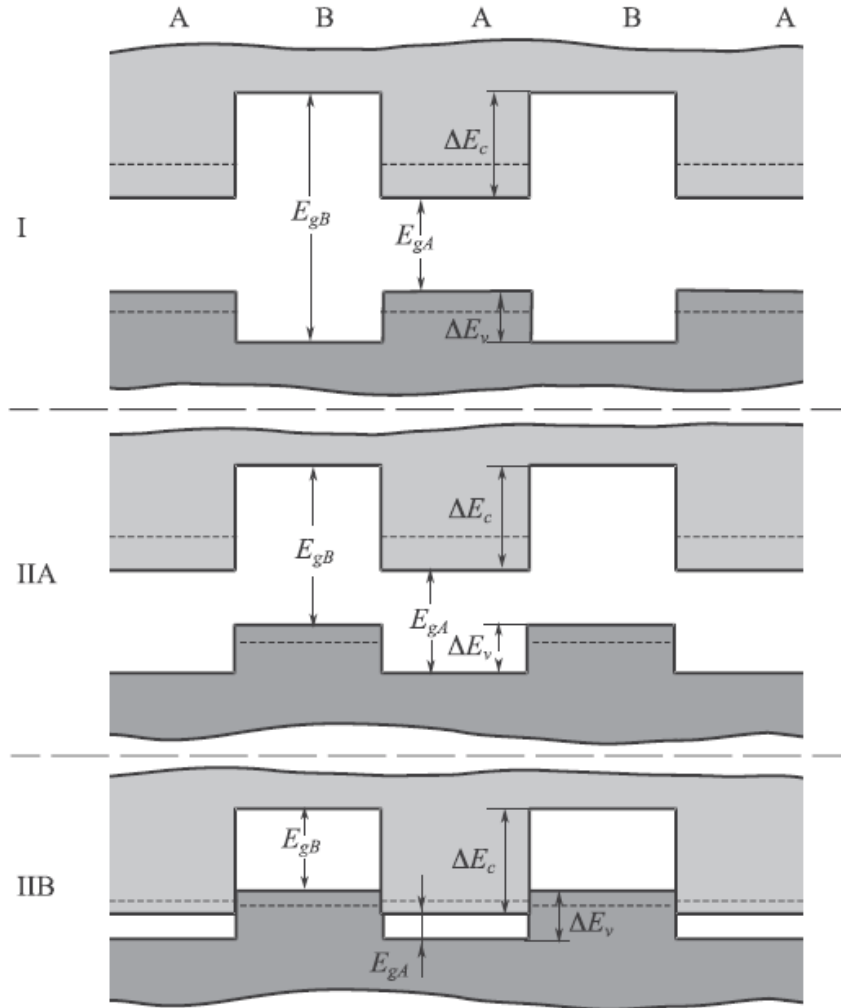


Рис. 1.10. Согласование энергетических зон на границе гетероперехода в соответствии с правилом Андерсона

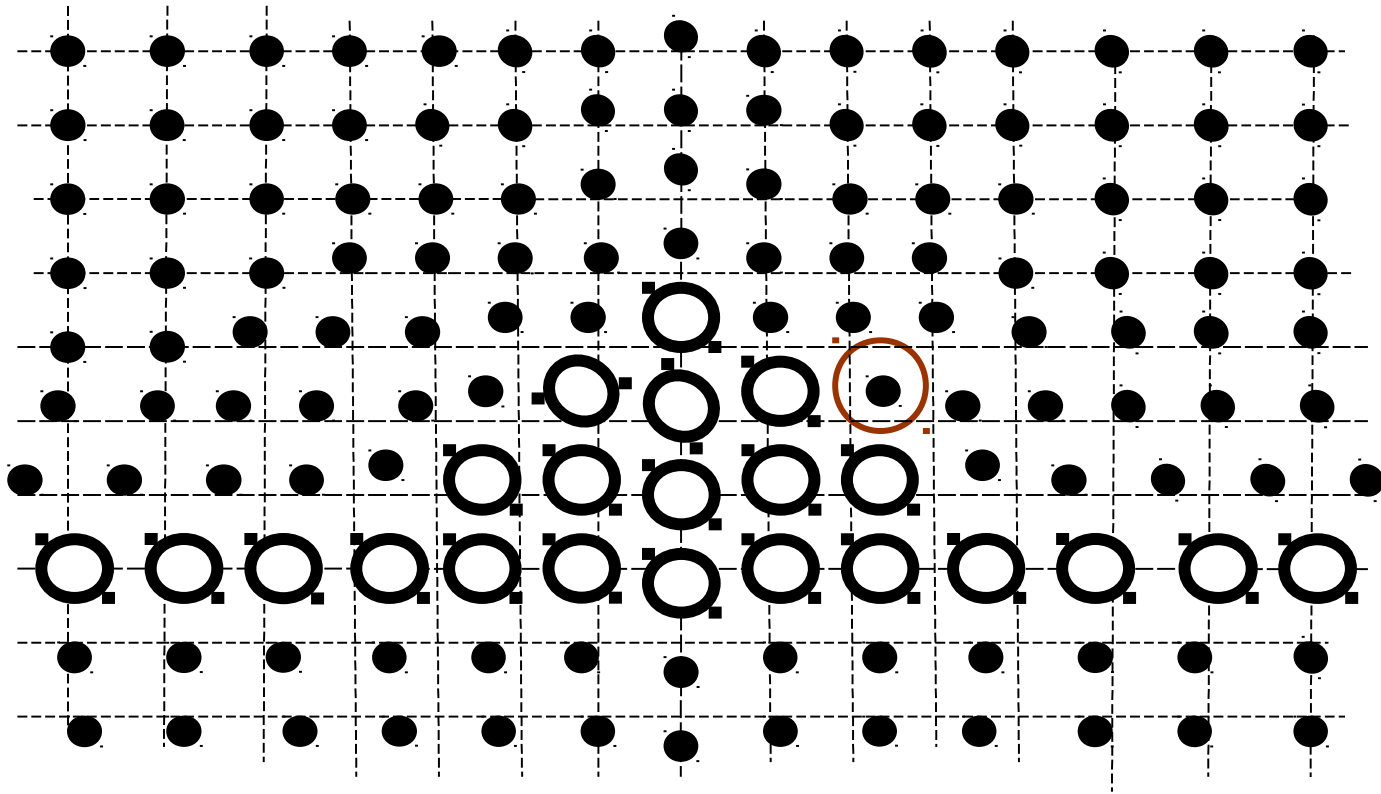
# Розташування зон в квантових колодцях

## КОЛОДЦЯХ

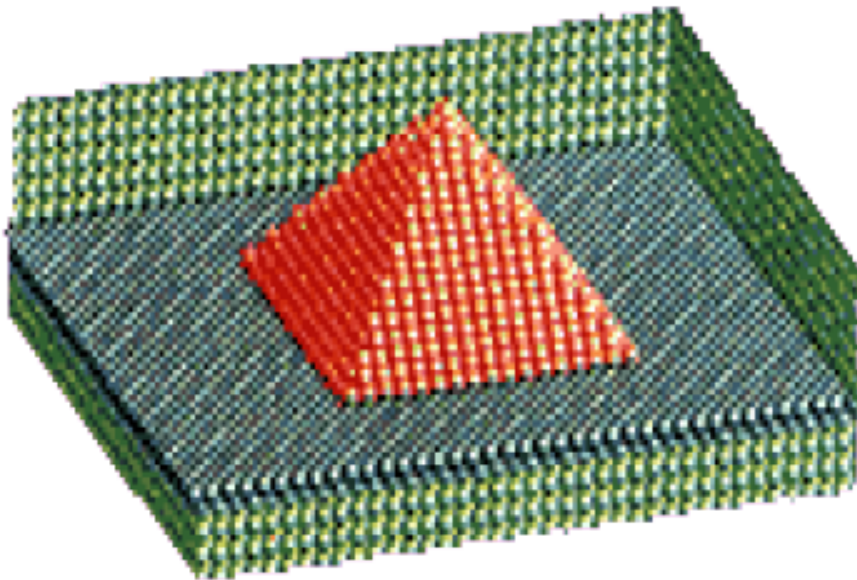


**Рис. 1.11.** Расположение энергетических зон в квантовых колодцах, образованных узкозонным материалом А и широкозонным материалом В. Пунктирными линиями обозначены минимальные уровни энергии электронов и дырок, разрешенные в соответствии с квантовым ограничением

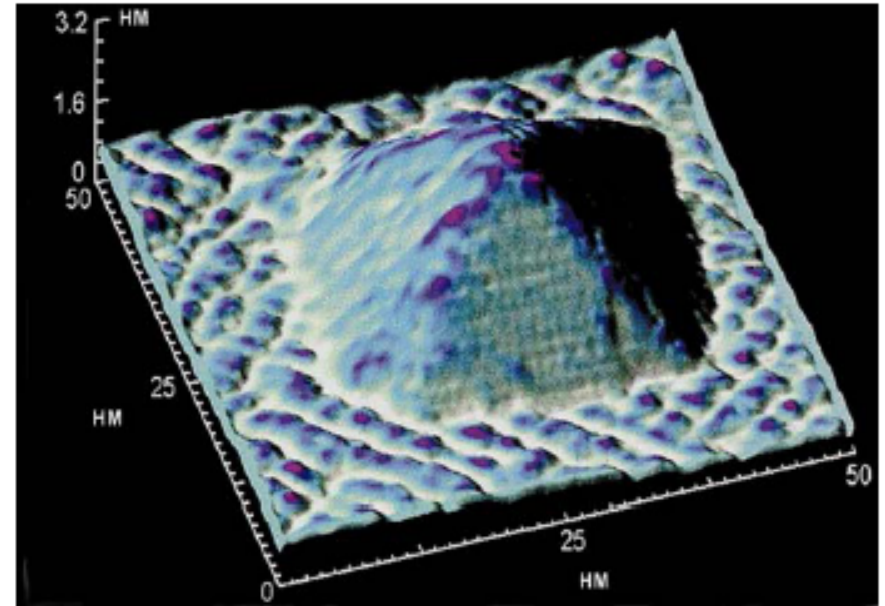
# Схематичне зображення кубічної ґратки, в якій сформована КТ



# Пірамідальні квантові ТОЧКИ



а



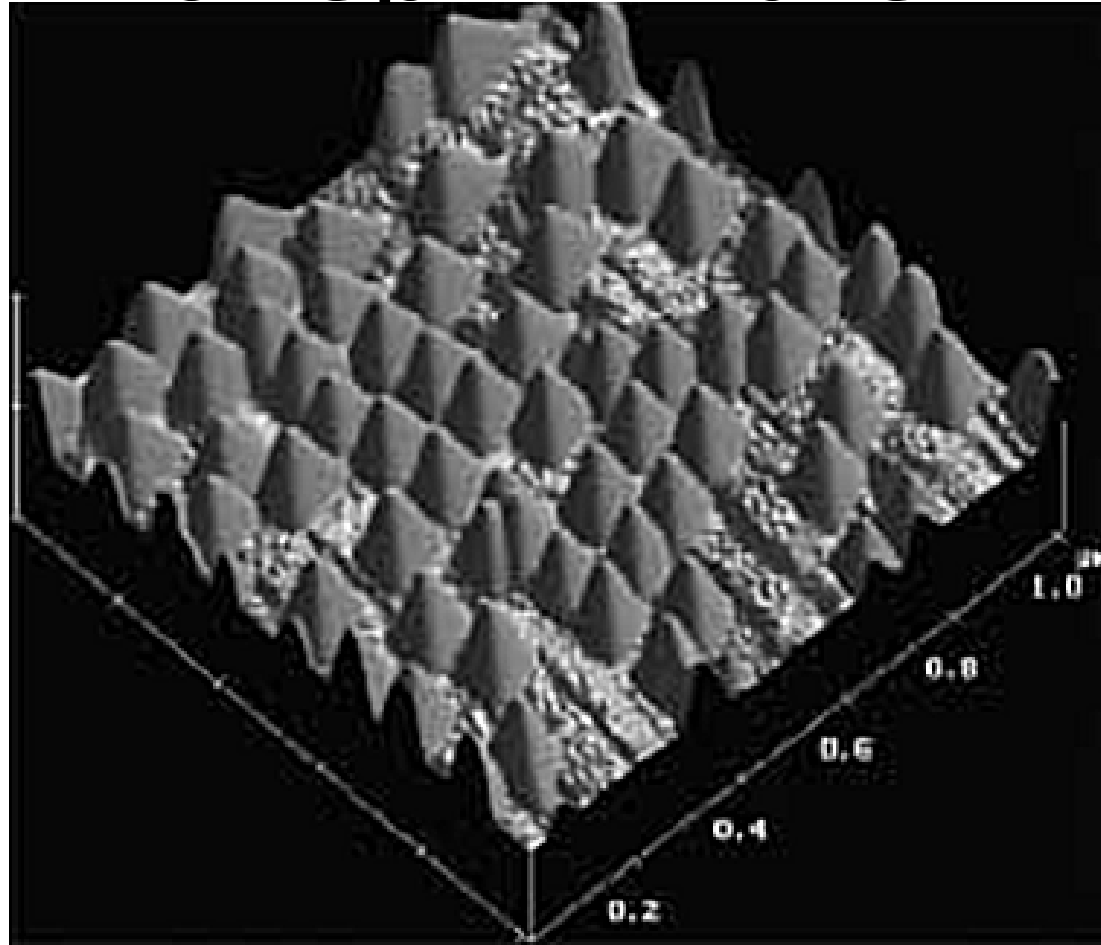
б

Об'ємне зображення квантової точки – пірамідки з атомів германію, спонтанно сформованої на кремнієвій підкладці:

*а – комп'ютерна модель;*

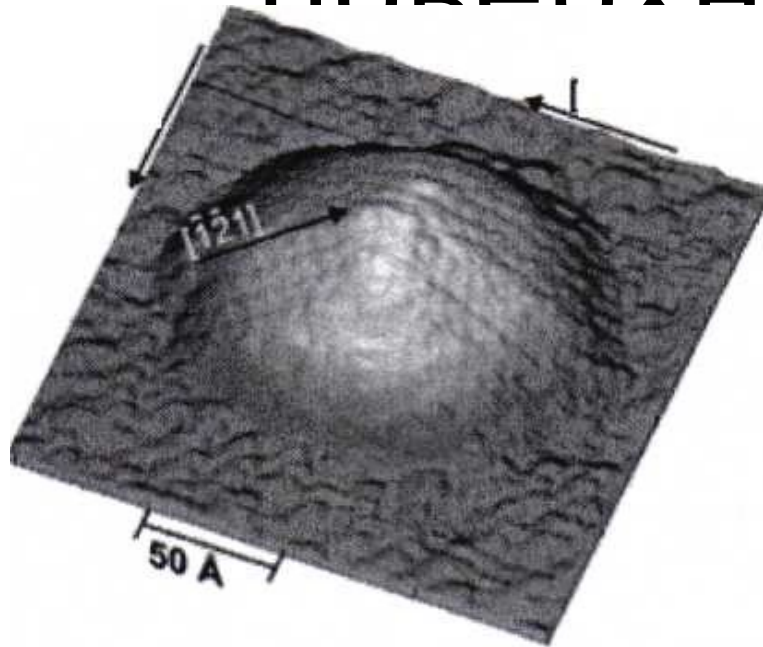
*б – зображення зі скануючого електронного мікроскопа.*

# Квантові точки PbSe на поверхні PbTe

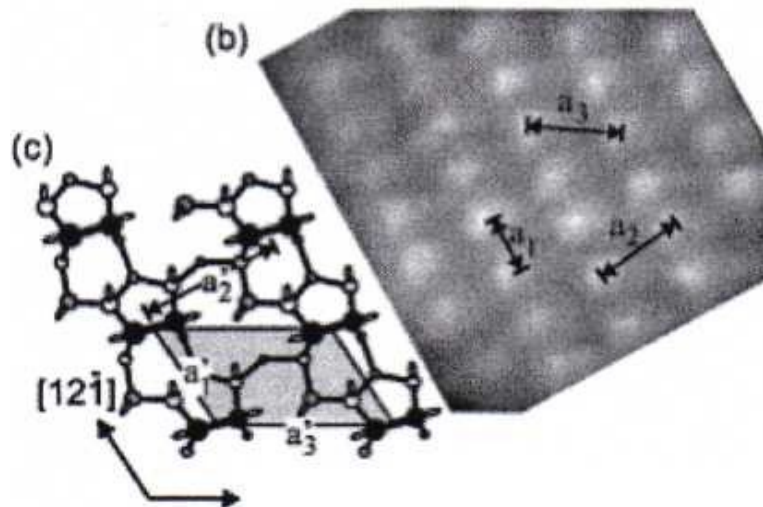


Вигляд квантових точок PbSe на поверхні шару PbTe, що отримано за допомогою атомно – силової мікроскопії

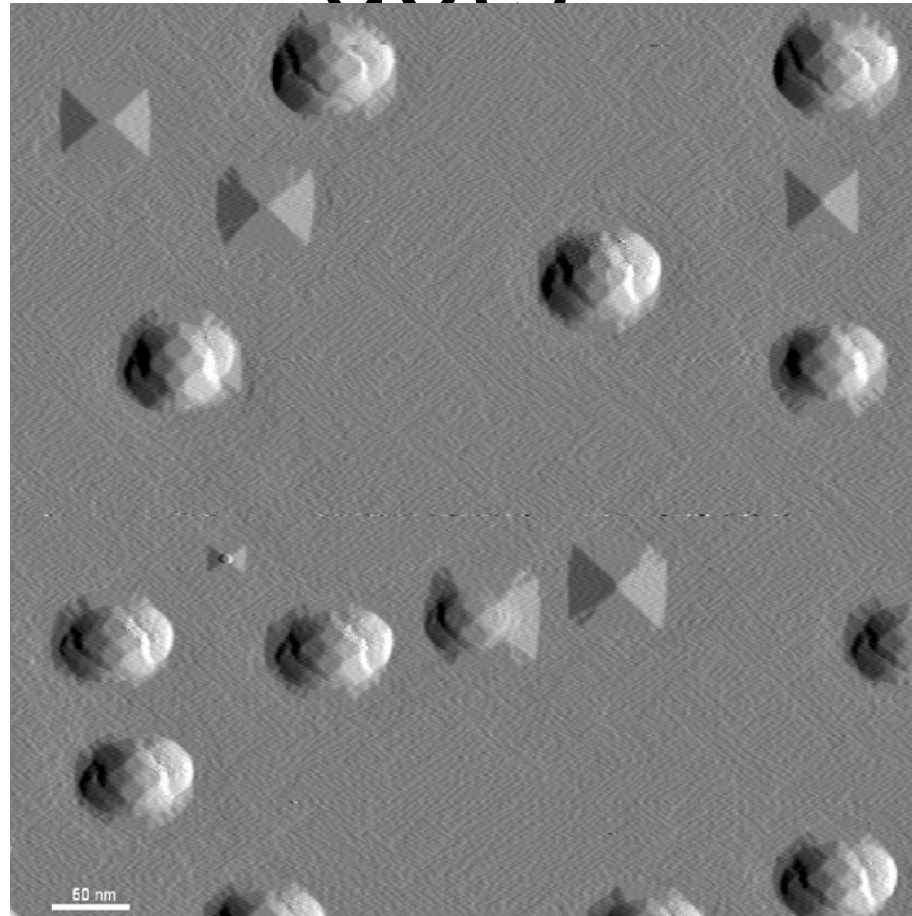
# Квантові точки InAs на поверхні GaAs



(a) Тривимірне зображення квантової точки,  
(b) Більш детальне зображення однієї з граней,  
(c) Модель реконструйованої поверхні грані (чорні і сірі кульки - атоми миш'яку (As), світлі - індію (In)).



# Hut and domes quantum dots



STM picture of Ge QDs on Si (uncapped sample). Two types of clusters are visible, domes and huts. The ratio of domes to huts is 87:17.



# Розміри КТ, для яких виконуються умови квантування

$$\Delta E_c > \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e^* D_{\min}^2} E_1$$

Тут  $\Delta E_c$  - величину розриву в зоні провідності,  $m_e^*$  - ефективна маса електрона,  $E_1$  - перший рівень в прямокутній квантовій ямі (КЯ) з нескінченними стінками та шириною  $D_{\min}$ .

Припускаючи величину розриву в зоні провідності порядку 0.3 еВ, що є типовою для прямозонних КЯ в системі GaAs-Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As, отримуємо, що діаметр КТ не повинен бути меншим за 40 Å.

Тут  $E_1$ ,  $E_2$  - енергії першого та другого рівнів розмірного квантування, відповідно.

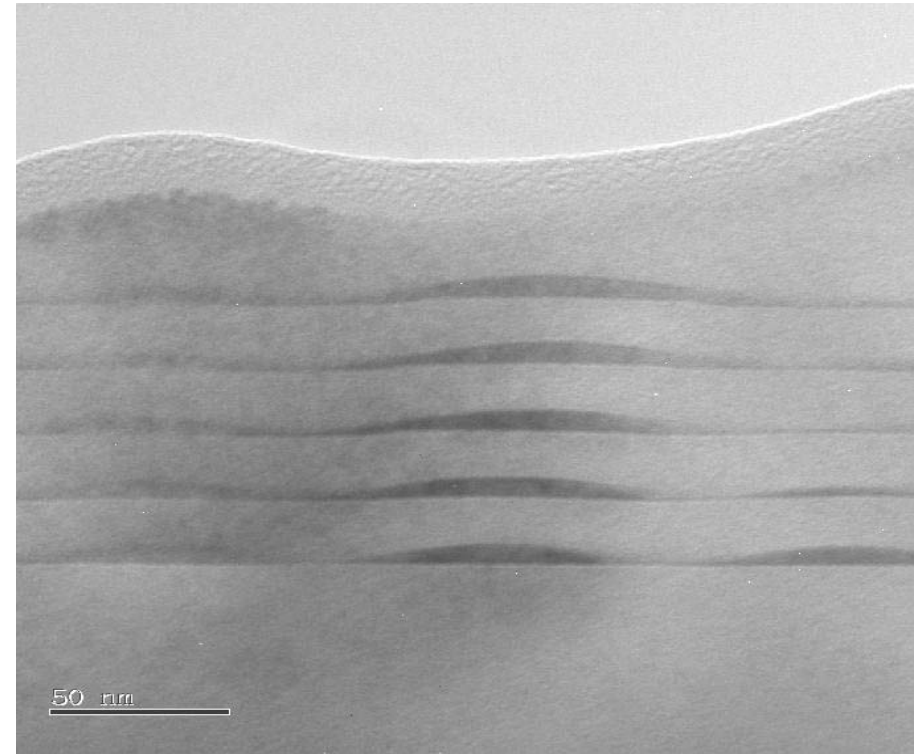
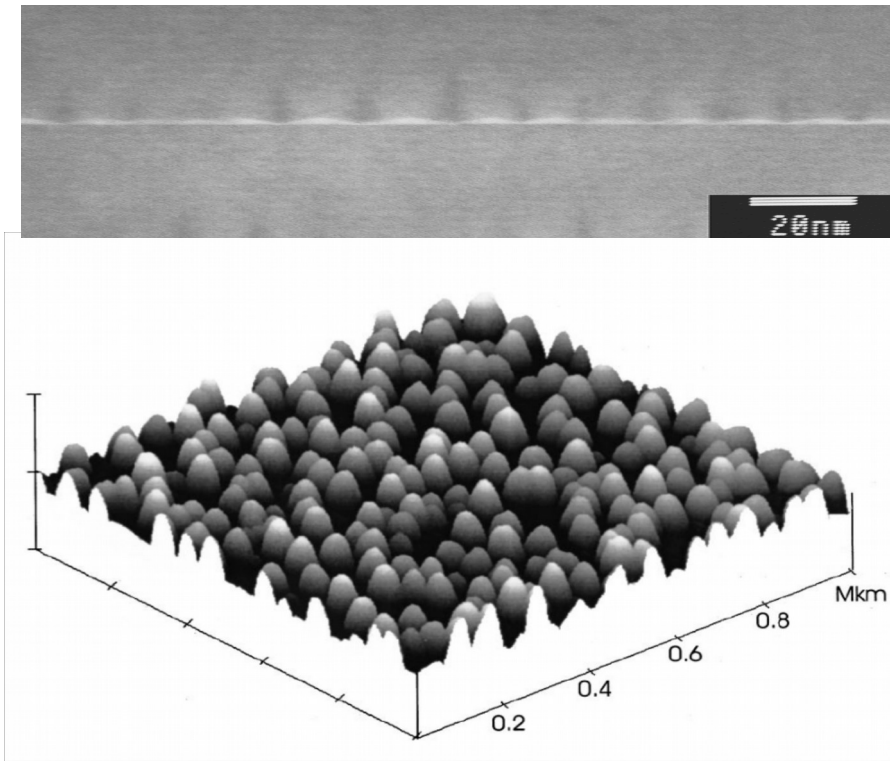
Якщо відстань між енергетичними рівнями стає співмірною з тепловою ( $kT$ ) енергією, то зростає заселеність високих рівнів. Для квантових точок умова, при якій заселенням більш високо розташованих рівнів можна знехтувати.

$$kT \ll \frac{1}{3} (E_2 - E_1)$$

# Приклади структур з масивами квантових точок (КТ)

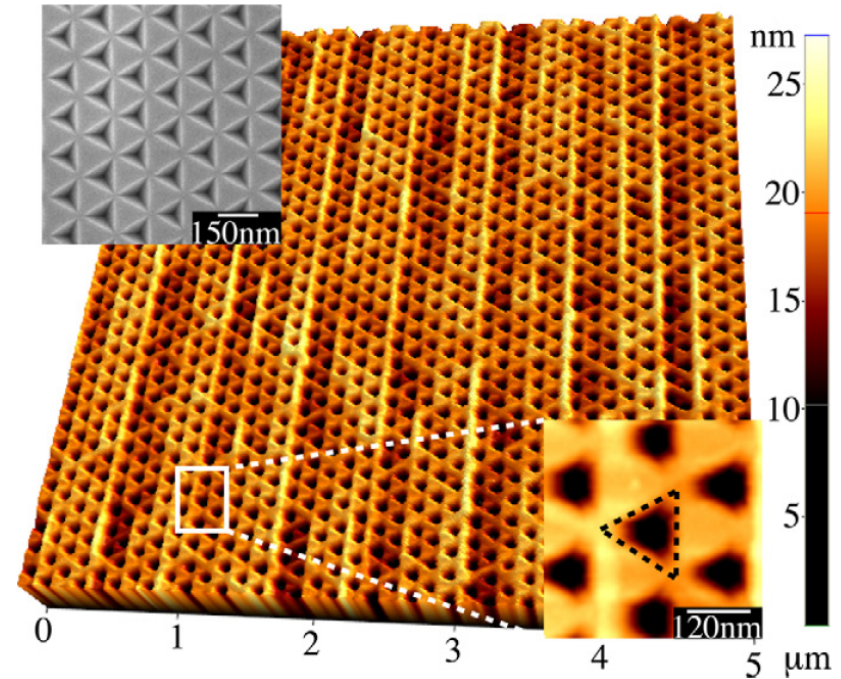
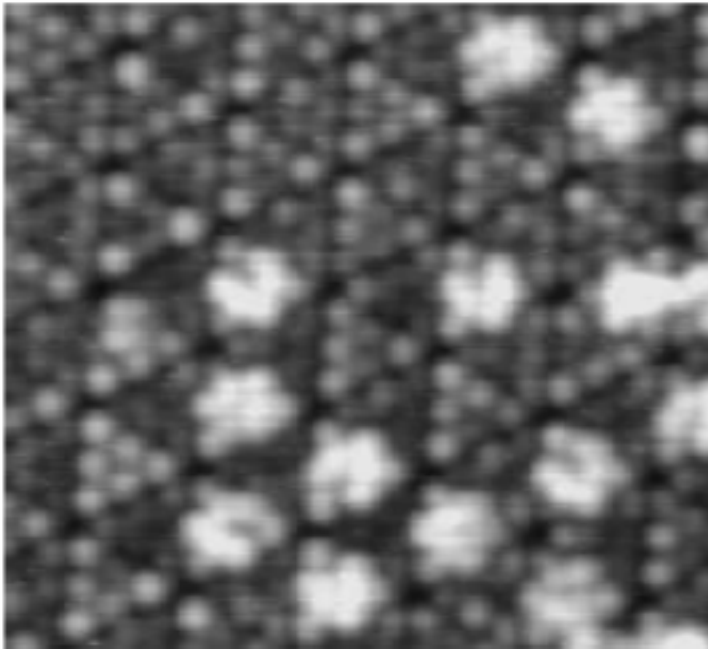
STM та AFM зображення InAs КТ всередині та на поверхні GaAs

STM зображення Ge КТ в Si



# Приклади впорядкування структур з КТ

Масиви Ge КТ в Si та InAs КТ в GaAs

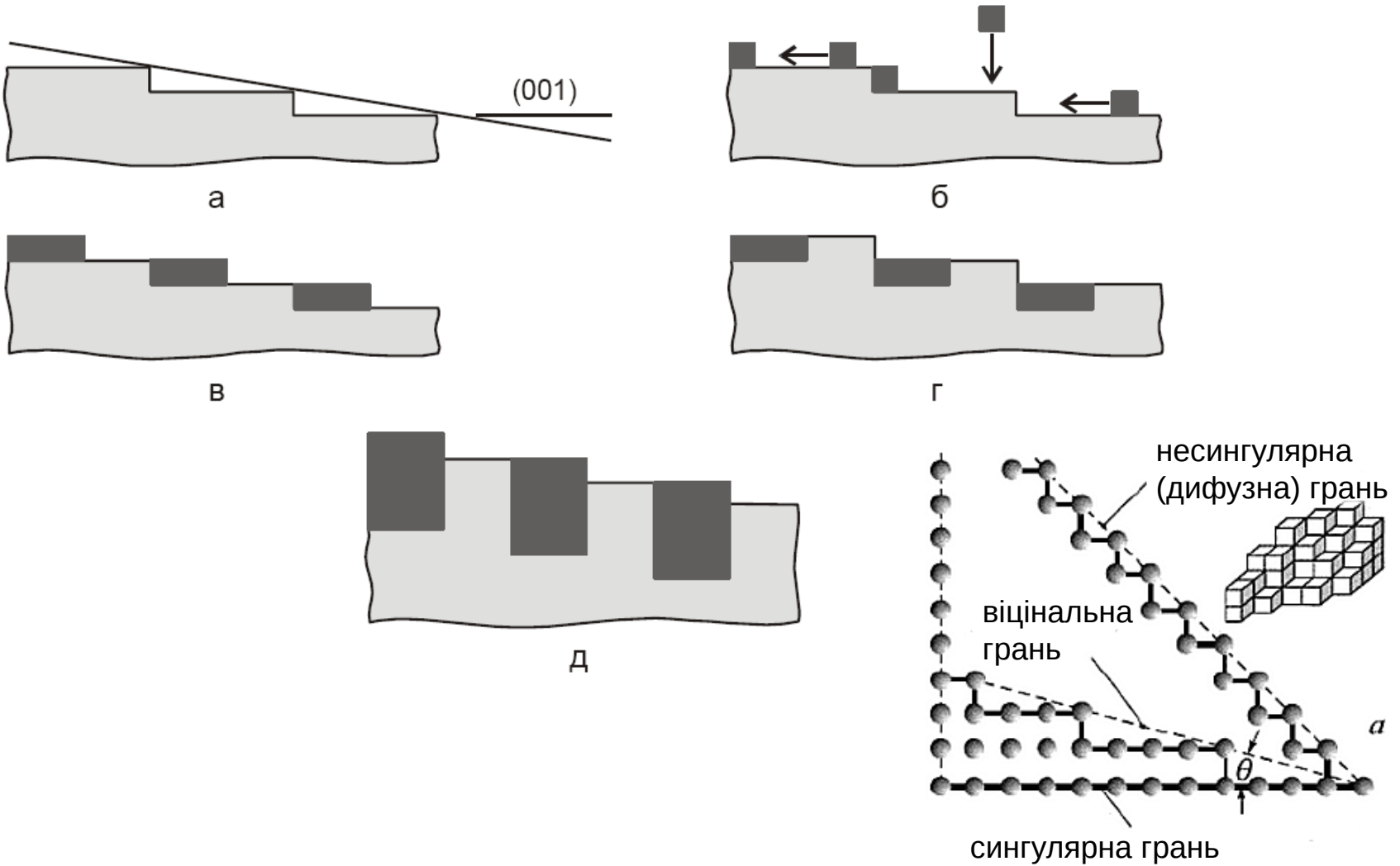


СТМ зображення поверхні Si -7x7 на початковій стадії росту Ge КТ О.П.Пчеляков, А.И.Никифоров, Б.З. Ольшанецкий и др. Нанокмпозиции на основе Si и Ge для применений в фотовольтаике: синтез из молекулярных пучков.

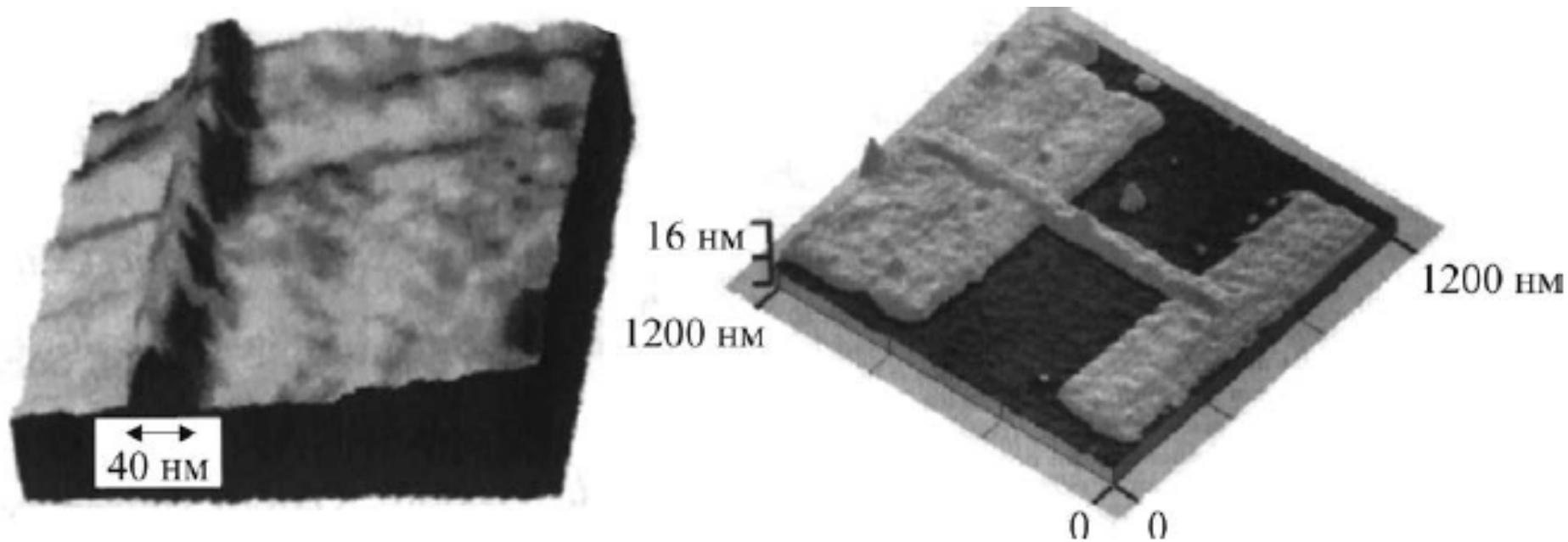
<http://www.nanoworld.org/russian/SPM2006/SPM2006/nanokompozicii.pdf>

A.Surrente, P.Gallo, M.Felici et al. Dense arrays of ordered pyramidal quantum dots with narrow linewidth photoluminescence spectra. – 2009. – Nanotechnology. – V. 20. p. 415205 (1-6).

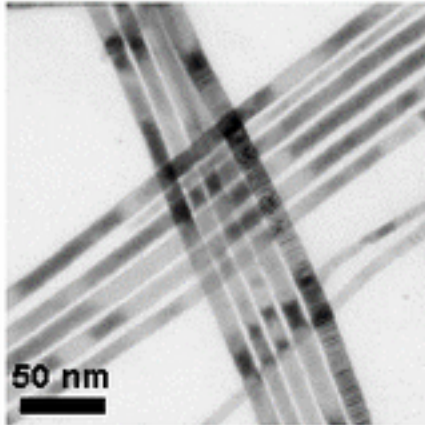
# Вирощування квантових дотів



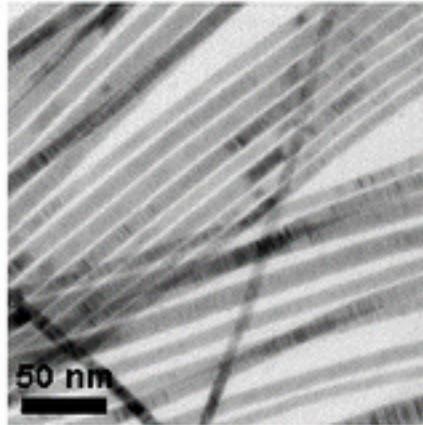
# Приклад Ge квантового дроту на Si



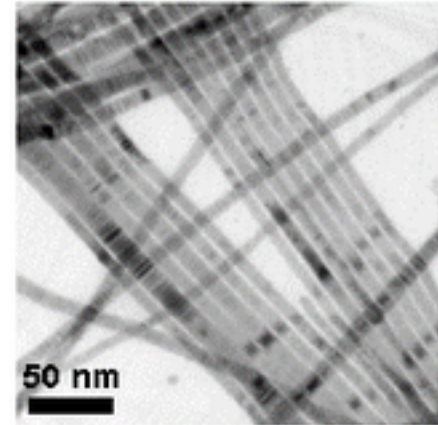
# Приклади CdSe квантових дротів



6.20 nm  $\pm$  18.4%



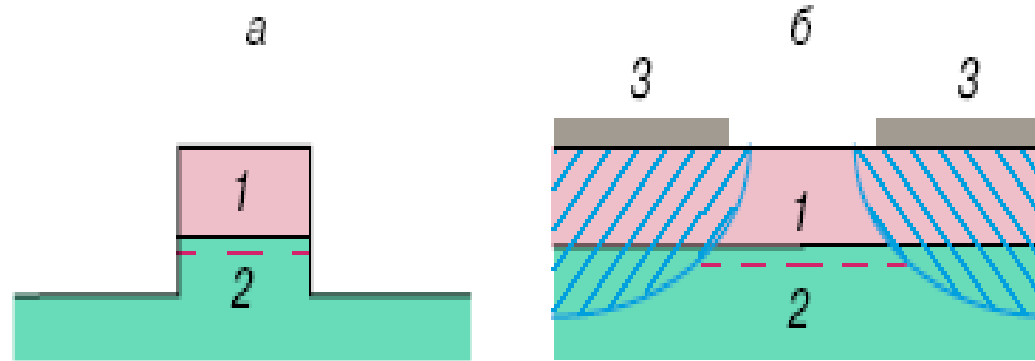
5.17 nm  $\pm$  14.8%



4.68 nm  $\pm$  19.0%

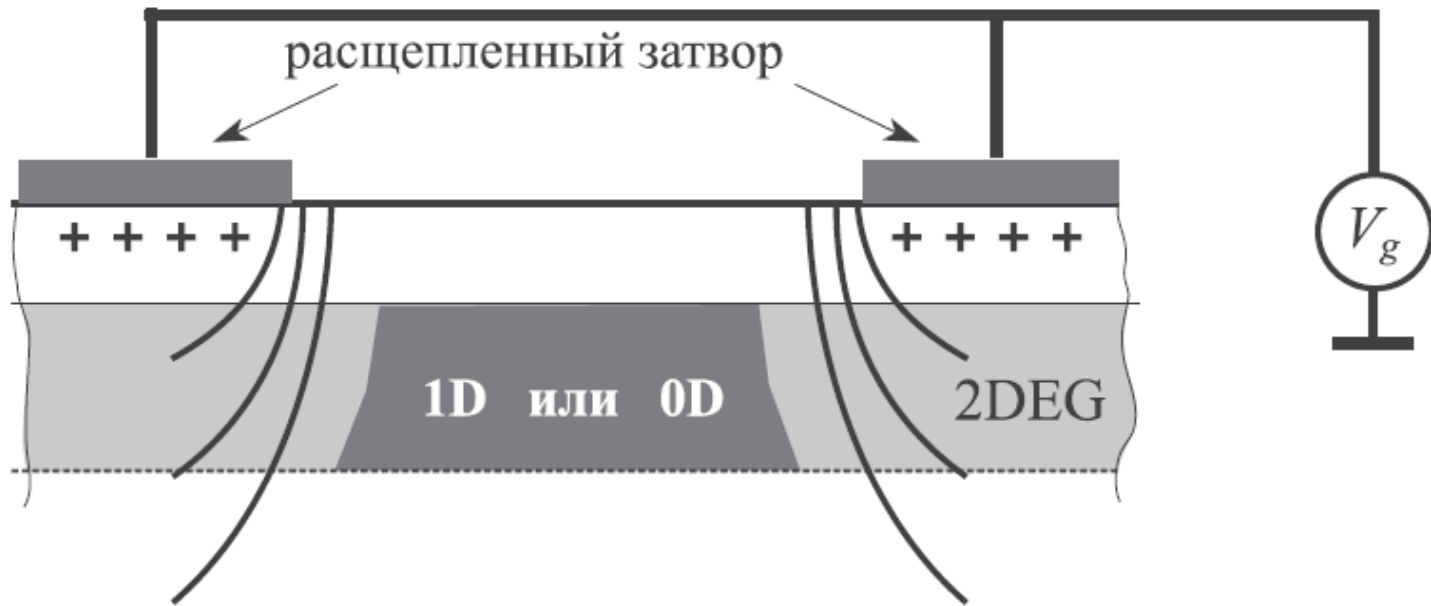
- **Quantum wires with fairly narrow diameter distributions (std. devs.  $\pm$  10 – 20%)**
- **Diameters = 3 – 20 nm and Lengths = 1-150  $\mu$ m**

# Квантовый эффект в 1-D



Полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми нитями, полученные с помощью субмикронной литографии за счет вытравливания узкой полоски из самой структуры (а) или щели в затворе Шоттки (б): 1 – полупроводник с широкой запрещенной зоной (например, AlGaAs), 2 – полупроводник с узкой запрещенной зоной (например, GaAs), 3 – металлический затвор. Образующийся вблизи гетерограницы узкий электронный канал показан штриховой линией. Заштрихованы области обеднения электронами

# 1D та 0D структуры з розщепленим електродом



**Рис. 1.15.** Структура с розщепленным затвором, обеспечивающая формирование одномерных и нуль-мерных элементов в скрытом слое двумерного электронного газа