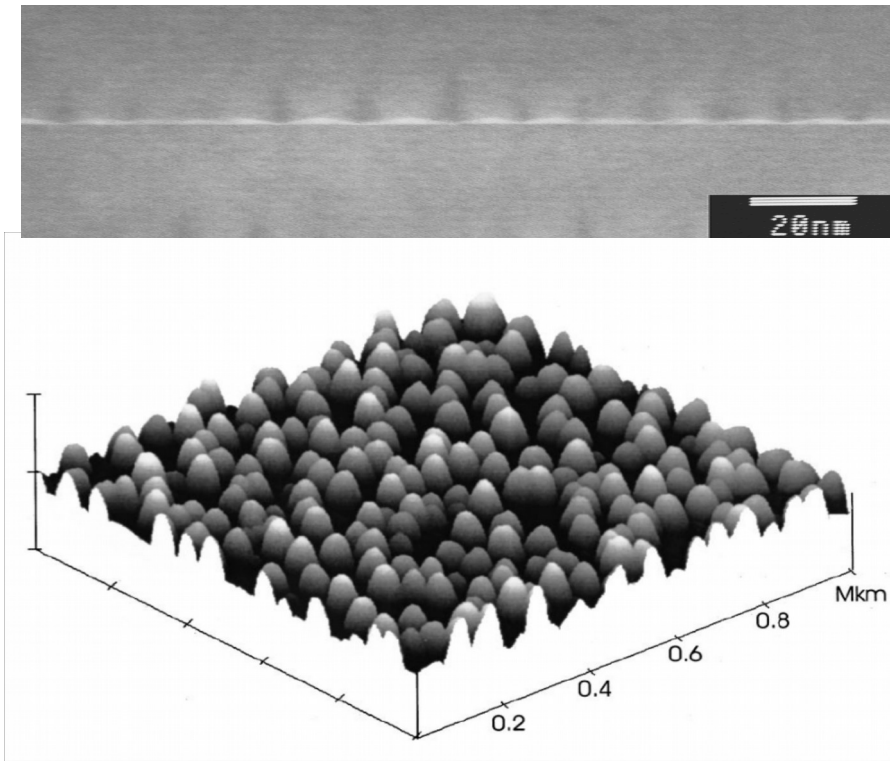


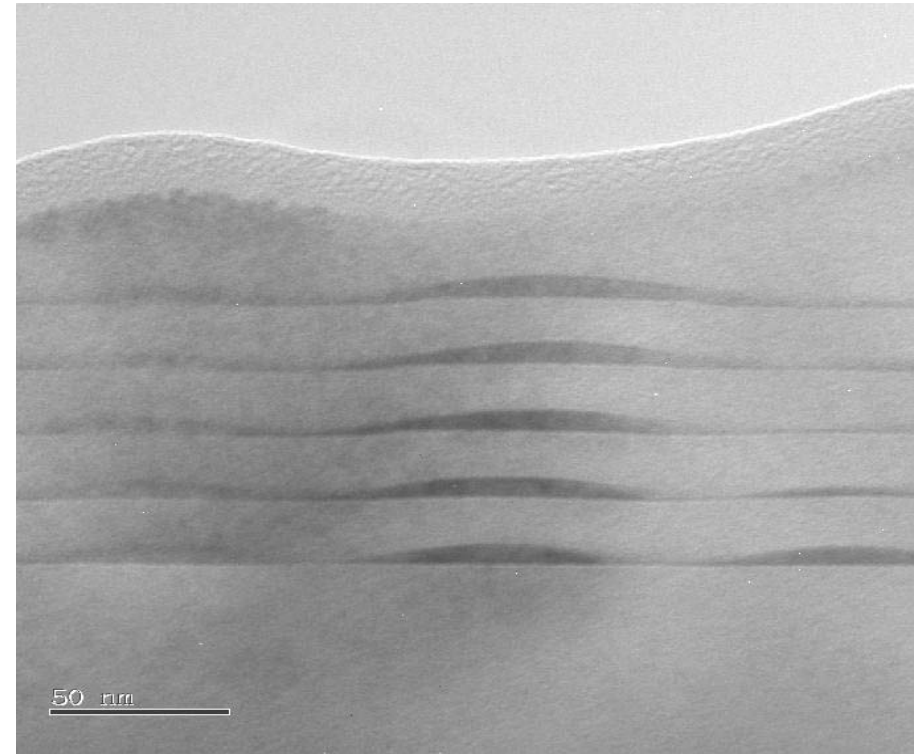
Квантові шнури.
Двовимірні канали.
Електронний спектр
2-, 1- та 0-вимірних
об'єктів.

ПРИКЛАДИ СТРУКТУР З МАСИВАМИ КВАНТОВИХ ТОЧОК(КТ)

STM та AFM зображення InAs КТ
всередині та на поверхні GaAs

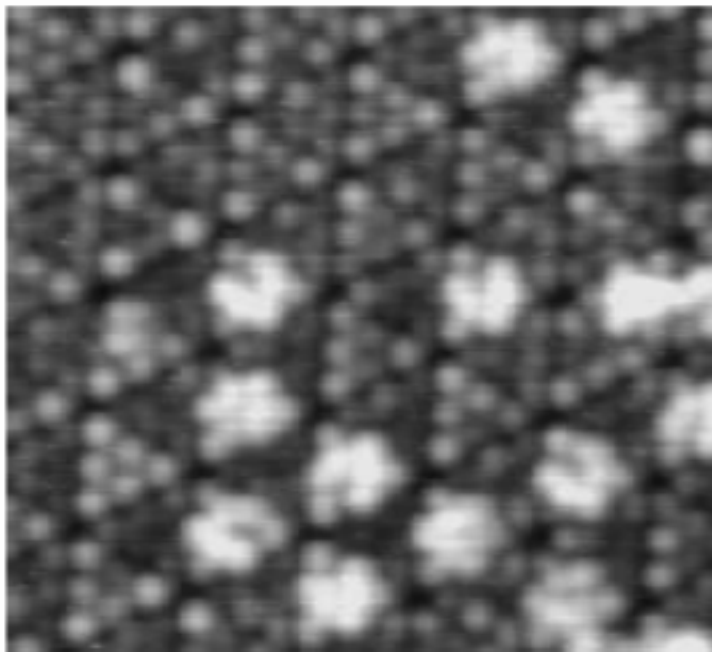


STM зображення Ge КТ в Si



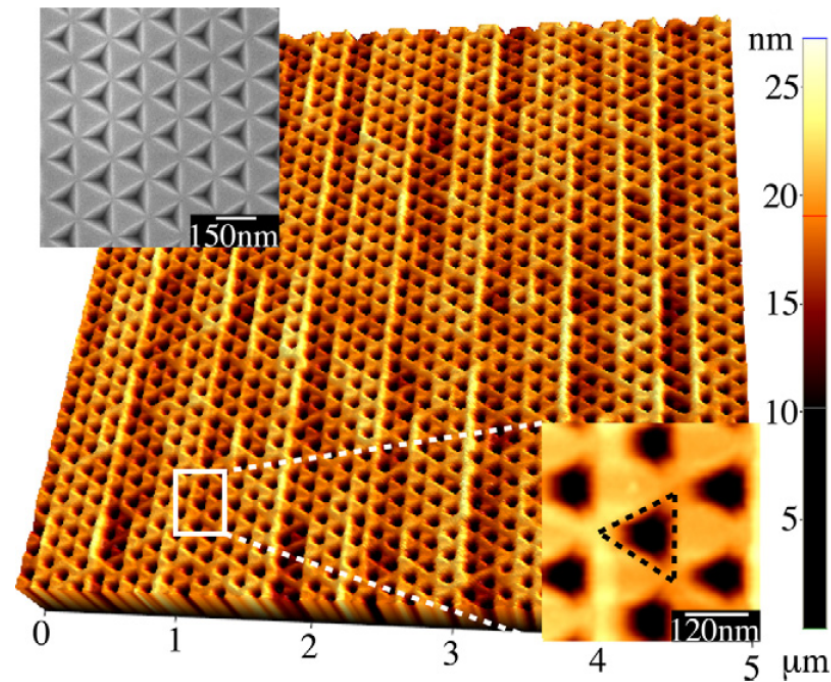
Приклади впорядкування структур з КТ

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).

Розміри КТ, для яких виконуються умови квантування

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

Тут ΔE_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} .

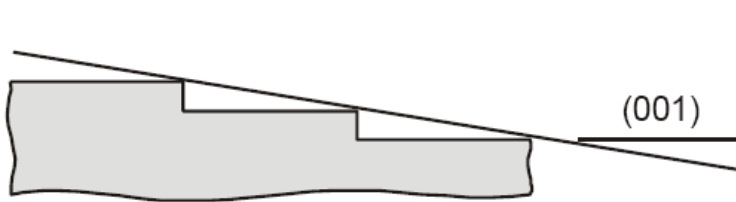
Припускаючи величину розриву в зоні провідності порядку 0.3 еВ, що є типовою для прямозонних КЯ в системі GaAs-Al_{0,4}Ga_{0,6}As, отримуємо, що діаметр КТ не повинен бути меншим за 40 Å.

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

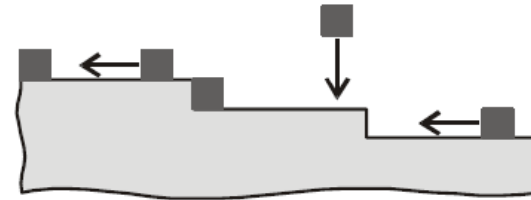
$$kT \ll \frac{1}{3} (E_2 - E_1)$$

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.

Вирощування квантових дрітків



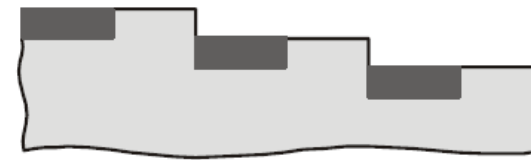
а



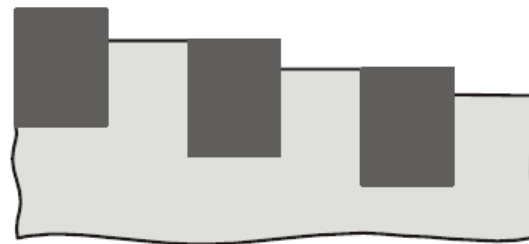
б



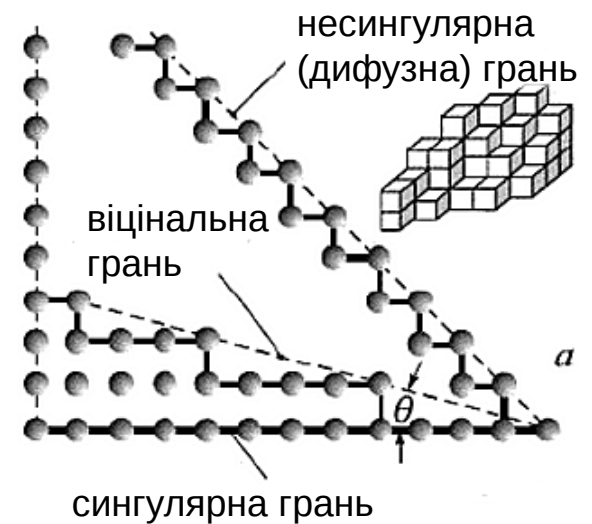
в



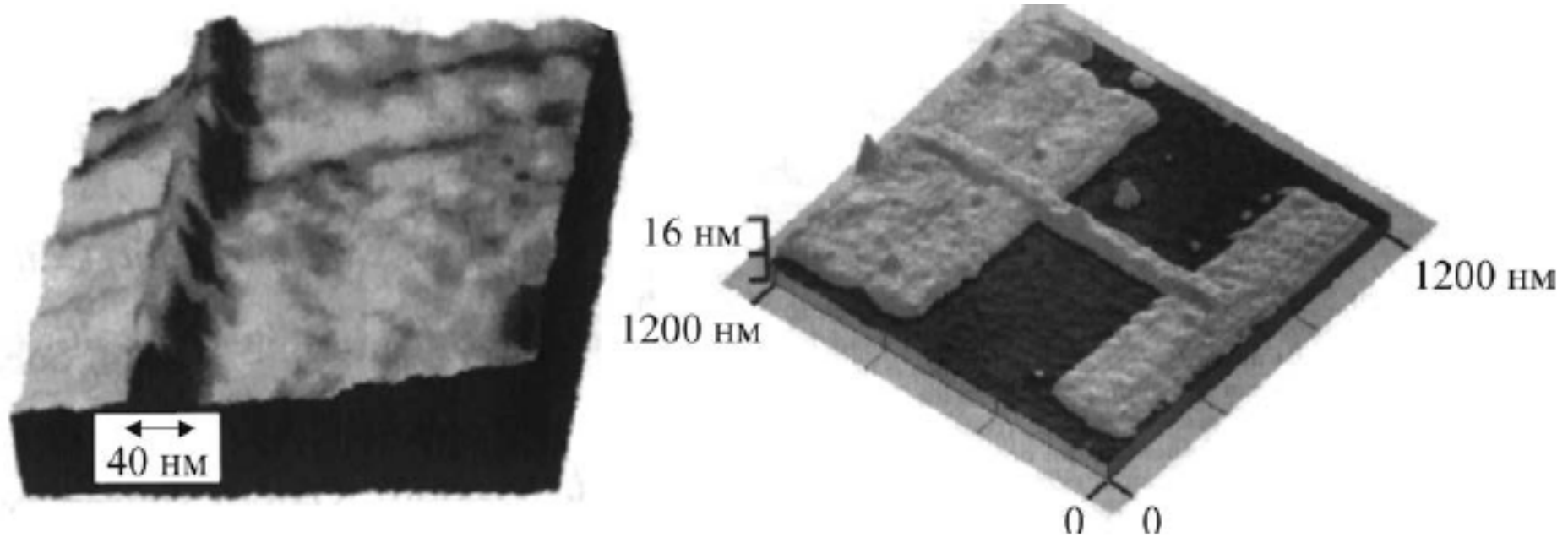
г



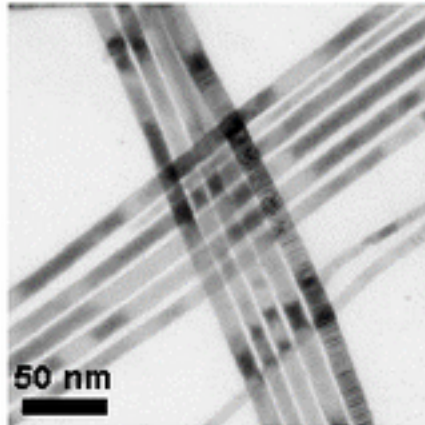
д



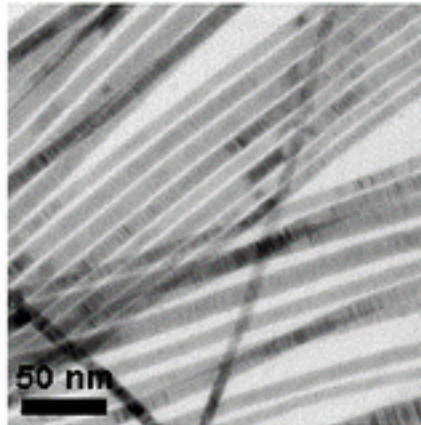
Приклад Ge квантового дроту на Si



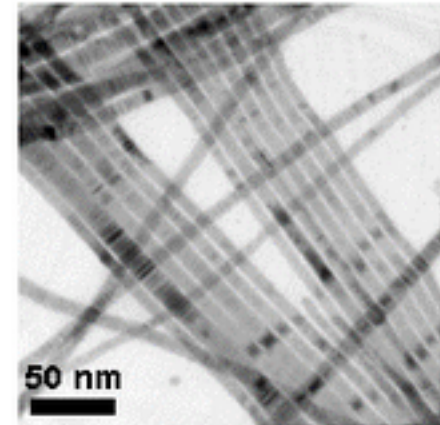
Приклади CdSe квантових дротів



6.20 nm \pm 18.4%



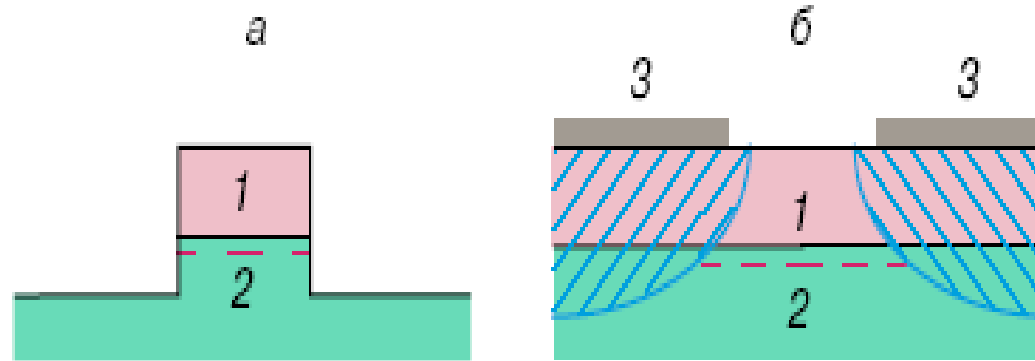
5.17 nm \pm 14.8%



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 μ 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 с разщеплением электродом

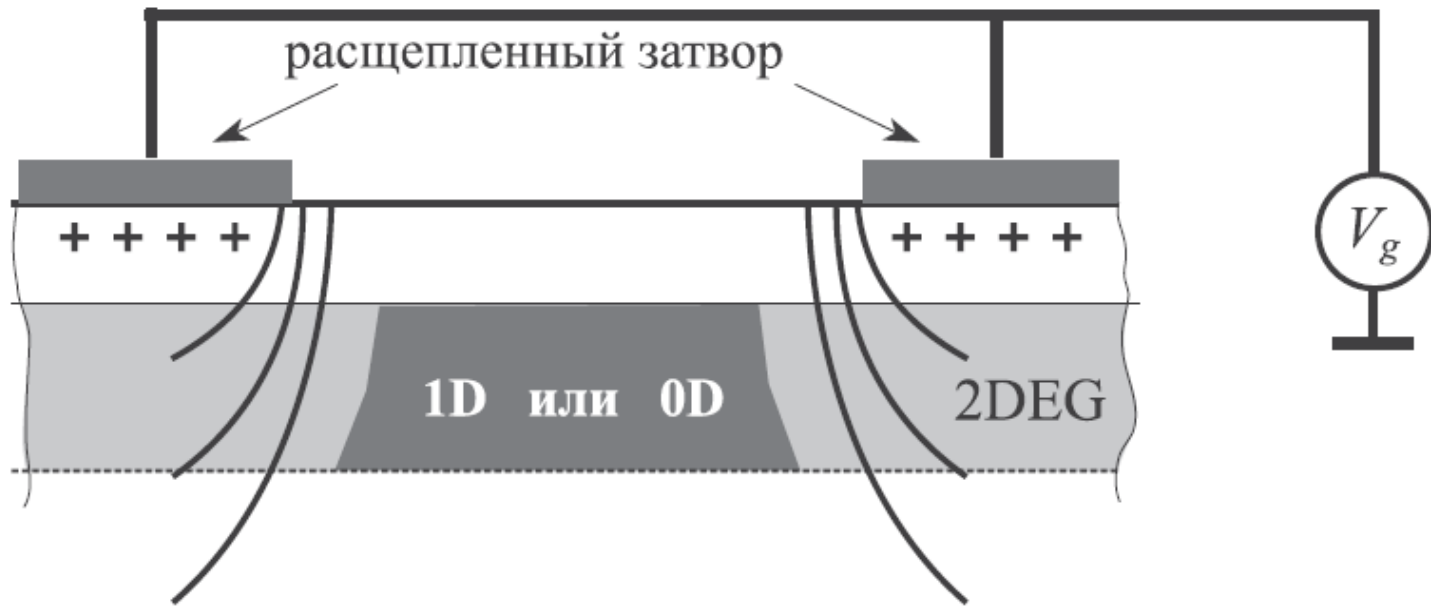
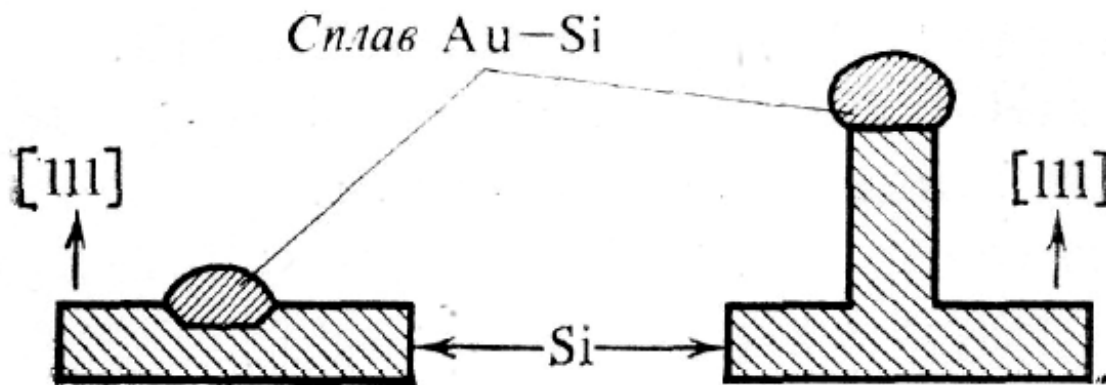
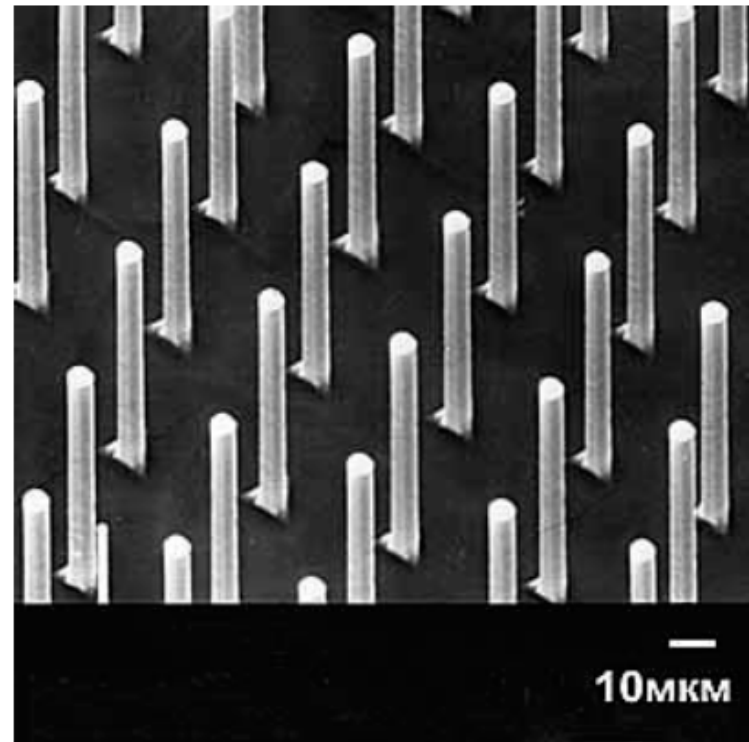
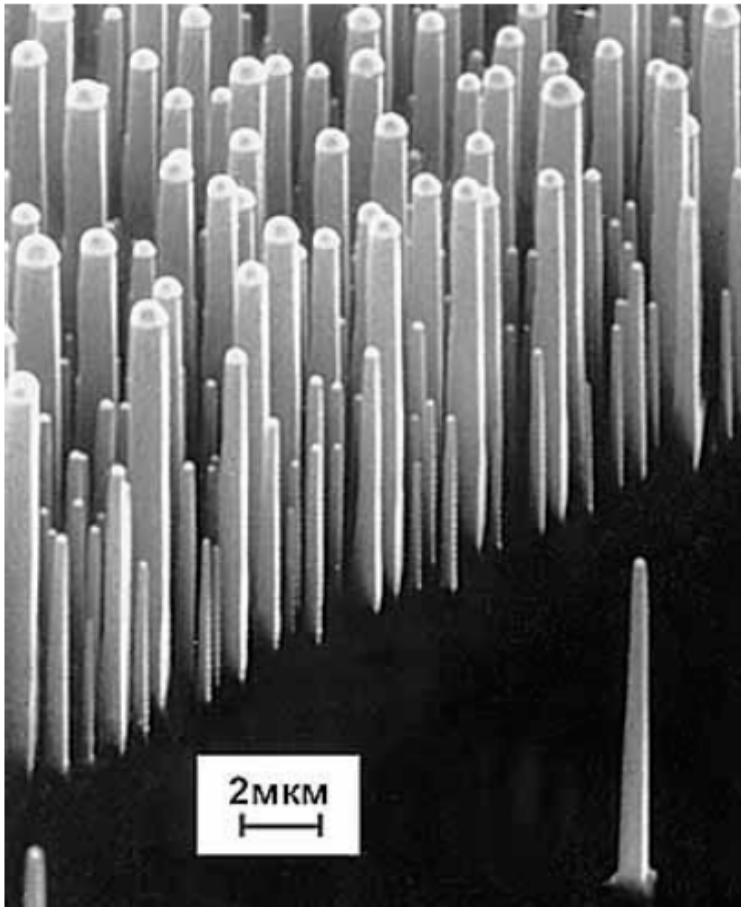


Рис. 1.15. Структура с разщепленным затвором, обеспечивающая формирование одномерных и нуль-мерных элементов в скрытом слое двумерного электронного газа

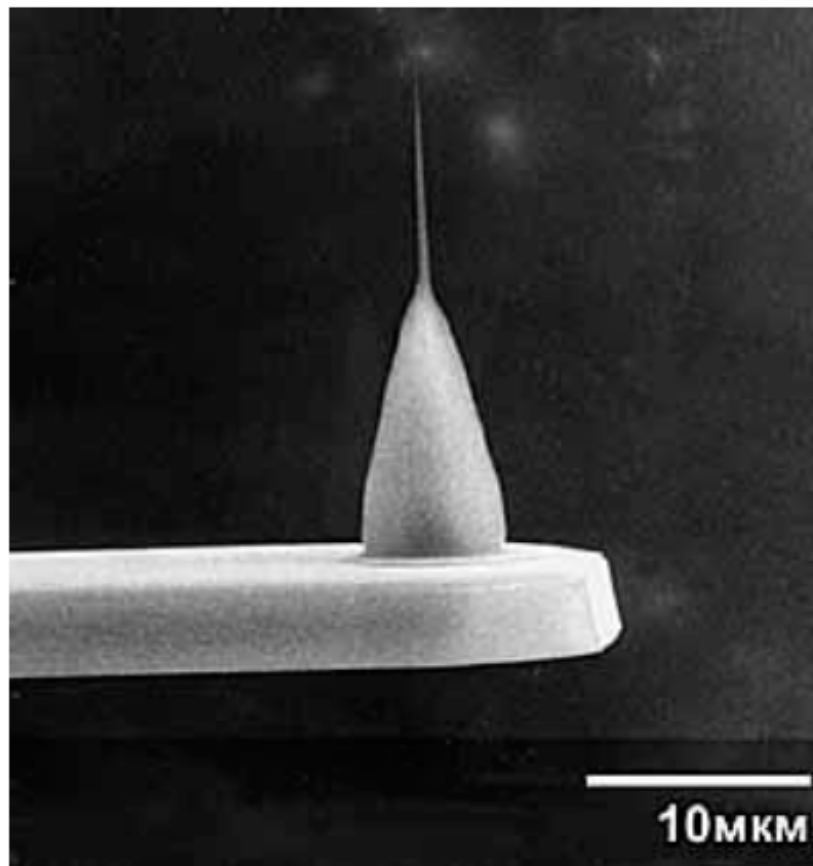
Схема росту віскерів



Віскери кремнію



Кремнієве ультравістря



Дельта-леговані структури

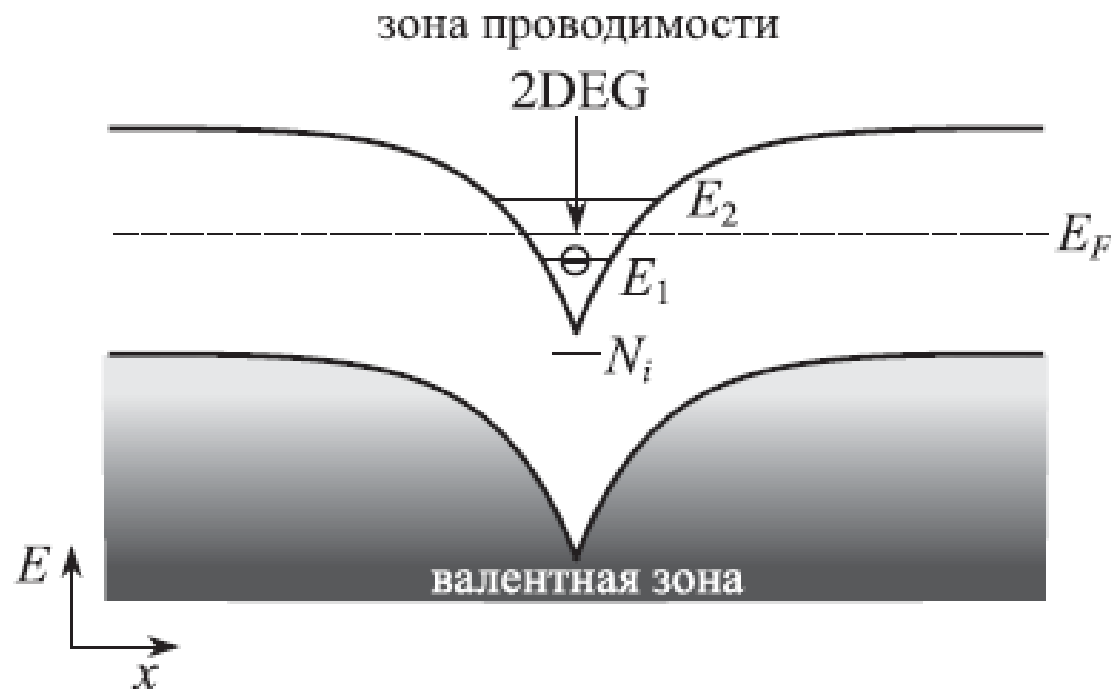


Рис. 1.13. Энергетические зоны в дельта-легированной полупроводниковой структуре

Квантовые обмеження електричним полем

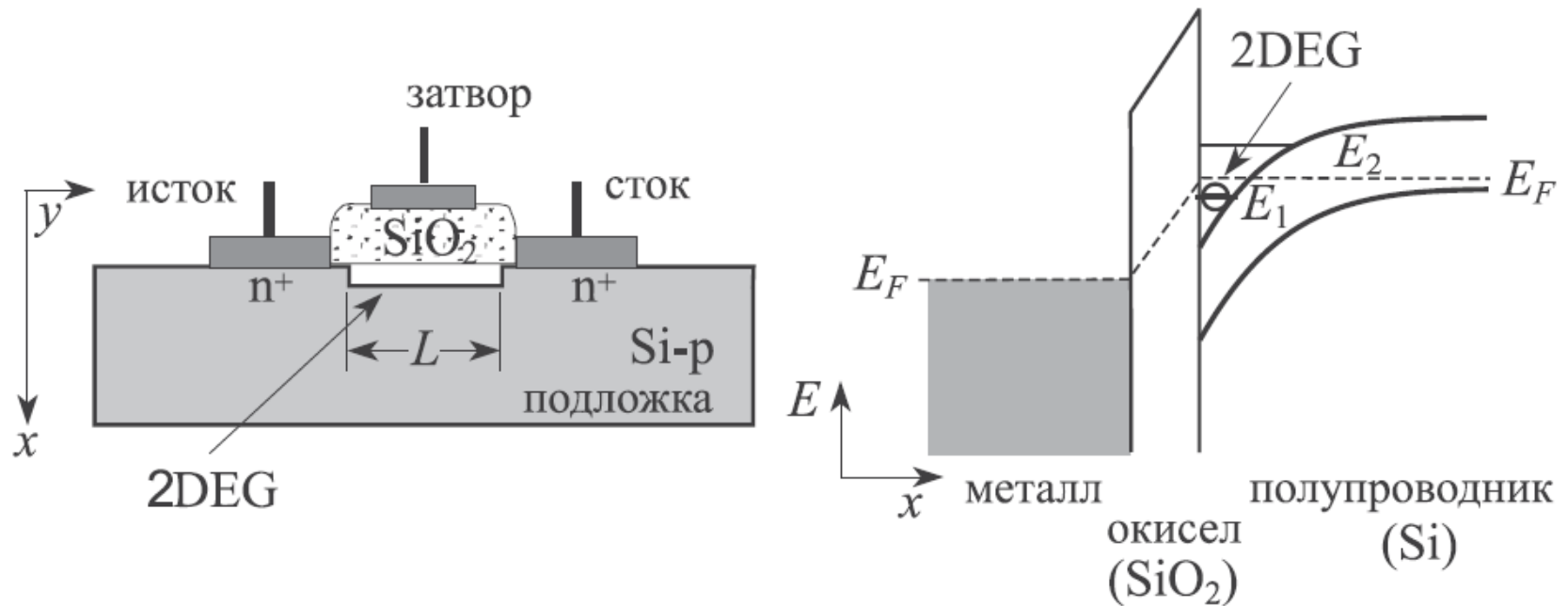
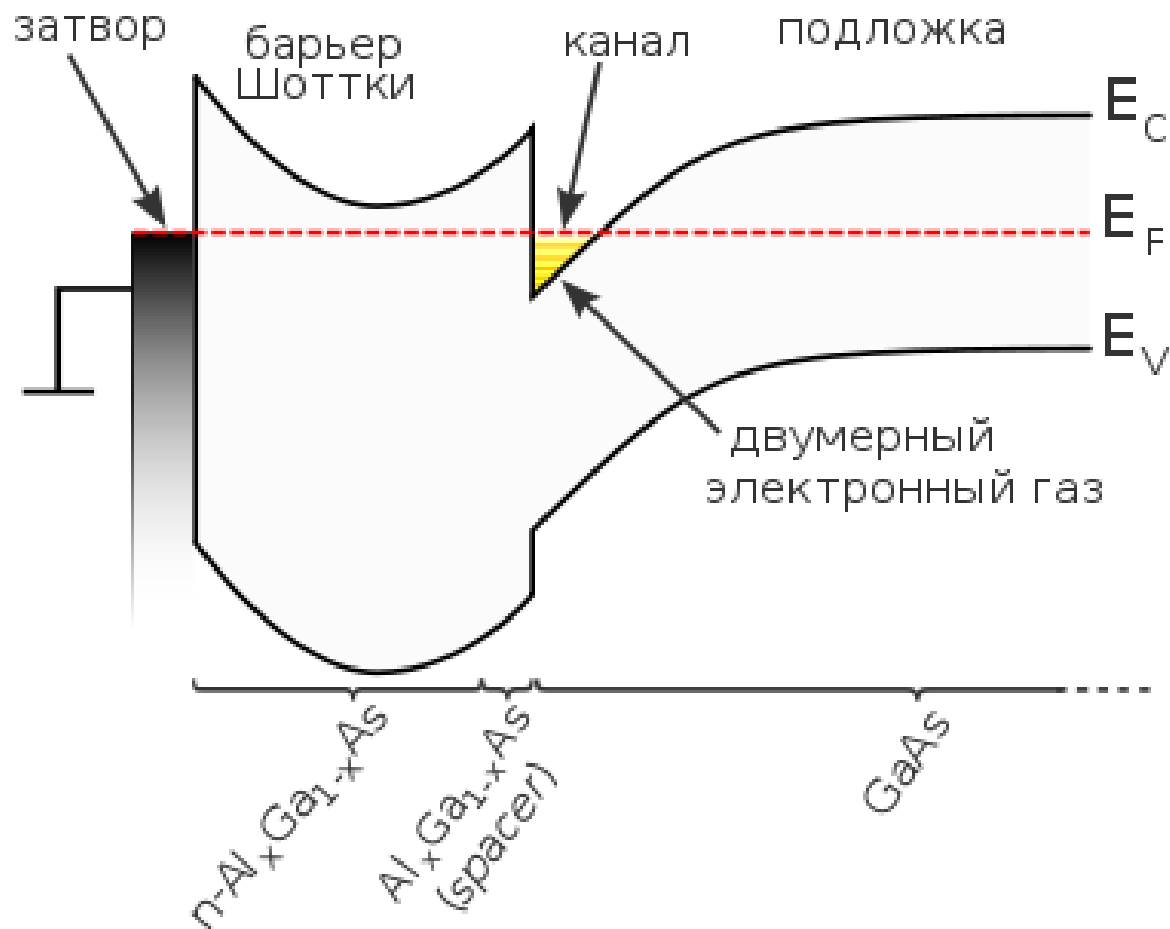
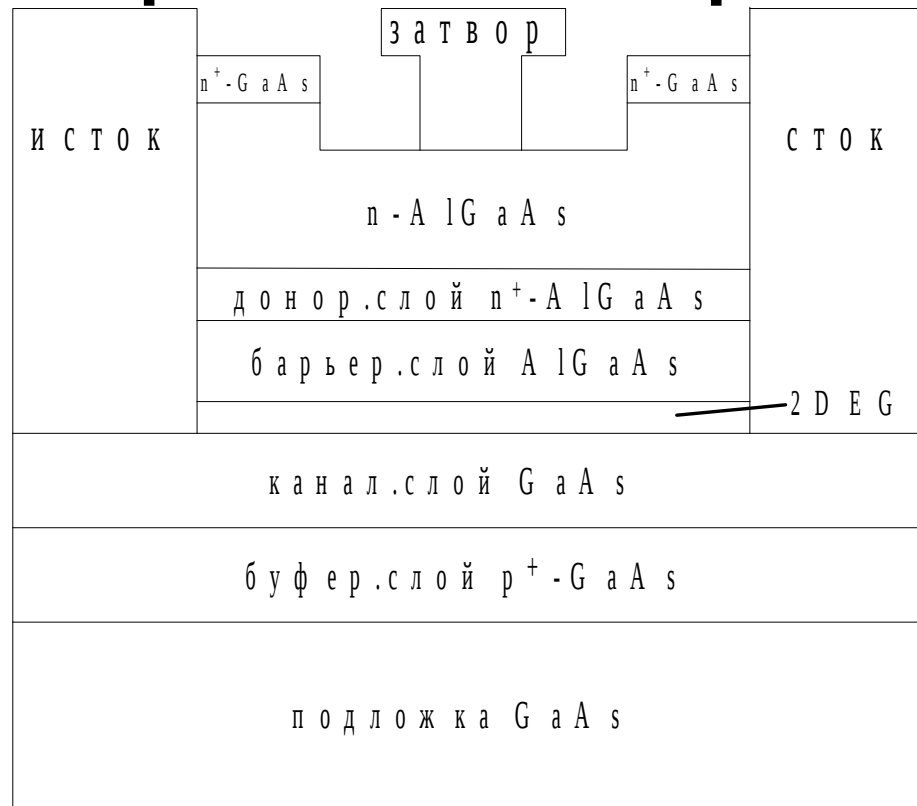


Рис. 1.14. Структура полевого транзистора металл/окисел/полупроводник и его энергетическая диаграмма, иллюстрирующая образование в нем двумерного электронного газа

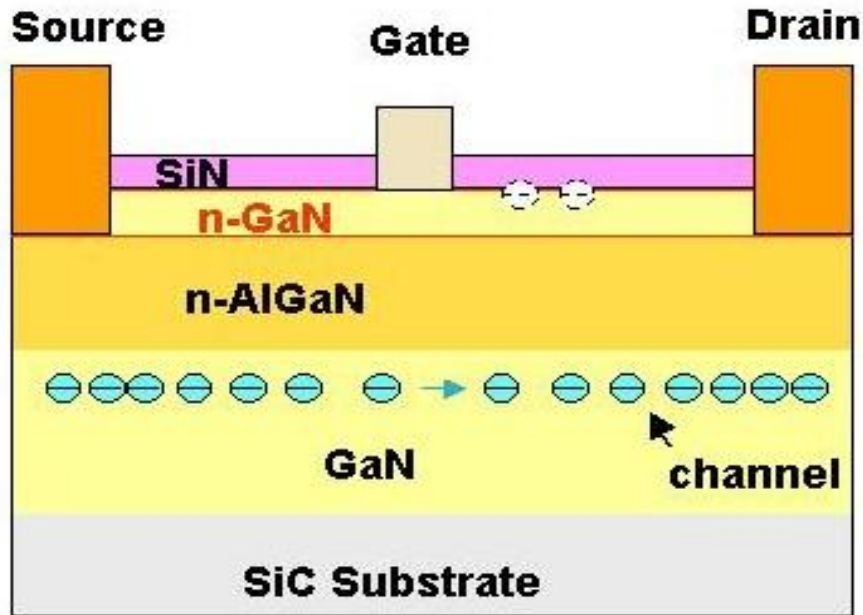
HEMT – транзисторы зонная структура



Типова структура промислового НЕМТ - транзистора



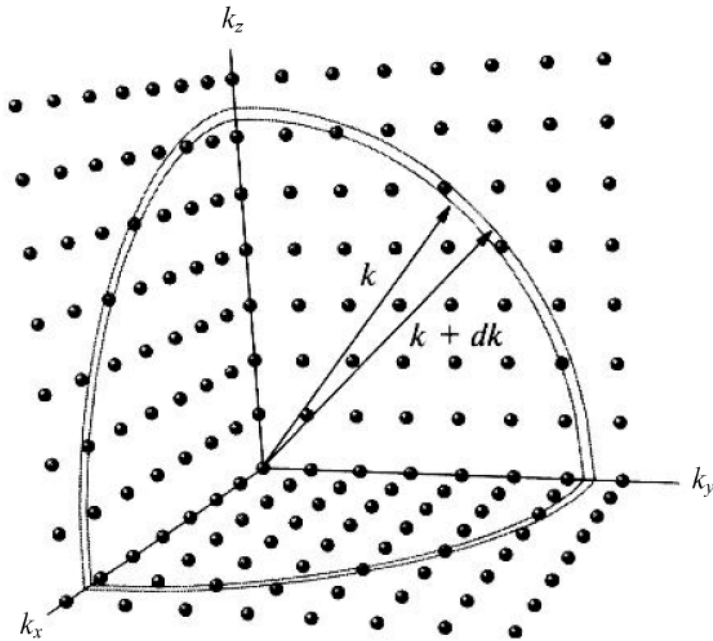
HEMT транзистор на GaN



Инженерам Fujitsu Laboratories удалось разработать технологию создания таких транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT, high electron-mobility transistors), которые могут работать при температуре канала 200 градусов Цельсия и стоковом напряжении 50 В на протяжении более миллиона часов, или порядка 100 лет.

Отмечается, что эти транзисторы удобно применять в устройствах, обслуживающих высокоскоростные беспроводные коммуникации (VSAT, WiMAX, сотовые базовые станции и прочее), которые требуют всё большей мощности, повышения быстродействия полупроводниковых деталей и надежной работы в тяжелых температурных условиях.

Густина станів в тривімірному випадку (3D)

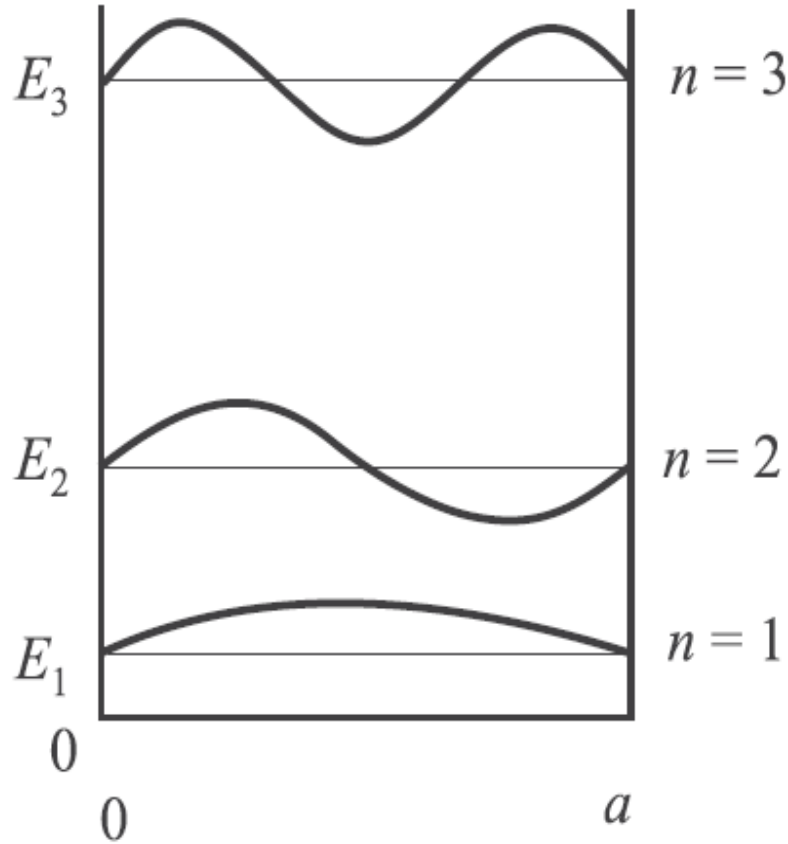


$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad k = \frac{\sqrt{2m^* E}}{\hbar}$$

$$k \, dk = \frac{m^* dE}{\hbar^2}$$

$$N(E) = \frac{4\pi k^2 dk}{2\pi^2 L^3} \frac{1}{dE} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\sqrt{2m^* E}}{\hbar} \frac{m^*}{\hbar^2} = \frac{m^* \sqrt{2m^* E}}{2\pi^2 \hbar^3}$$

Квантове обмеження по одній координаті



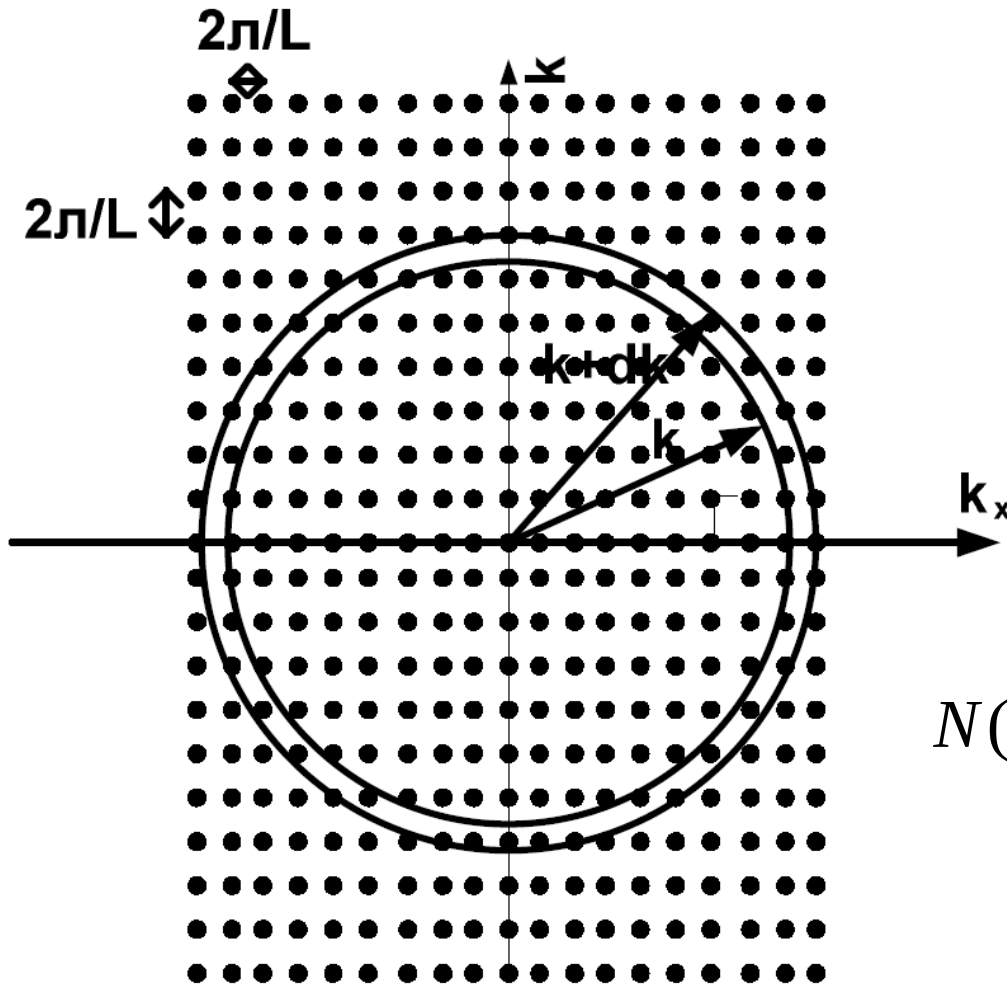
$$E = \frac{1}{2m^*} \hbar^2 k_x^2 + \hbar^2 k_y^2 + \hbar^2 k_z^2$$

$$\lambda_n = \frac{2a}{n}$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* a^2}$$

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* a^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*}$$

Густина станів в двовимірному випадку (2D)



$$k dk = \frac{m^* dE}{\hbar^2}$$

$$N(E) = \frac{2\pi \cdot \frac{2\pi}{L^2} \cdot k dk}{dE} = \frac{1}{2\pi} \frac{m^*}{\hbar^2}$$

Густина станів (1D)

$$N(E) = \frac{dk}{\frac{2\pi}{L}} \frac{1}{dE} \frac{1}{L} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \frac{1}{\sqrt{E}} = \frac{1}{\pi \hbar v}$$

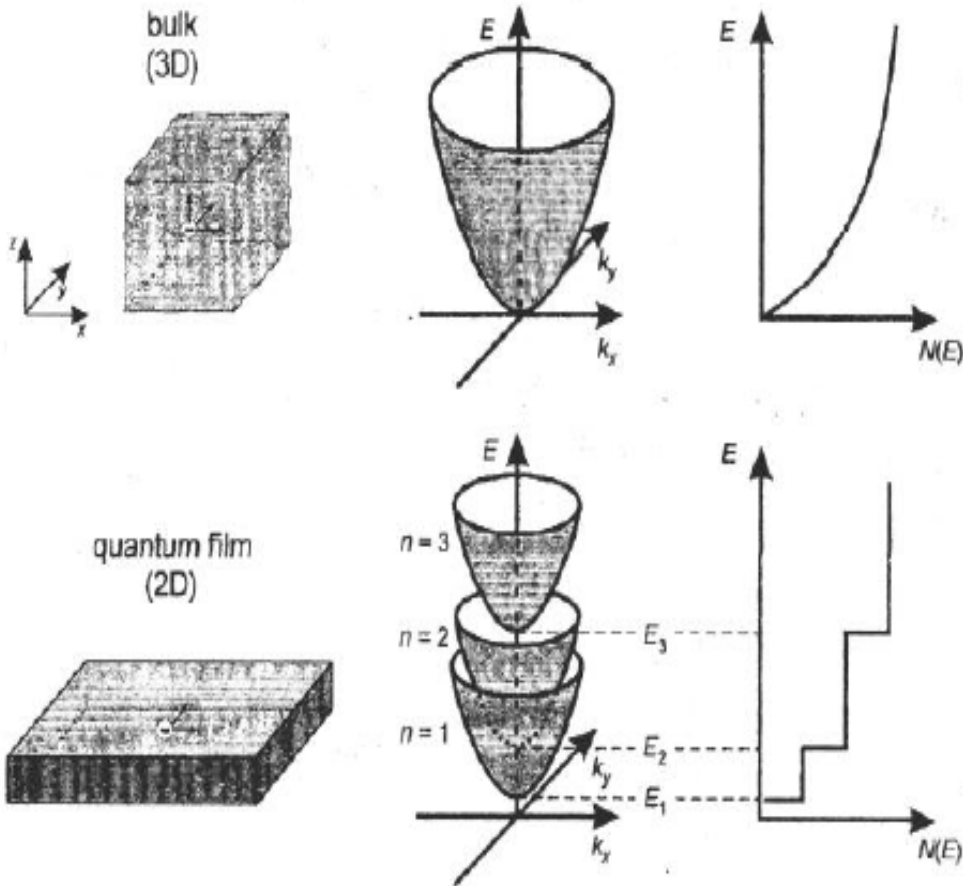
$$\begin{array}{c} k \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} \quad k + dk$$

$$dk = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \frac{1}{\sqrt{E}} dE$$

$$k = \frac{\sqrt{2m^* E}}{\hbar}$$

$$v = \frac{\hbar k}{m^*}$$

Залежність густини станів від енергії (3D та 2D)

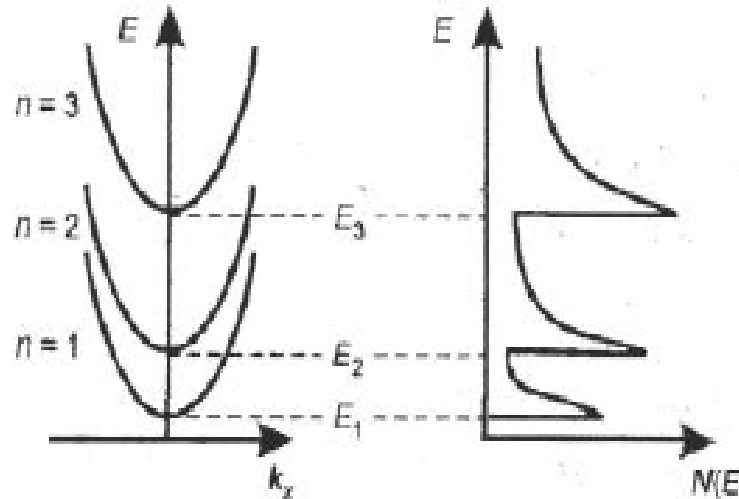


$$N(E) = \frac{m^* \sqrt{2m^* E}}{2\pi^2 \hbar^3}$$

$$N(E) = \frac{2\pi k dk}{2\pi \frac{L^2}{L}} \frac{1}{dE} \frac{1}{L^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{m^*}{\hbar^2}$$

Залежність густини станів від енергії (1D та 0D)

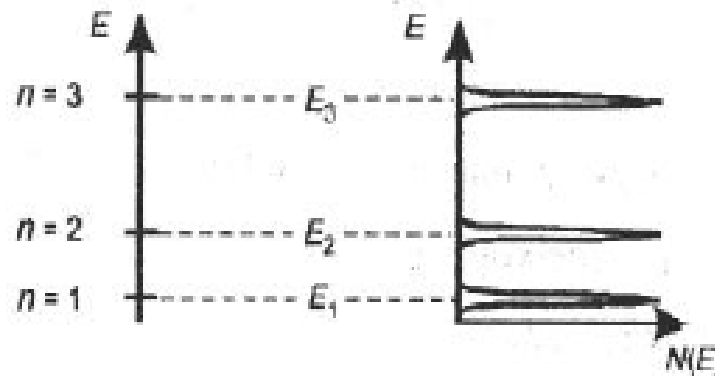
quantum wire
(1D)



$$N(E) = \frac{\sqrt{2m^*}}{2\pi\hbar} \frac{1}{\sqrt{E}}$$

$$N(E) = \frac{1}{\pi\hbar v}$$

quantum dot
(0D)



$$N(E) = \sum_{i,j,k} \delta(E - E_{i,j,k}),$$

$$i, j, k = 1, 2, 3$$