

# Нанoeлектроні ка

## Глобальне завдання

побудова елементів живої неживої природи керуючи окремими атомами

## Наслідки реалізації для людства

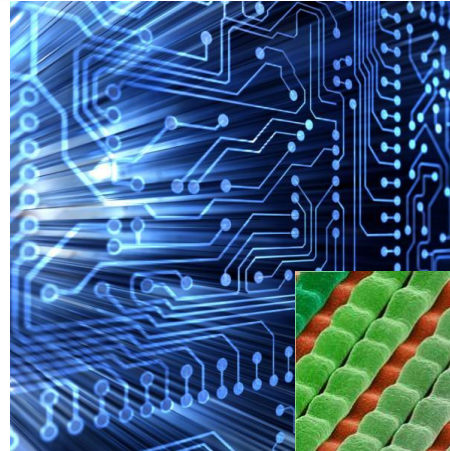
Порівняні з відкриттям електрики чи антибіотиків

## Методи

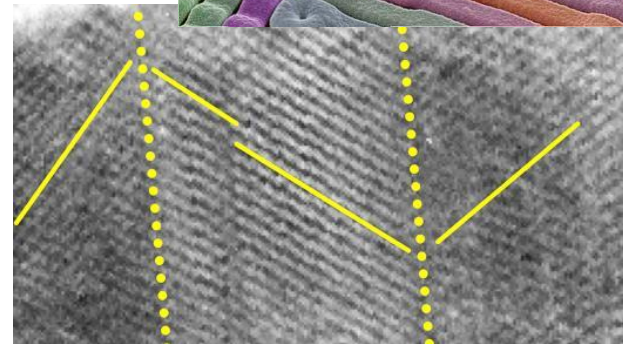
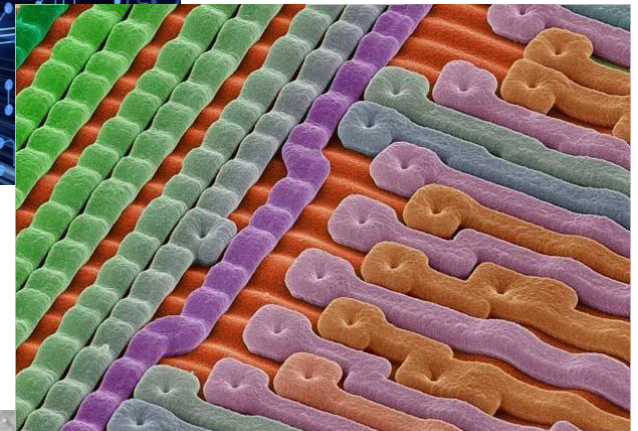
Контролюючи процеси створення наноструктур відкривається можливість отримати матеріали та компоненти матеріали з новими наборами фізико-хімічних характеристик

## Шлях

квантова механіка повинна стати інженерною наукою



Поверхня мікрочіпа



# Мікроелектроніка. Характеристики чіпа

---

**Мікроелектроніка** - галузь електроніки, що об'єднує комплекс фізичних, радіотехнічних і технологічних проблем, спрямованих на створення електронних схем для переробки та передачі інформації.

**Основа** – твердотільні мікросхеми, створювані на окремому кристалі - чіпі, як правило, кремнієвому. **Інтегральна схема (ІС)** - сукупність дискретних елементів, взаємодіючих між собою через з'єднання.


Для кожного функціонального елемента ІС на чіпі можна виділити відмежовану за своїми характеристиками область простору.

---

## Параметри елементів ІС

- $N$  - число активних елементів на чіпі;
  - $\tau$  - час перемикання елемента між двома електричними (логічними) станами під дією сигналу;
  - $\nu = 1/4\tau$  - тактова частота;
  - $N\nu$  - функціональна швидкодія (ФБ) схеми;
  - $P$  - потужність, що розсіюється в процесі перемикання елемента;
  - $P\tau$  - показник якості елемента, що визначає кількість енергії, що розсіюється елементом в одиничному акті перемикання;
  - $d$  - характерний розмір активної області елемента (довжина каналу, ширина бази), який визначається роздільною здатністю технологічного процесу (мінімальною шириною дискретного елемента на чіпі)
- 

## Основні характеристики ІС з точки зору кінцевого споживача:

- вартість біта інформації ( $C$ ) - фактично вартість одного елемента чіпа
  - надійність роботи ІС- ймовірність відмови елемента чіпа.
- 
- 

# Мікроелектроніка. Характеристики чіпа - сучасний стан

## Параметри елементів ІС (2012 рік)

- мінімальний характерний розмір елемента ІС - 20-30 нанометрів;
- більше  $10^8$  транзисторів/см<sup>2</sup> для логічних ІС;
- більше  $10^{10}$  біт/см<sup>2</sup> для ІС пам'яті;
- вартість менша ніж  $2,7 \cdot 10^{-7}$  долар/транзистор для логічних ІС;
- вартість менша ніж  $7 \cdot 10^{-9}$  долар/біт для ІС пам'яті;
- робоча частота - близько 13 ГГц;
- розсіювана потужність - менша  $1,3 \cdot 10^{-7}$  Вт/транзистор

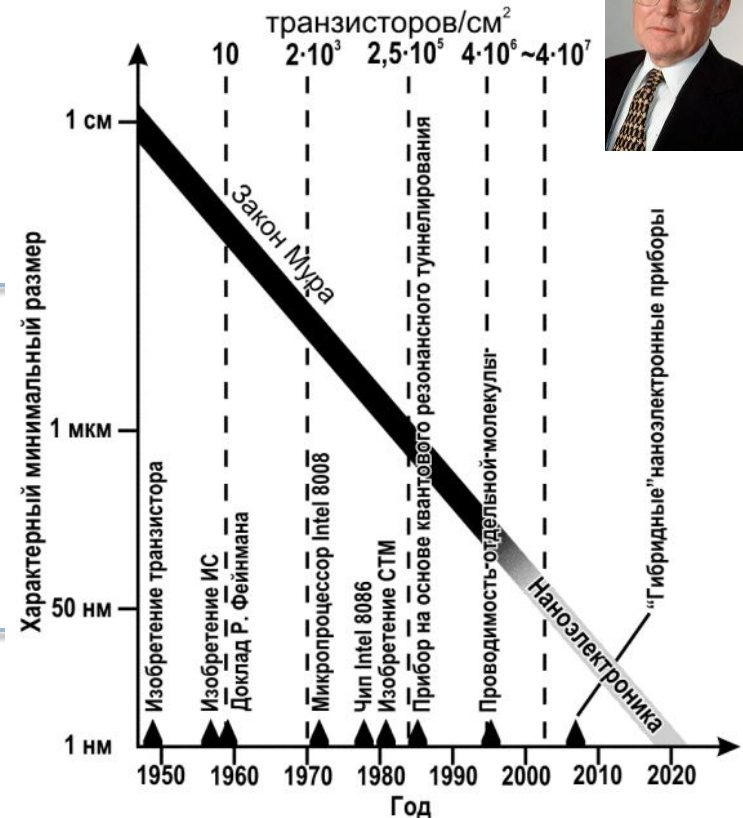
З початку сімдесятих років розвиток мікроелектроніки відбувається відповідно до **закону Мура** – продуктивність ІС подвоюється кожні 18 місяців.

Збільшення досягається за рахунок:

- зменшення характерних розмірів елементів,
- оптимізації та вдосконалення існуючих і впровадження нових технологій.

## Проблеми з якими треба боротися

- фізичні квантові ефекти
- особливості поведінки системи при малих струмах
- підвищення розсіюваної потужності,
- ускладнення схемотехнічних рішень
- тунельні струми



# Мікроелектроніка-наноелектроніка

## Нові перспективи

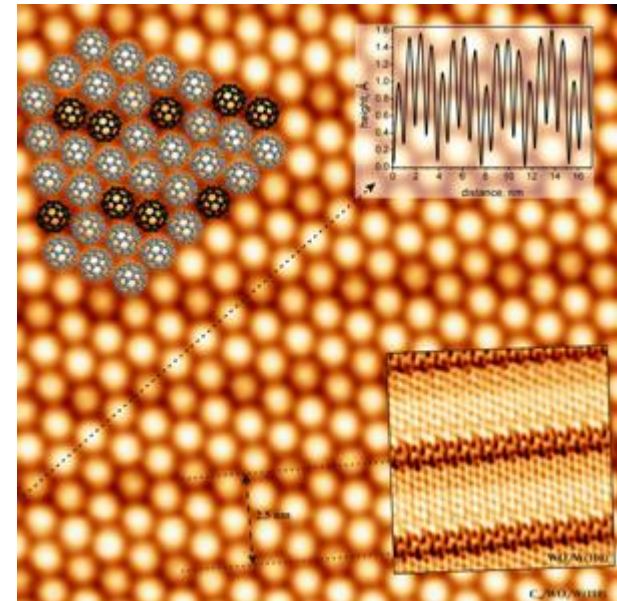
Використання нових фізичних ефектів, що проявляються як результат розмірного квантування носіїв заряду в елементах ІС нанометрових розмірів.

## Для досягнення високого ступеня інтеграції необхідно:

- вміти створювати елементи нанорозмірів;
- забезпечити функціонування кожного окремого елемента без неконтрольованого впливу на інші ;
- забезпечити узгодженого функціонування всіх елементів в складі ІС.

## Можливі обмеження на розміри елементів

1. Фізичні обмеження, що виникають в технології виробництва ІС  
(обмеження, пов'язані з розсіюванням експонуючого променя при літографії, флуктуації легуючих домішок, однорідність і мінімальні розміри при використанні пучкових технологій)
2. Фізичні обмеження функціональності окремих елементів чіпа  
(обмеження, обумовлені змиканням р-п переходів, пробоем надтонких діелектричних шарів, розігрівом носіїв).
3. Фізичні обмеження на ступінь інтеграції N елементів і розміри елементів, пов'язані із взаємодією між собою.



# Фізичні обмеження мінімального розміру елементів

## мікроелектроніки

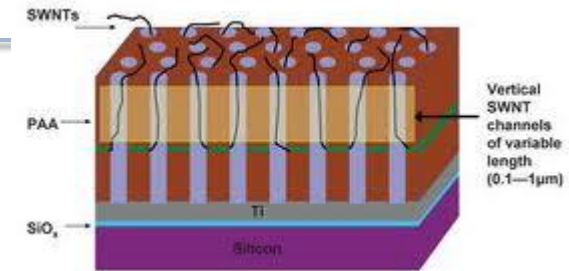
Елементи ІС - сукупність різномірних і нерівноважних областей з **різкими межами**.

Для формування елементів ІС використовуються способи, що розрізняються:

- взаємною ізоляцією елементів (поділ р-п переходами або діелектричними шарами);
- способом створення р-п переходів (дифузія, іонна імплантація, епітаксія);
- способом формування з'єднань (металеві з'єднання, полікристалічні лінії, канали провідності)
- міжрівневою ізоляцією.

### Основні методи

- літографія, легування дифузією по окисних масках,
- локальне окислення по нітридних масках,
- епітаксійне нарощування шарів,
- іонне легування,
- анодування,
- металізація



**Для створення субмікронних елементів ІС використовуються**

- електронно-променева, рентгенівська та іонна літографія
- іонне та електронно-променеве травлення
- лазерна і іонна обробки
- молекулярно-променева епітаксія
- Іонна імплантація

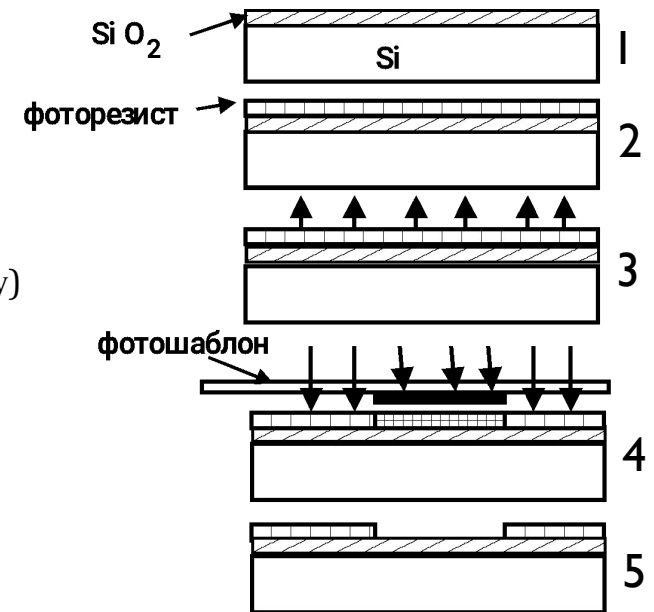
**Нові літографічні методи (характерні розміри менше 30 нм)-**

- екстремальний ультрафіолет (extreme UV lithography – EUVL)
- електронна проекційна літографія (SCALPEL),
- рентгенівська літографія (X-ray lithography),
- іонна літографія (ion beam lithography).

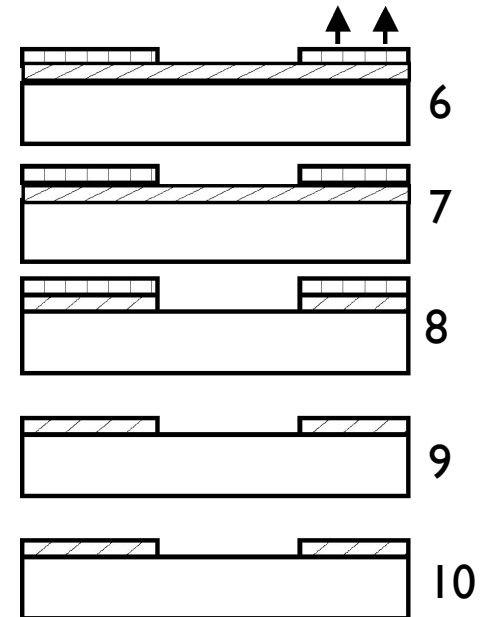
# Літографія

**Мета** - створення топологічного малюнка на поверхні монокристалічної кремнієвої пластини.  
Основним літографічним процесом є **фотолітографія**.

1. Підготовка поверхні (промивка і сушка)
2. Нанесення резисту (плівка полімеру - наноситься центрифугуванням)
3. Сушка (видалення розчинника і перевід резисту в тверду розчинну фазу)
4. Суміщення фотошаблону і експонування (резист під дією світла переходить в нерозчинну фазу)
5. Проявка резисту (промивка в розчиннику для видалення неекспонованих ділянок )



6. Стабілізуючий відпал (видалення залишків розчинника)
7. Контроль і виправлення дефектів.
8. Травлення (Безпосереднє перенесення малюнка маски на поверхню напівпровідникової структури)
9. Видалення фоторезисту.
10. Фінішний контроль.

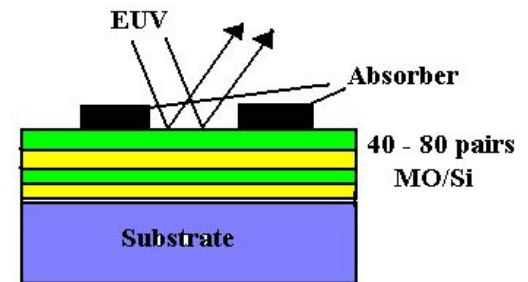
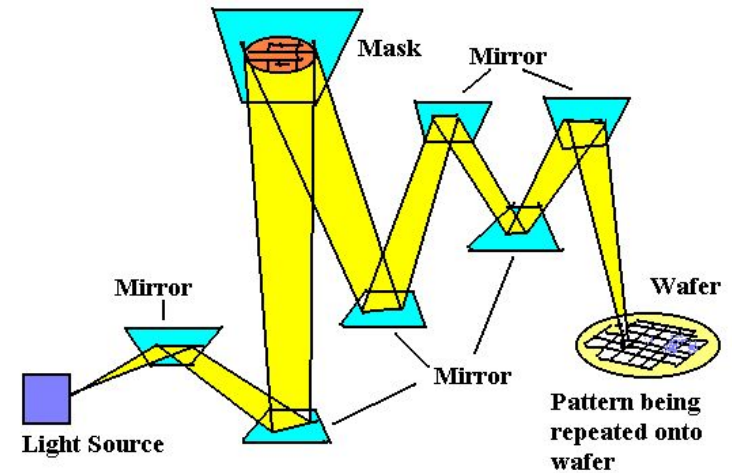


# Літографія. EUV

**EUVL** - звичайна оптична літографія з використанням випромінювання з довжиною хвилі 11 - 14 нм і відбиваючими оптикою і фотошаблонами.

## Джерела випромінювання в EUVL

- на першому етапі - синхротронне випромінювання.
- пізніше – джерело ультрафіолетового випромінювання, принцип роботи - використання випромінювання лазерної плазми-випромінювання Nd: YAG лазера (довжина хвилі 1063 нм, потужність 40 Вт, частота 100 Гц, тривалість 5 нс) фокусується на імпульсному газовому струмені кластерів Хе.

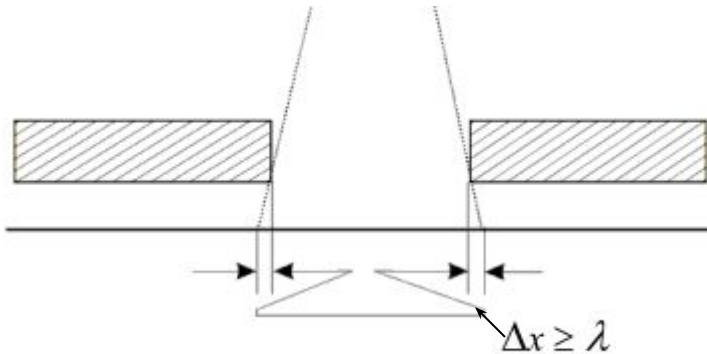




# Літографія. Проблеми

## 1. Розмазування краю експонованої області $\Delta x$

$\Delta x \geq \lambda$  обмеження, пов'язане з явищами дифракції світла з довжиною хвилі  $\lambda$



### Розв'язок

Використання рентгенівської чи електронної фотолітографії – зменшення  $\lambda$

Для пучка електронів з  $E=10-1000$  еВ

$$\Delta x \geq \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \approx 1 - 0,1 \text{ \AA}$$

## 2. Теплове розширення маски і ІС

В ході процесу експонування фотошаблону може змінюється температура маски і пластини НП.

Оцінка впливу величини теплового розширення

коефіцієнт лінійного розширення твердих тіл  $\xi \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ .

розмір фотошаблону  $l = 150 \text{ мм}$ ,  $\Delta T = 1 \text{ К (1}^\circ\text{C)}$ ,

$$\Delta l = l \cdot \xi \cdot \Delta T = 150 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 1 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

### Розв'язок

Стабілізація температури в межах  $0,01 \text{ К}$  фотошаблону (маски) і оброблюваного об'єкта.

# Літографія. Проблеми

## 3. Сферична аберація електронного променя

Збільшення інтенсивності електронного променя ( $I$ ) призводить до посилення ефектів кулонівської взаємодії (відштовхування) і, як наслідок, зростанню розміру плями (сферичної аберації).

Зменшення  $I$  - до збільшення часу експонування і збільшення вартості літографічного процесу.

Радіус плями електронного променя ( $R$ ) повинен бути більшим за його поперечне розмивання внаслідок ефектів аберації:

$$R > \frac{f}{4} (BS)^{3/2} I^{3/2} = kI^{3/2}$$

$f$  - постійна сферичної аберації,  
 $B$  - яскравість джерела,  
 $S$  - площа випромінюючої поверхні.

Мінімальне значення радіусу плями  $R_m$

$$R_m = \left(\frac{f}{4}\right)^{1/4} k \left(\frac{S_r q e N}{\pi C_M B S}\right)^{3/8}$$

## 4. Розсіювання променя в резисті і в напівпровіднику

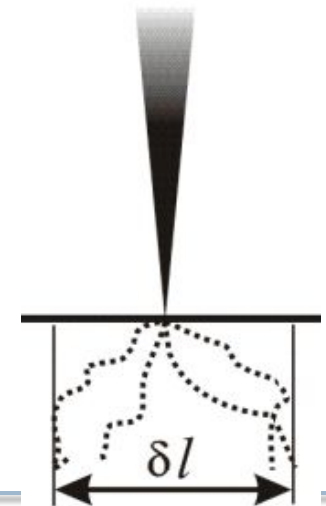
Органічні резисти - **поліметилметакрилат** (ПММА) або **поліметилізопропенілкетон** (ПМІПК) мають мінімальну товщину близько  $50 \text{ \AA}$ .

Розсіювання променя в резисті призводить до його розмазування на величину порядку **товщини резисту** та **довжини вільного пробігу електрона**.

В процесі травлення характерним розміром, що визначає розмазування, є розмір молекул резиста.

### Розв'язок

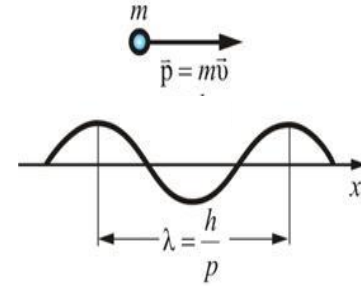
Використання електронів менших енергій, проте їх важко фокусувати  
Варіант - іонні пучки високих енергій



# Рух носіїв заряду в нанорозмірних системах

Поведінка рухомих носіїв заряду (електронів і дірок) в нанорозмірних структурах визначається явищами квантового обмеження:

- балістичний транспорт
- квантова інтерференція
- тунелювання.



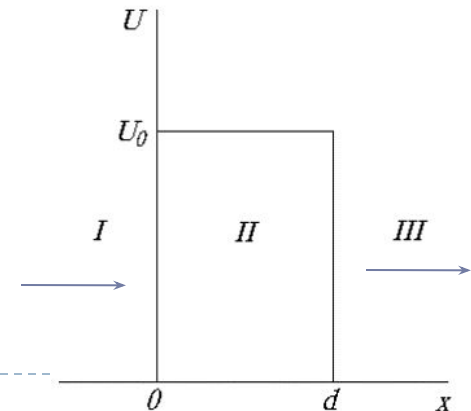
**Квантове обмеження** - вільний рух електронів в одному з напрямків в наноструктурі обмежується потенціальними бар'єрами.

**Квантове обмеження** змінює спектр дозволених енергетичних станів і впливає на перенесення носіїв заряду.

Транспорт носіїв заряду може відбуватися як *паралельно*, так і *перпендикулярно* до потенціальних бар'єрів.

При русі носіїв **уздовж** потенційних бар'єрів домінуючими ефектами виявляються **балістичний транспорт** і **квантова інтерференція**.

Проходження носіїв заряду **через** потенціальні бар'єри - **тунелювання**



# Рух носіїв заряду в нанорозмірних системах

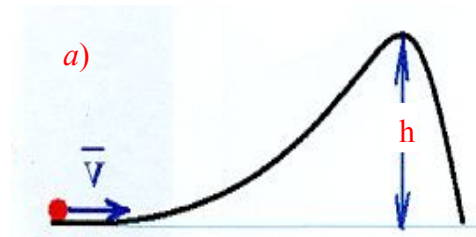
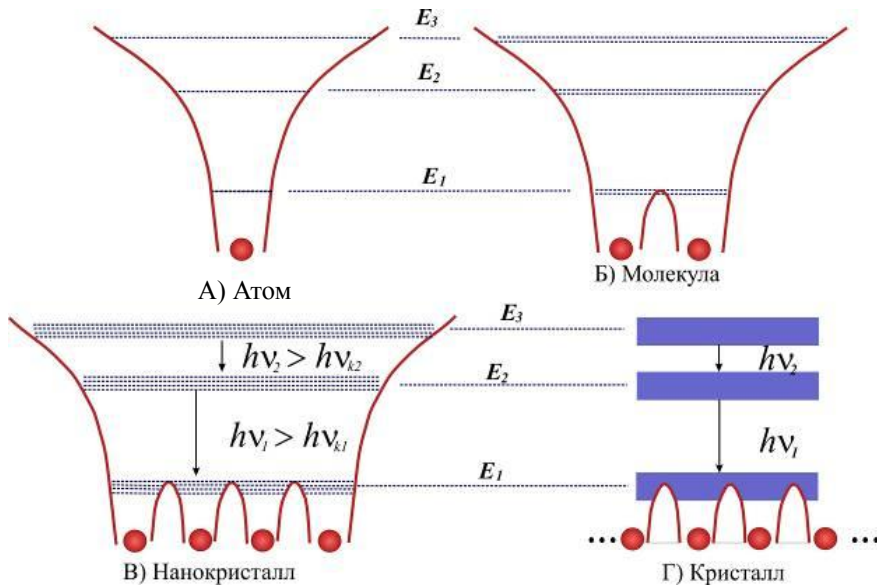
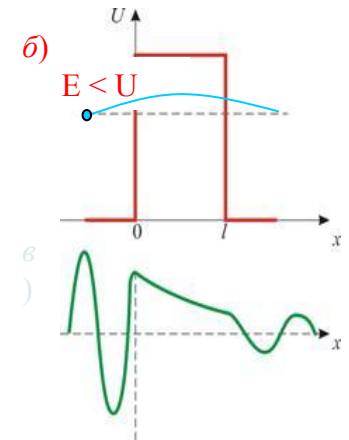


Схема переходу частинки через потенційний бар'єр:  
 а - класичної частинки,  
 б - квантової частинки,  
 в - хвиля електрона.



## Квантове обмеження

Кінетична енергія вільного електрона, що рухається в 3D просторі

$$E = \frac{1}{2m^*} (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2), \quad E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2).$$

Густина електронних станів

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

В низькорозмірних структурах рух електрона обмежений **мінімум в одному напрямку**.

Енергія електрона обмежується нескінченно глибокою потенціальною ямою.

В області  $0 < x < a$  електрон має ненульову потенціальну енергію.

Нескінченно високий потенційний бар'єр унеможливує знаходження електрона за межами цієї області.

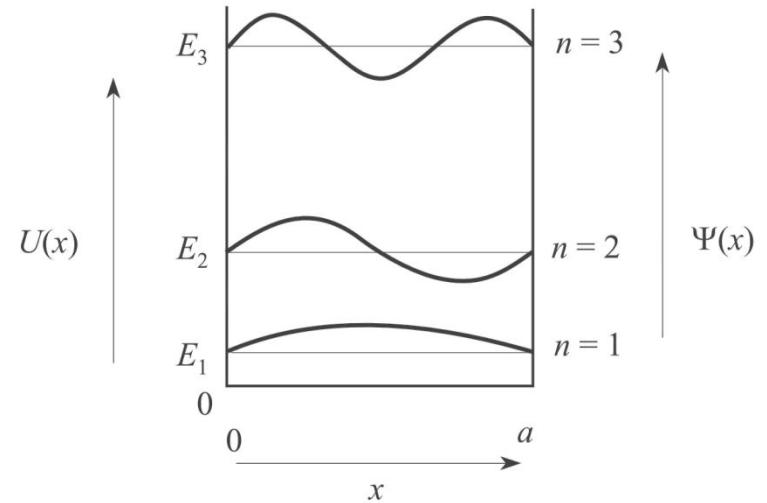
Мінімальна енергія електрона в ямі

$$E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2}$$



Енергії дозволених енергетичних станів електрона в ямі

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



Хвильова функція електрона рівна нулю на границях ями.

Умові відповідає набір хвильових функцій – стоячих хвиль з довжиною  $\lambda$

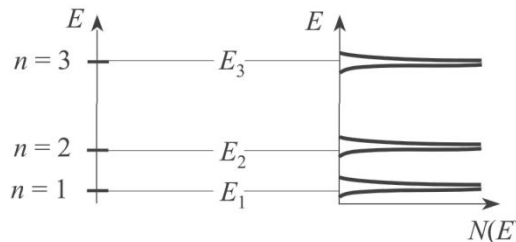
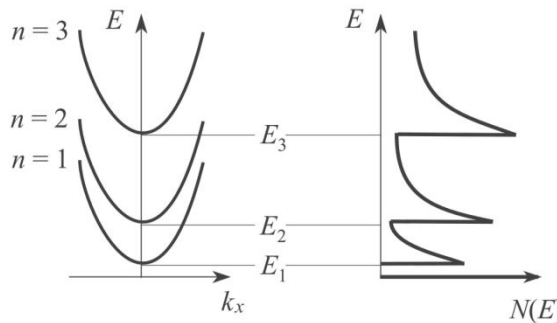
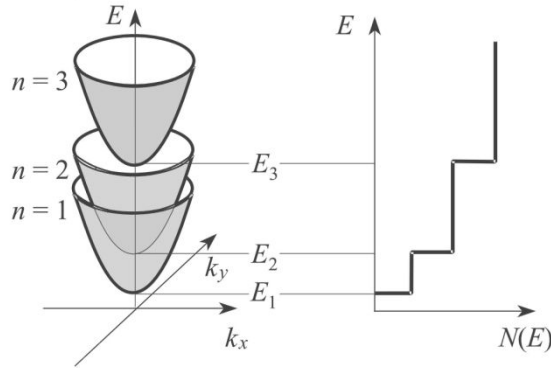
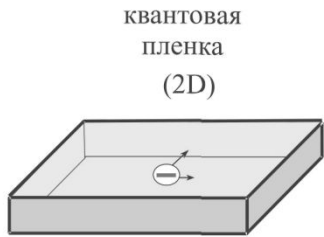
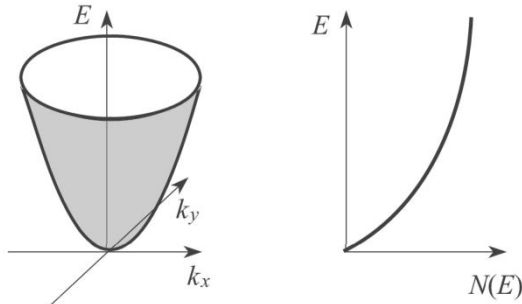
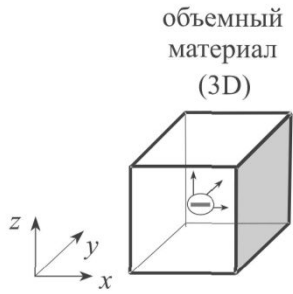
$$\lambda_n = 2a/n \quad (n = 1, 2, \dots)$$



Дозволені значення хвильового числа

$$k_n = 2\pi/\lambda_n = n\pi/a$$





## Квантовые ограничения

**Квантовые ограничения** - ограничения движения электронов (дырок) в низкоразмерных структурах, что приводит (вследствие их квантово-волновой природы) до ненулевого минимального значения их энергии и до дискретности энергий дозволених станив.

В твердых телах квантовое ограничение может быть реализовано в трех пространственных направлениях.

**Колличество направлений**, в которых эффект квантового ограничения отсутствует, используется в качестве **критерия** для классификации элементарных низкоразмерных структур на три группы:

- квантовые пленки,
- квантовые шнуры
- квантовые точки

# Квантові плівки

**Квантові плівки** - двомірні (2D) структури, в яких квантове обмеження діє тільки в одному напрямку - перпендикулярно плівці

Носії заряду в **квантових плівках** можуть вільно рухатися в площині  $xy$ .  
Енергія носіїв має квантовані значення напрямку  $z$  (товщина плівки  $l_z$ ) і неперервний спектр значень в напрямках  $x$  і  $y$ :

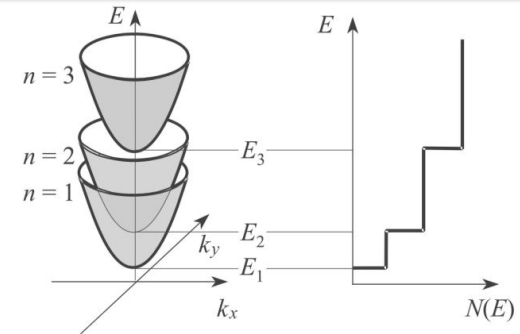
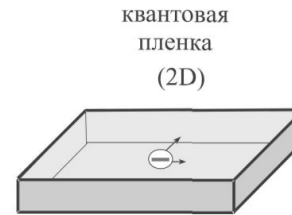
$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* l_z^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*}$$

У  $k$ -просторі енергетична діаграма квантової плівки - сімейство параболічних зон, які, перекриваються і утворюють підзони.

Мінімальна енергія електрона в  $n$ -ій підзоні

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

Електрон з такою енергією нерухомий **в площині плівки**.



Залежність густини електронних станів від енергії в квантовій плівці має східчастий вид (замість параболічної залежності в тривимірних структурах):

$$n_{2D}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2 l_z} \sum_i \Theta(E - E_i), \quad i = 1, 2, \dots,$$

$\Theta(E - E_i)$  -ступінчаста функція

Електрони в квантових плівках називають **двомірним електронним газом**

# Квантові шнур

Квантові шнур - одномірні (1D) структури.

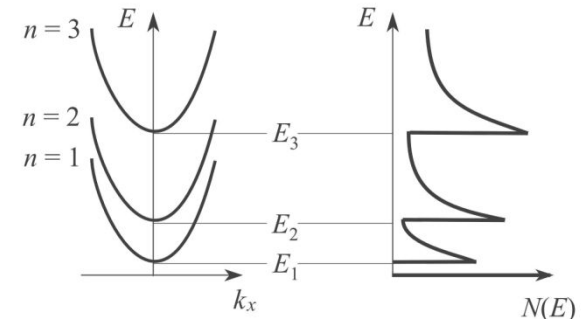
володіють двома нанорозмірами в напрямку яких і діє ефект квантового обмеження. Носії заряду можуть вільно рухатися тільки в одному напрямку - **уздовж осі шнура**.

Внесок в **енергію** носія заряду дають кінетична складова уздовж одного напрямку і квантовані значення в двох інших напрямках:

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2 n_1^2}{2m^* l_y^2} + \frac{\hbar^2 \pi^2 n_2^2}{2m^* l_z^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}, n_1 = 1, 2, \dots; n_2 = 1, 2, \dots$$

Для кожної пари дискретних рівнів в напрямках квантового обмеження густина електронних станів в квантовому шнурі залежить від енергії **за законом**  $E^{-0.5}$

$$n_{1D}(E) = \frac{(2m^*)^{1/2}}{\pi \hbar l_y l_z} \sum_{i,j} (E - E_{i,j})^{-1/2}, i, j = 1, 2, \dots$$





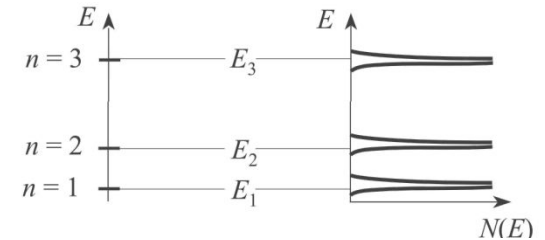
# Квантові

## точки

**Квантові точки** - нульмірні (0D) структури, в яких рух носіїв заряду обмежений у всіх трьох напрямках.  
У кожному з цих напрямків енергія електрона квантована, щільність станів - набір гострих піків, описуваних  $\delta$ -функціями:

$$n_{0D}(E) = \frac{2}{l_x l_y l_z} \sum_{i,j,k} \delta(E - E_{i,j,k}), \quad i, j, k = 1, 2, \dots$$

квантовая  
точка  
(0D)



**Квантові точки** складаються з порівняно невеликої кількості атомів-  
(**атомні кластери і кристаліти** нанометрових розмірів)

Елементарні низькорозмірні структури - **ідеалізовані об'єкти**.

Реальні низькорозмірні структури повинні розташовуватися на підкладці і мати контакт з іншими структурами та функціональними елементами.

Приладові застосування вимагають **комбінації** декількох елементарних структур.

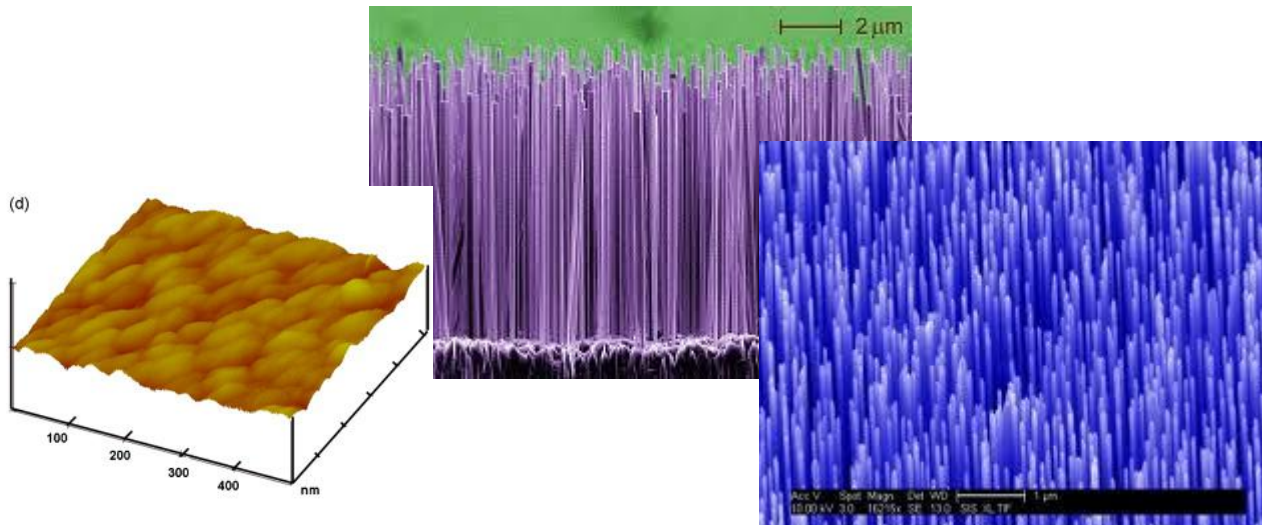
Незважаючи на появу в складних комбінованих структурах нових квантово-механічних ефектів, **визначальну роль** у них продовжує грати **квантове обмеження**.

# Квантові наноструктури: ВИГОТОВЛЕННЯ

Для виготовлення низькорозмірних структур використовують **два підходи** :  
геометричний і електронний.

**1. Геометричний** підхід передбачає використання технологій, які забезпечують формування об'єктів з нанометровими розмірами;

**2. Електронний** підхід базується на можливості керування розмірами областей з певним типом і концентрацією носіїв заряду в напівпровідниках з допомогою електричного поля. При цьому використовуються як традиційні структури метал / діелектрик / напівпровідник і метал / напівпровідник, так і напівпровідникові гетероструктури. Способи створення в напівпровідниках областей з квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього вбудованого електричного поля і шляхом докладання зовнішнього електричного зміщення розглянуті нижче.



## Балістичний транспорт носіїв заряду

---

Транспорт носіїв заряду визначається процесами їх розсіювання при русі з однієї області в іншу. При розсіюванні електрони змінюють свій стан.

**Середня довжина вільного пробігу** - середня відстань, яку електрон проходить між двома послідовними актами розсіювання.

**У макроскопічних системах** довжина вільного пробігу електронів менша розміру цих систем.

Справедливі припущення:

- 1) процеси розсіювання носіїв заряду локальні, тобто мають місце в певних точках простору;
- 2) розсіювання відбувається безперервно в часі;
- 3) і розсіювання, і поля, які ініціюють рух носіїв заряду, настільки слабкі, що викликані ними відхилення електронної системи від рівноваги можна розглядати незалежно один від одного;
- 4) масштаб часу для спостереження за системою обраний таким чином, що реєструються тільки ті події, які відбуваються за часів, що перевищують середній час між двома найближчими актами розсіювання.

**Результат** – для опису транспорту носіїв заряду в макроскопічних системах можна використовувати **кінетичне рівняння Больцмана**.

---

**У наноструктурах** умови для транспорту носіїв заряду відрізняються від макросистем.

У структурах з розміром менше довжини вільного пробігу перенесення носіїв заряду відбувається без їх розсіювання- балістичний транспорт.

Припущення 1-4 не виконуються.

Основні ефекти, що відносяться до балістичному транспорту, визначаються співвідношенням між розмірами структури, в якій має місце перенесення носіїв заряду, і характерними довжинами вільного пробігу.

Ключовими є довжини вільного пробігу, що характеризують **пружне і непружне розсіювання носіїв**.

---

## Балістичний транспорт носіїв

### заряду

Середня довжина вільного пробігу при пружному розсіянні - середня відстань, яку проходить носій заряду між двома послідовними актами пружного розсіяння.

Коли електронна система вироджена при низькій температурі, вона описується:

швидкістю Фермі  $v_F = (2E_F/m^*)^{1/2}$

Середня довжина вільного пробігу при пружному розсіянні

часом розсіювання  $\tau_{sc} = Dd/v_F^2$

$$l_e = v_F \tau_{sc}$$

Середня довжина вільного пробігу при непружному розсіюванні - відстань, на якому електронна хвиля змінює свою фазу внаслідок розсіювання

$$l_{in} = v_F \tau_\phi$$

де  $\tau_\phi$  - час релаксації фази (або енергії)

Довжина фазової когерентності - відстань на якій електронна хвиля зберігає свою фазу (носій зберігає свою «фазову пам'ять»).

Довжина фазової когерентності менша ніж середня довжина вільного пробігу при непружному розсіюванні. Обидва параметри важливі при аналізі умов інтерференції електронних хвиль.

У твердих тілах середня довжина вільного пробігу для непружного розсіяння більша ніж для пружного.



## Балістичний транспорт носіїв заряду

---

$$\lambda_F = 2\pi/k_F$$

Довжина хвилі Фермі

При  $T = 0$  електрони перебувають у станах, обумовлених співвідношенням  $|k| < k_F$ , що еквівалентно хвилям з довжинами  $\lambda > \lambda_F$ .

Порівнюючи розмір наноструктури з середньою довжиною вільного пробігу електронів і з довжиною хвилі Фермі можна передбачити основні особливості руху носіїв заряду.

**У металах** середня довжина вільного пробігу електронів не перевищує 10 нм - *балістичний транспорт* в металевих наноструктурах *реалізується важко*. Довжина хвилі Фермі **в металах** - 0,1-0,2 нм - квантування енергетичних рівнів в металах не є суттєвим фактором і енергетичний спектр металевих квантових точок визначається переважно кулонівською взаємодією.

**У напівпровідниках** середня довжина вільного пробігу електронів становить до одиниць мікрометрів.


Довжина хвилі Фермі **в напівпровідниках** - 30-50 нм.

---

**Важливо:**

Коли розмір структури стає співмірним з цими довжинами - квантування енергії внаслідок квантового обмеження стає визначальним фактором, що визначає її електронні властивості і транспорт носіїв заряду.

---



## Балістичний транспорт носіїв

### задача

У напівпровідниках середня довжина вільного пробігу електронів становить до одиниць мікрометрів

| Параметр, единица измерения                                  | Si        | GaAs    |
|--------------------------------------------------------------|-----------|---------|
| Скорость Ферми, $10^7$ см/с                                  | 0,97      | 2,76    |
| Длина волны Ферми, нм                                        | 39        | 39      |
| Время рассеяния, $10^{-12}$ с                                | 1,1       | 3,8     |
| Время релаксации фазы, $10^{-12}$ с                          | 5,7       | 18      |
| Коэффициент диффузии, $10^3$ см <sup>2</sup> /с              | 0,52      | 1,45    |
| Средняя длина свободного пробега при упругом рассеянии, нм   | 107       | 1050    |
| Средняя длина свободного пробега при неупругом рассеянии, нм | 500       | 5000    |
| Длина фазовой когерентности, нм                              | 540       | 1620    |
| Эффективная масса, $m_0$                                     | 0,19      | 0,067   |
| Время релаксации спина                                       | 14–60 мс* | 5–80 пс |

При кімнатній температурі середня довжина вільного пробігу електронів при непружному розсіюванні досягає **50-100 нм в Si** і близько **120 нм в GaAs**.

Параметри транспорту електронів в **Si** і **GaAs** при температурі 4 К

**Висновок** : в напівпровідникових наноструктурах балістичний транспорт легко реалізується.



## Балістичний транспорт носіїв заряду

**Універсальна балістична провідність** – характеристика балістичного транспорту носіїв заряду в наноструктурах, не залежить від типу матеріалу і визначається лише фундаментальними константами

Резервуари заповнені електронами, значення хімічних потенціалів  $\mu_1$  та  $\mu_2$ , причому  $\mu_1 > \mu_2$ .  
Якщо електронні стани першого резервуара в інтервалі енергій від  $\mu_1$  до  $\mu_2$  повністю зайняті, то між резервуарами протікає струм

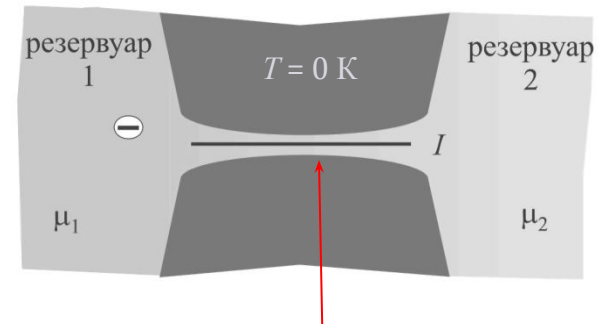
$$I = (\mu_1 - \mu_2)ev(dn/d\mu)$$

де  $e$  - заряд електрона;  $v$  - складова швидкості електронів на поверхні Фермі уздовж осі каналу;  $dn/d\mu$  - щільність електронних станів в каналі



$$G = I/(V_1 - V_2) = e^2/\pi\hbar = 2e^2/h.$$

**Провідність ідеального одновимірного провідника** в балістичному режимі визначається тільки фундаментальними константами - зарядом електрона і постійною Планка



**Квантовий шнур**

$$dn/d\mu = 1/\pi\hbar v.$$
$$\mu_1 - \mu_2 = e(V_1 - V_2).$$

Якщо провідний канал має  $N$  дозволених станів з енергіями нижче рівня Фермі ( $N$  передавальних мод)

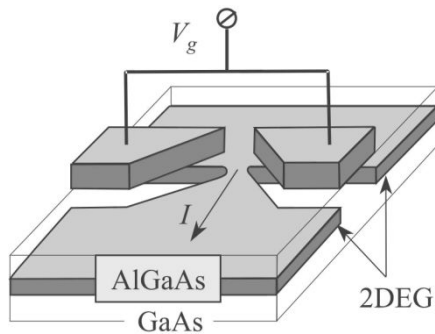
$$G = N(2e^2/h).$$

# Балістичний транспорт носіїв заряду

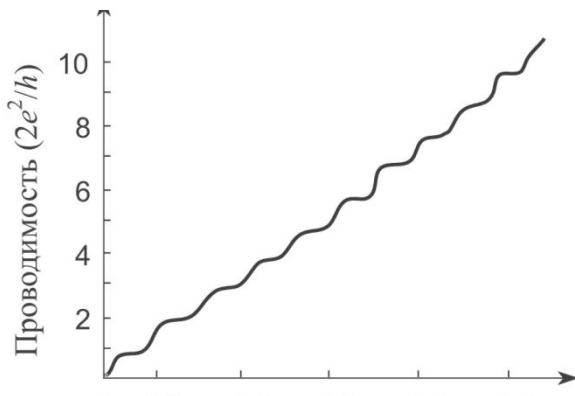
## Висновок

Провідність каналу з декількома передавальними модами квантується в одиницях  $2e^2/h$ .

Явище спостерігається в **квантових точкових контактах**, які являють собою «вузькі» перемички, що з'єднують резервуари з електронами.



1. Транспорт заряду через звуження в двомірній провідній структурі (2DEG) **контролюється** затворами, що мають форму клинів.
2. Щоб витіснити двомірний електронний газ з-під затворів і сформувати провідний канал, на затвори подається негативний потенціал. Напруга  $V_g$  визначає ширину каналу. При збільшенні негативного зсуву ширина каналу зменшується і канал зникає.
3. Якщо ж ширина каналу росте, то кількість дозволених (тих, що лежать нижче рівня Фермі) станів збільшується - на кривій провідності з'являються сходинки, відповідні числу станів  $N$ .



Якщо канал провідності не ідеальний, то розсіяння носіїв заряду призводять до зменшення струму- ймовірність перенесення носіїв заряду стає меншою одиниці.



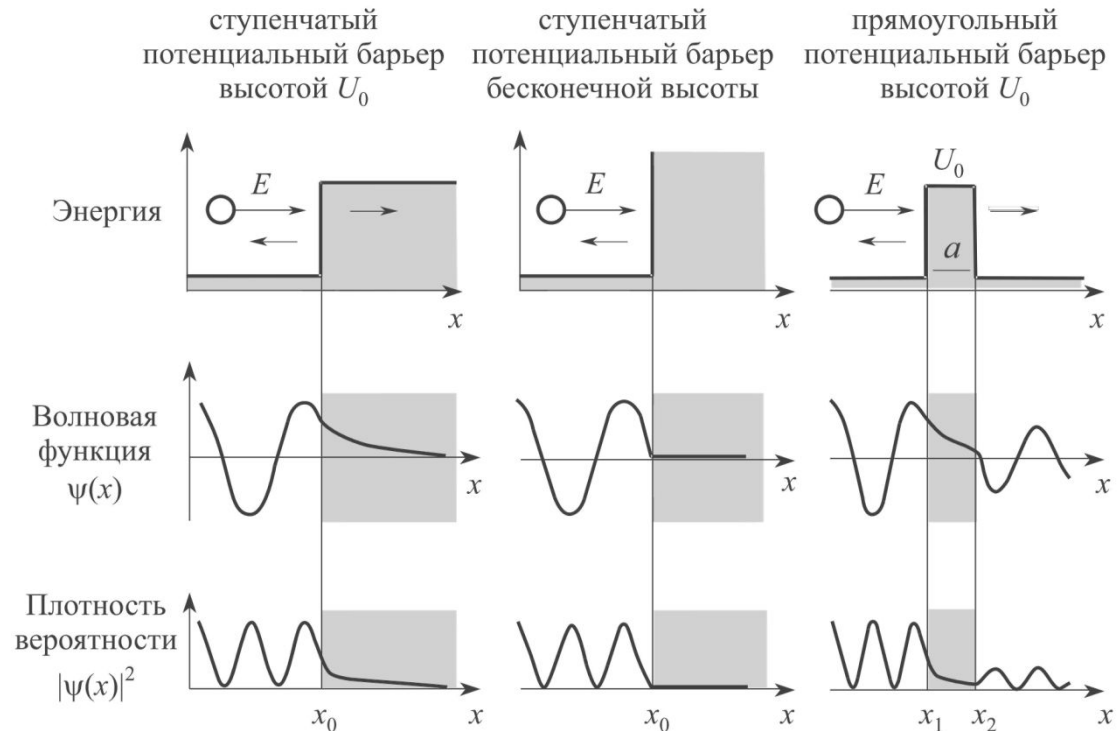
# Тунелювання носіїв заряду

**Тунелювання** - перенесення частинки через область, обмежену потенціальним бар'єром, висота якого більша повної енергії частинки.

Ефект неможливий з точки зору класичної механіки, але має місце для квантових частинок, яким властивий **корпускулярно-хвильовий дуалізм**.

Додатково хвильові властивості квантових частинок приводять до ефекту **надбар'єрного відображення**.

Взаємодія квантової частинки з повною енергією  $E$  з бар'єрами різного типу



# Тунелювання носіїв

## заряду

Рух частинки в одновимірному потенціальному полі  $U(x)$  описується рівнянням Шредінгера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x)$$

1

$$E > U_0 \quad k_1 = (1/\hbar)\sqrt{2mE}$$

Якщо енергія квантової частинки більша висоти бар'єру, то в області перед бар'єром ( $U(x) = 0$ ) розв'язок рівняння Шредінгера для частинки - суперпозиція двох хвиль :

$$\psi = A' \exp(ik_1x) + B \exp(-ik_1x)$$

**Перший член** в відповідає падаючій на бар'єр хвилі, що рухається уздовж осі  $x$  зліва направо.

**Другий член** описує відбиту хвилю, що рухається вздовж осі  $x$  в протилежному напрямку.

При  $x \rightarrow \infty$  хвильова функція частинки, що пройшла над бар'єром має асимптотичний вигляд:

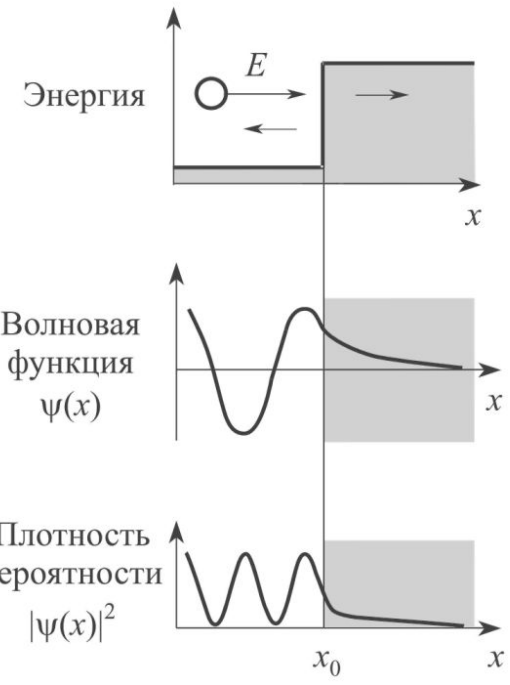
$$\psi = A \exp(ik_2x) \quad k_2 = (1/\hbar)\sqrt{2m(E - U_0)}$$

**Коефіцієнт проходження** частинки через потенціальний бар'єр - відношення щільності потоку в хвилі що пройшла бар'єр до щільності потоку в падаючій хвилі

$$T(E) = \frac{k_2}{k_1} |A|^2$$

**Коефіцієнт відбивання** частинки від потенціального бар'єру - відношення щільності відбитого потоку до густини падаючого потоку

$$R(E) = |B|^2 = 1 - \frac{k_2}{k_1} |A|^2$$



## Тунелювання носіїв заряду

Постійні  $A$  і  $B$ , визначені з умови неперервності хвильової функції і її першої похідної при  $x = x_0$ :

$$A = \frac{2k_1}{k_1 + k_2}, \quad B = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$$

Коефіцієнти проходження і відбивання

$$E = U_0 (k_2 = 0) \longrightarrow R(E) = 1$$

$$R(E) = \left( \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right)^2, \quad T(E) = \frac{4k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2}$$

## Тунелювання носіїв заряду

Якщо квантова частинка рухається над прямокутним потенціальним бар'єром висотою  $U_0$  і скінченної товщини  $a = x_2 - x_1$ , то розв'язок рівняння Шредінгера для кожної з трьох областей має вигляд:

$$\psi_1 = \exp(ik_1x) + C\exp(-ik_1x), \quad x < x_1,$$

$$\psi_2 = D\exp(ik_2x) + F\exp(-ik_2x), \quad x_1 < x < x_2,$$

$$\psi_3 = G\exp(ik_1x), \quad x > x_2,$$

Коефіцієнт проходження

$$T(E) = \frac{4k_1^2 k_2^2}{(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2(ak_2) + 4k_1^2 k_2^2}$$

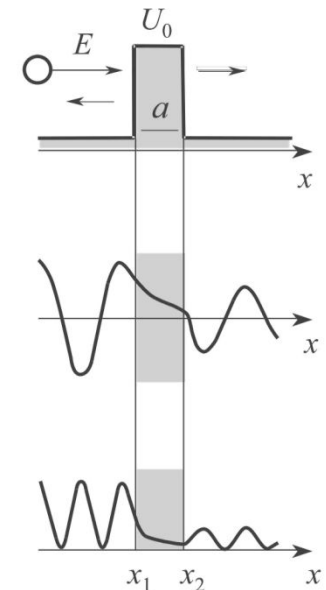
Максимум коефіцієнта проходження  $T(E) = 1$  досягається для частинок з енергіями:

$$E = U_0 + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \quad \text{где } n = 0, 1, 2, 3$$

При інших значеннях енергії спостерігається часткове відбивання падаючих на бар'єр частинок.

### Висновок

навіть у випадку, коли енергія падаючої на потенціальний бар'єр частинки більше висоти цього бар'єру, коефіцієнт її відбивання може бути відмінний від нуля.



## Тунелювання носіїв заряду

2

Енергія квантової частинки менша висоти бар'єру -

$E < U_0$  бар'єр непроникний для класичної частинки

Частинка буде відбиватися в **класичних точках повороту**

**Точка повороту** - точка з координатою  $x$ , в якій кінетична енергія частинки стає рівною нулю, тобто її повна енергія  $E$  дорівнює  $U(x)$ .

Для прямокутного бар'єру **точки повороту збігаються з координатами його меж** (точки  $x_1$  і  $x_2$ ). Досягнувши точки повороту частинка змінює напрямок руху - починає рух в зворотному напрямку.

Для квантової частинки **розв'язок рівняння Шредінгера** в кожній з трьох областей (перед, всередині і за бар'єром) :

$$\zeta = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}$$
$$k_1 = (1/\hbar) \sqrt{2mE}$$

Коефіцієнт тунельної прозорості бар'єру

$$T(E) = \frac{4k_1^2 \zeta^2}{(k_1^2 + \zeta^2)^2 \operatorname{sh}^2(a\zeta) + 4k_1^2 \zeta^2}$$

↓

$$a\zeta \gg 1$$
$$T(E) \cong T_0 \exp\left(-\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}\right)$$
$$T_0 = 16E(U_0 - E)/U_0^2.$$

Падаюча хвиля

Відбита хвиля

$$\psi_1 = \exp(ik_1x) + B_1 \exp(-ik_1x), \quad x < x_1,$$

$$\psi_2 = A_2 \exp(-\zeta x) + B_2 \exp(\zeta x), \quad x_1 < x < x_2,$$

$$\psi_3 = A_3 \exp(ik_1x), \quad x > x_2,$$

Хвиля, що пройшла через бар'єр

## Тунелювання носіїв заряду

---

### Особливості тунелювання електронів у низькорозмірних

– дискретна природа переносимого електронами заряду

**наслідок** – явище «одноелектронного тунелювання».

-дискретність енергетичних станів носіїв заряду в напівпровідникових наноструктурах з квантовими ямами, яка виникає через квантове обмеження.

Тунельне перенесення носіїв заряду через потенціальний бар'єр з певного рівня на енергетично еквівалентний йому рівень за бар'єром відбувається із збереженням енергії та імпульсу електрона.

**наслідок** – ріст тунельного струму - ефект «резонансного тунелювання».

В наноструктурах, що містять магнітні та немагнітні матеріали, певна спінова поляризація тунелюючих електронів призводить до **спінових ефектів**.

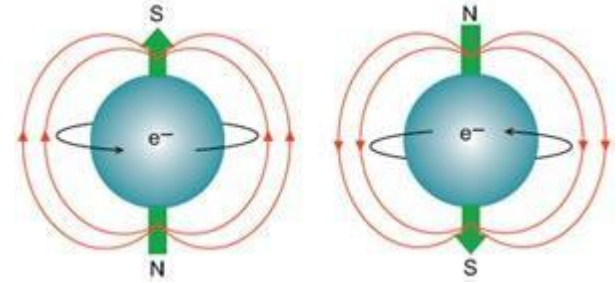
Ці явища знаходять практичне застосування в наноелектронних приладах.



## Спінові

Окрім маси і заряду електрон повинен мати власний момент кількості руху  $\mu_s$  - **спін**

$$\mu_s = (\sqrt{3}/2)h$$

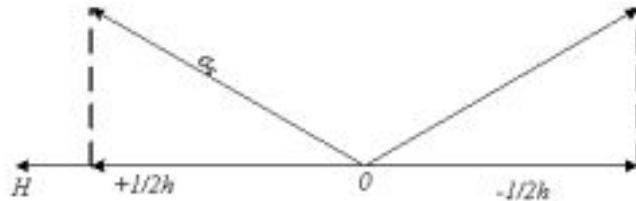


**Спін**, як і маса та заряд - **первинна невід'ємна властивість електрона**, що не зводиться до чого-небудь простішого.

Проекція спіну на вибраний напрям  $H$  може приймати лише два значення

$$\mu_{sH} = \pm 1/2h$$

$$\mu_{sH} = sh$$



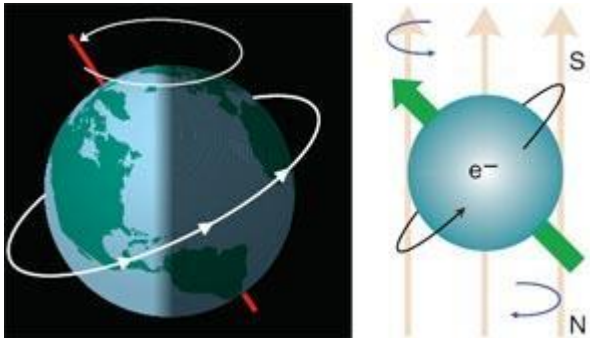
$s$ - квантове число спіна (quantum number spin).  
 $s$  може приймати два значення:  $+1/2$  і  $-1/2$ .

Орієнтація спіну  $\mu_s$  відносно вибраного напрямку

## Спінові ефекти

**Спін** призводить до появи нових особливостей транспорту носіїв заряду в наноструктурах.

Якщо помістити електрони в магнітне поле, то їхні спіни орієнтуються вздовж напрямку поля.  
При цьому вони будуть прецесіювати (обертатися) навколо силових ліній.  
Якщо вимкнути поле, прецесія спіна припиняється і його орієнтація фіксується.  
Використовуючи ефект прецесії, можна міняти спіновий стан електрона і тим самим змінювати біт інформації, переносимий електроном, з логічного "0" на "1" і назад.



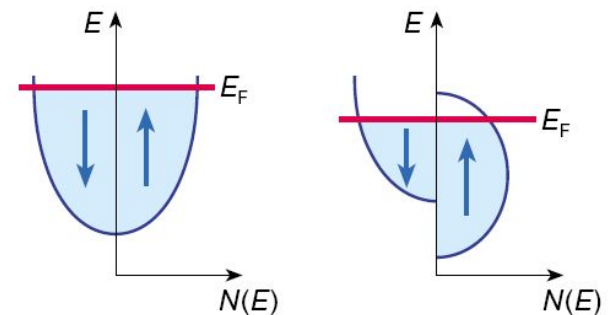
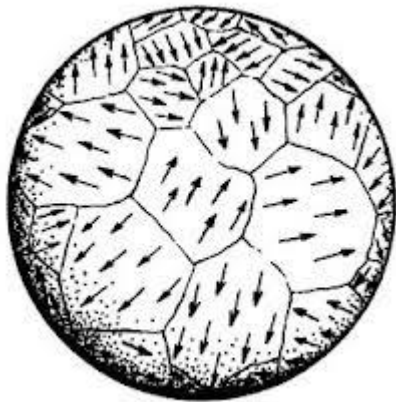
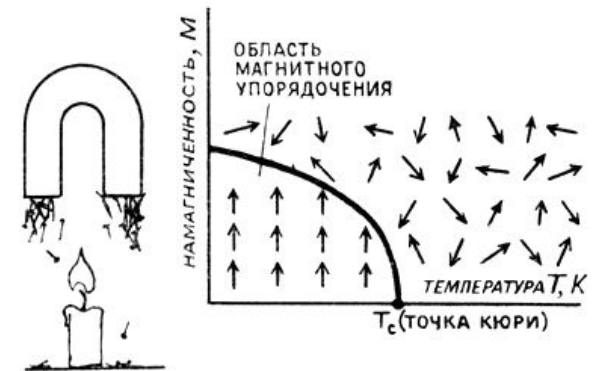
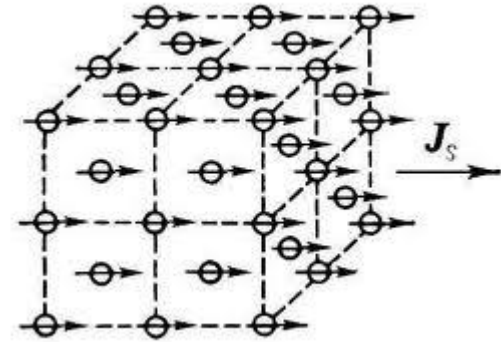


## Спінові

**Феромагнетизм** - магнітовпорядкований стан речовини, у якому більшість атомних магнітних моментів паралельні один одному, так що речовина володіє спонтанною намагніченістю.

**Феромагнетики** - речовини, в яких при температурах нижче критичної ( точки Кюрі) встановлюється дальній порядок орієнтації магнітних моментів атомів або іонів.

**Феромагнетик** при температурі нижче точки Кюрі володіє намагніченістю при відсутності зовнішнього магнітного поля

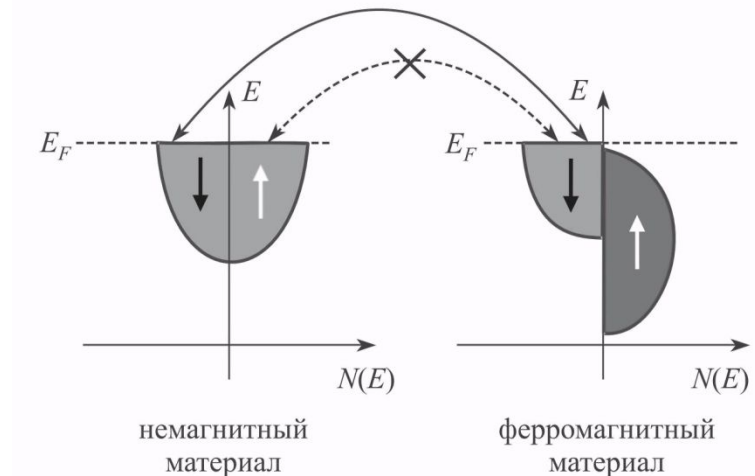


## Спінові ефекти

**Спінові ефекти** виникають, коли в матеріалі з'являється спіновий дисбаланс заселеності рівня Фермі.

**Дисбаланс** типовий для ферромагнітних матеріалів, у яких густини вакантних станів для електронів з різними спінами практично ідентичні, проте ці стани істотно розрізняються по енергії.

**Енергетичний зсув** приводить до заповнення дозволених зон електронами з одним певним спіном і до появи у матеріалі власного магнітного моменту (намагніченості).



Заселеність енергетичних зон електронами з різним спіном визначає **спінову поляризацію** електронів і особливості транспорту носіїв заряду.

**Спінова поляризація** електронів в матеріалі ( $P$ ) - відношення різниці концентрацій електронів з різними спінами до їх загальної концентрації:

$$P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}}$$

| Матеріал       | Co | Fe | Ni | Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub> * | CoFe | NiMnSb | CrO <sub>2</sub> |
|----------------|----|----|----|-------------------------------------|------|--------|------------------|
| Поляризація, % | 42 | 46 | 46 | 45                                  | 47   | 58     | 90               |

## Спінові ефекти

Електричний струм в твердотільних феромагнітних наноструктурах залежить від **спінової поляризації носіїв заряду** і **спінової поляризації областей**, через які ці носії рухаються.

Електрони інжектвані з певним спіном займають в колекторі тільки позиції з такою ж орієнтацією спіна.

Спін-поляризований електрон після інжекції при русі розсіюється і змінює імпульс та спін.

Для практичних застосувань використовується «пам'ять» спінової орієнтації.

**Довжина спінової релаксації** - характеристика «спінової пам'яті», середня відстань, пройдена електроном до зміни свого спіна (близько 100 нм в твердих тілах).

Середня довжина пробігу електрона при непружному розсіюванні

$$l_s = (l_{in} v_F \tau_{\uparrow\downarrow})^{1/2}$$

Час релаксації спіну

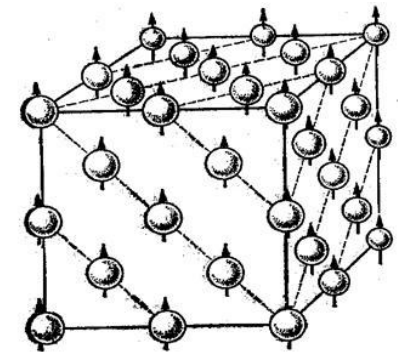
У спін-поляризованих матеріалах стани з переважаючим спіном контролюються **намагніченістю**.

Якщо намагніченість змінюється на протилежну, то переважна орієнтація спінів також змінюється на протилежну.

При інжекції спін-поляризованих електронів в матеріал з відмінною від нуля намагніченістю (спіною поляризацією), яка контролюється зовнішнім магнітним полем, цей матеріал може вести себе як провідник або як ізолятор - в залежності від напрямку намагніченості і орієнтації спінів інжектованих електронів.

При **однаковому напрямку спінів** інжектованих електронів і електронів матеріалу забезпечується **найвища провідність**.

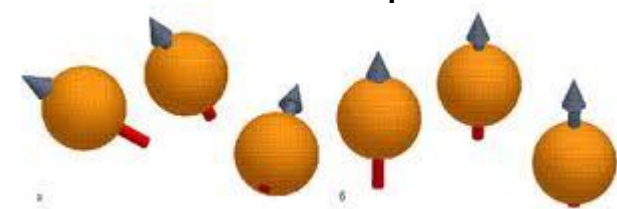
Протилежний напрямок спінів перешкоджає проходженню електронів через матеріал.



## Спінові ефекти

Явища, які є наслідком особливостей транспорту носіїв заряду, контрольованого спіном електронів в нанорозмірних структурах:

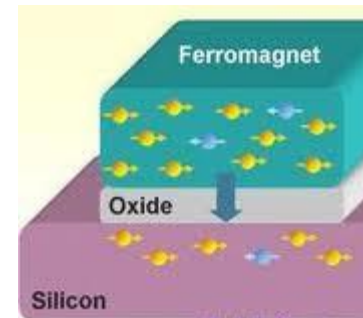
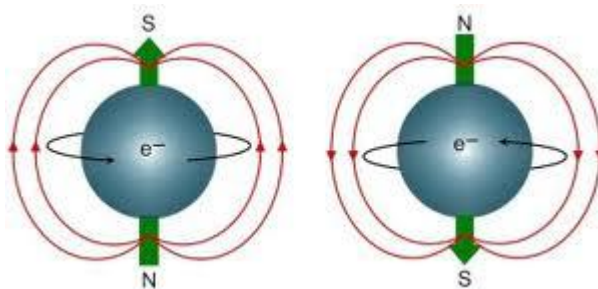
1. гігантський магнітопір
2. тунельний магнітоопір



На цих ефектах будується новий напрям в науці і техніці : **спінтроніка**.

**Мета спінтроніки** - створення елементів електронної обробки інформації з використанням в якості носіїв інформації як заряду електрона, так і його спіна.

**Напрямок** - можливість контролювати і керувати спіновими станами в твердих тілах дозволяє реалізацію квантових обчислень, які обіцяють революційний прогрес у розвитку інформаційних систем.



## Структури з квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього електричного поля

---

**Ідея** : донорні та акцепторні домішки в напівпровідниках а також гетеропереходи (НП/ НП, НП/ діелектрик) спричиняють локальний перерозподіл зарядів в ТТ.

**Наслідок** : виникнення внутрішнього електричного поля

**Використання** : створення потенціальних бар'єрів, які обмежують рух електронів в нанообластях.

**Типи структур з квантовим обмеженням :**

квантові колодязі,

модуляційно-леговані структури

дельта-леговані структури

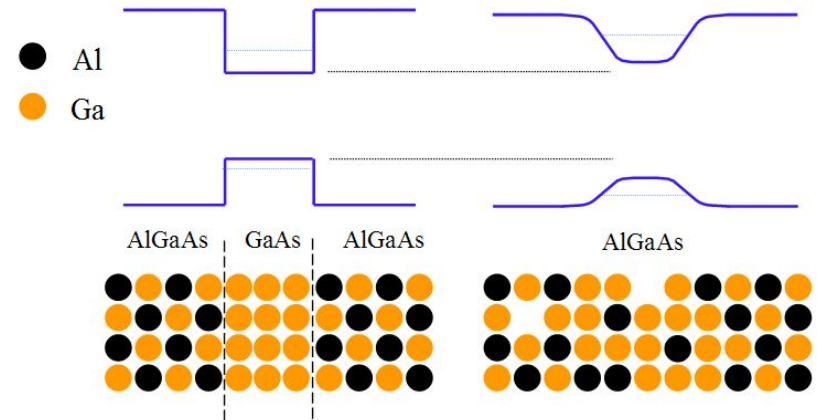
---



## Квантові колодязі

**Квантовий колодязь** - структура, що складається з напівпровідників з різною шириною забороненої зони (або напівпровідника і діелектрика), в якій нанорозмірна область з матеріалу з меншою шириною забороненої зони знаходиться між областями з матеріалу з більшою шириною забороненої зони

Повторення структури в просторі - **періодичні квантові колодязі**



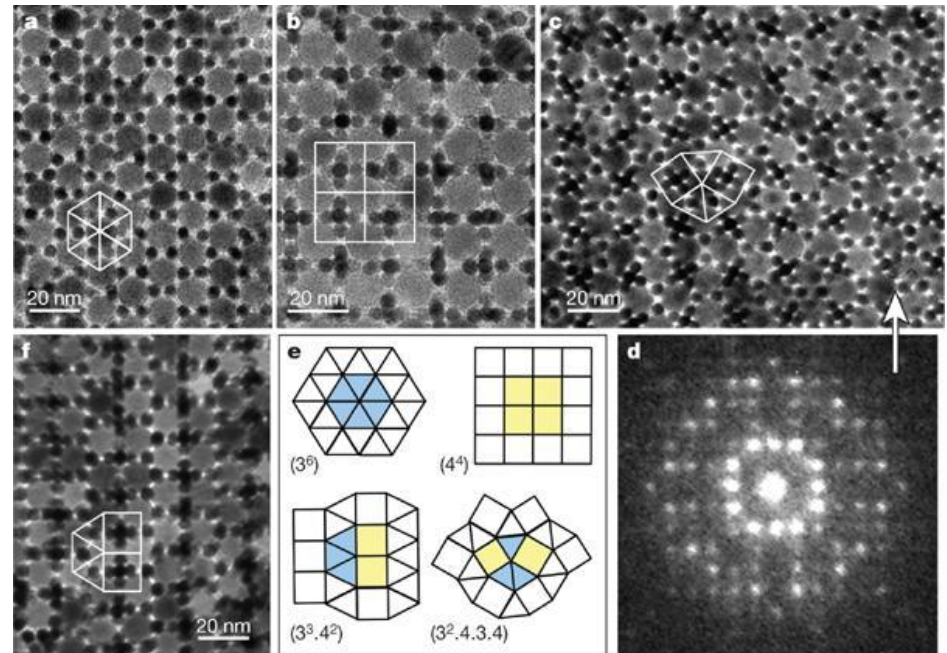
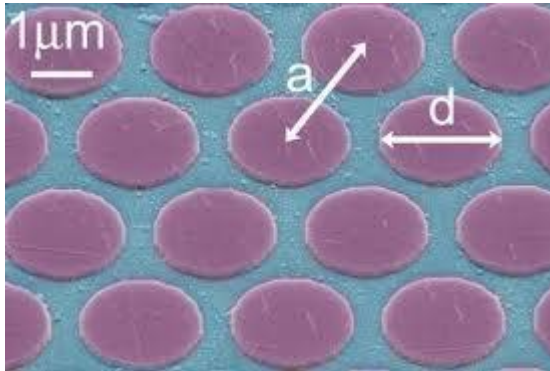
**Приклади твердотільних квантових колодязів:**

- надгратки, виготовлені з напівпровідників з різними електронними характеристиками
- нанорозмірні кластери і шари кремнію, вбудовані в діоксид кремнію.



# Надґратки

**Надґратка** - монокристалічна плівка певного матеріалу, стала ґратки якої відтворює сталу ґратки монокристалічної підкладки підкладки з іншого матеріалу, або будь-яка періодична структура, яка складається з нанорозмірних елементів



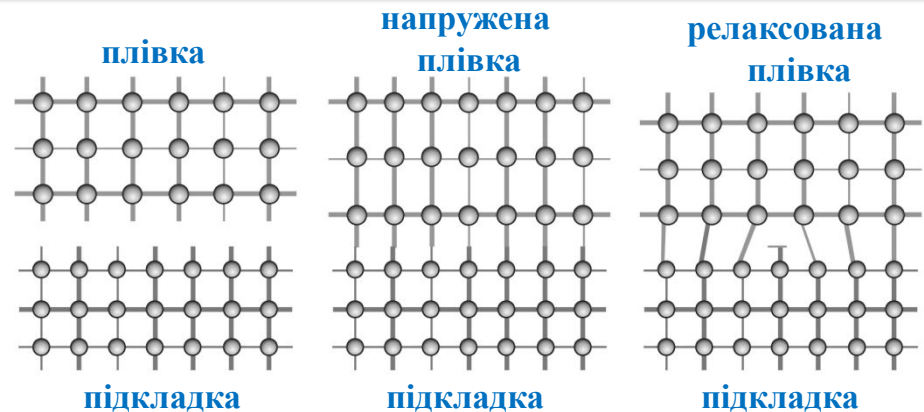
# Надгратки

Типи надграток:

**Псевдоморфні** – сталі граток плівки і підкладки співпадають

**Напружені** – сталі граток плівки і підкладки неспівпадають, структура релаксує через формування дислокацій невідповідності

Напруги зростають при збільшенні товщини плівки.  
При досягненні **критичної товщини** напруги релаксують-  
повна енергія системи знижується.





Напівпровідники, з'єднані суцільними лініями, утворюють **стабільні проміжні сполуки**.

### Приклад

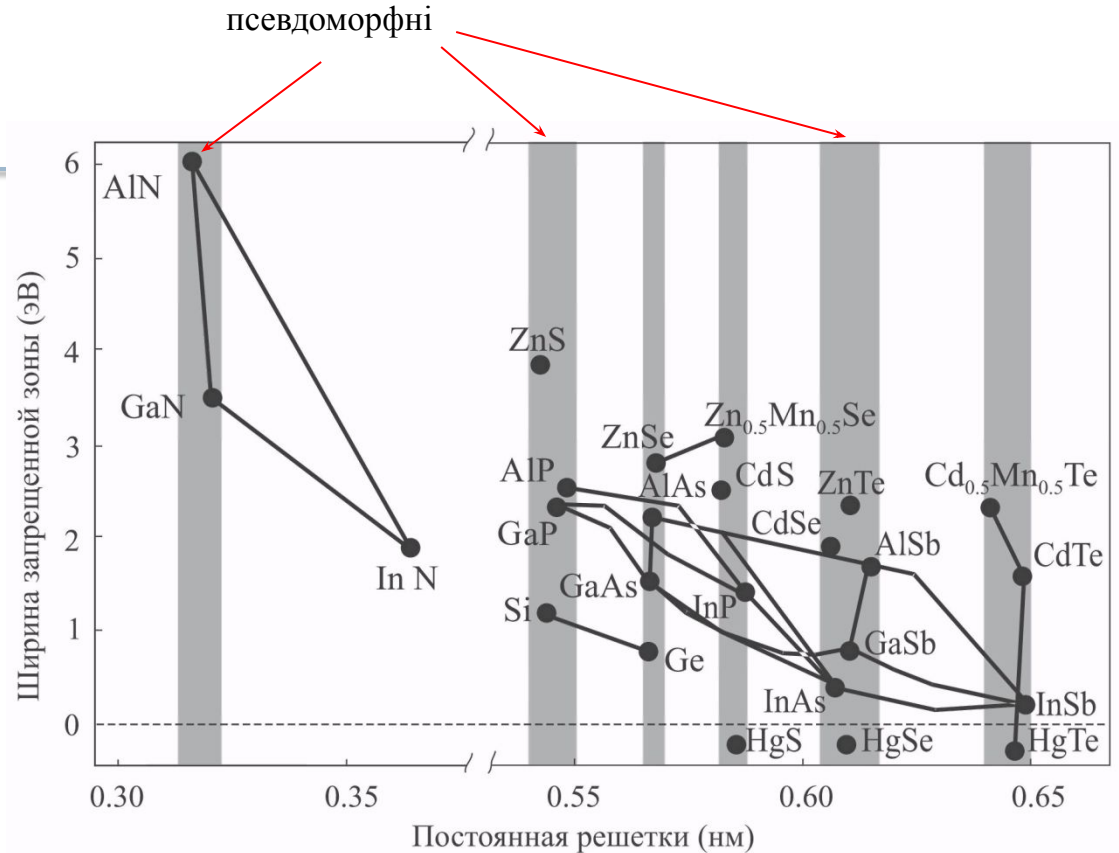
подвійних сполук SiGe,  
потрійних - AlGaAs,  
четверних - GaInAsP.



$$0 < x < 1$$

$$\Delta a < 0,15\%$$

$$\Delta E_g < 0,8 \text{ eV}$$



Матеріали, що використовуються при формуванні надграток

### Правило Вегарда:

стала ґратки проміжної сполуки  $a(x)$  лінійно змінюється в інтервалі між постійними ґраток матеріалів, які утворюють її

$$a(x) = xa_1 + (1 - x)a_2$$

## Енергетична діаграма квантового колодязя

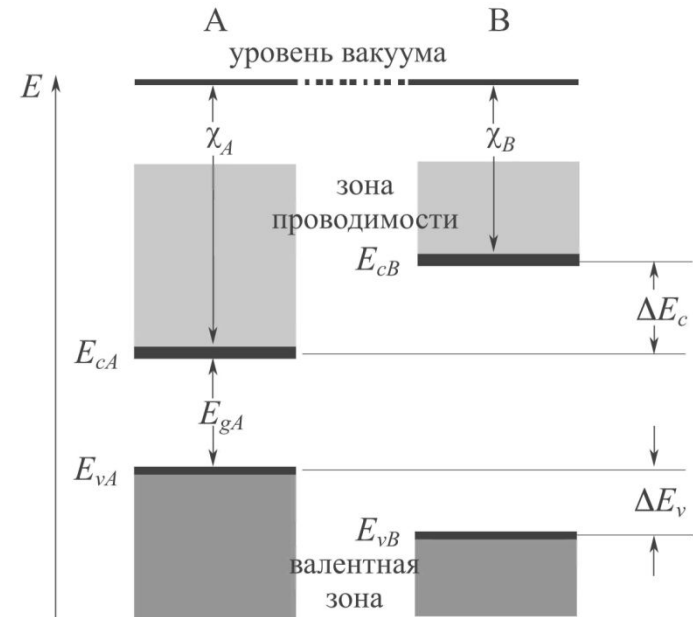
**Спорідненість до електрона  $\chi$**  - енергія, необхідна для переносу електрона з дна зони провідності  $E_c$  у вакуум, де він може покинути матеріал; спорідненість до електрона не залежить від положення рівня Фермі (на відміну від роботи виходу, яка відраховується від енергії Фермі і залежить від ступеня легування матеріалу).

**Правило Андерсона** - для двох матеріалів, що утворюють гетероперехід, енергії електронних станів у вакуумі однакові.

**Наслідок** : зсув між зонами провідності стає рівним

$$\Delta E_c = E_{cB} - E_{cA} = \chi_A - \chi_B$$

При температурах вище абсолютного нуля неузгодженість рівнів Фермі в контактуючих матеріалах усувається за рахунок перерозподілу вільних носіїв заряду поблизу межі розділу між областю колодязя і областю бар'єру.



| Матеріал    | Si   | Ge   | AlP  | AlAs | AlSb | GaP  | GaAs | GaSb | InP  |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $E_g$ , eВ  | 1,12 | 0,66 | 2,45 | 2,15 | 1,60 | 2,27 | 1,42 | 0,68 | 1,34 |
| $\chi$ , eВ | 4,05 | 4,13 | 3,44 | 3,51 | 3,65 | 3,08 | 4,07 | 4,06 | 4,38 |

## Модуляційно-леговані структури

**Традиційний метод** створення в НП областей з необхідним типом основних носіїв заряду (електрони чи дірки) - легування донорними або акцепторними домішками.

**Проблема** : при температурі вище абсолютного при іонізації атомів домішки утворюються йони, які впливають на транспорт вільних носіїв заряду, рухливість яких знижується через посилення розсіювання на іонізованих домішках за рахунок кулонівського взаємодії з ними.

Необхідність досягнення великої концентрації рухливих носіїв заряду неможлива з одночасним забезпеченням їх високої рухливості.

**Вимога**: високочастотні прилади вимагають великих концентрацій носіїв заряду з максимально можливою рухливістю.

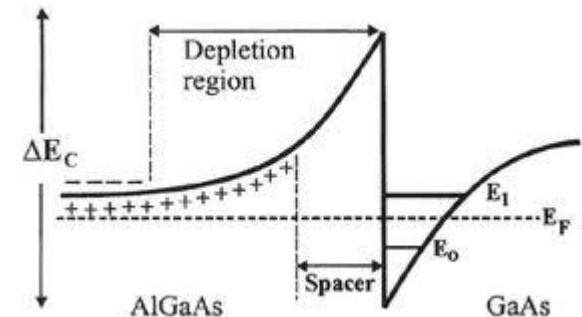
**Розв'язок** – створення модуляційно-легованих структур

**МЛС** – структури в яких область напівпровідника, де генеруються носії заряду, і область, де здійснюється їх перенесення, просторово розділені.

Використовуються гетероструктури, утворені напівпровідниками з різною шириною забороненої зони.

**Переваги** модуляційного легування

- електрони відокремлені від донорних атомів, що послаблює їх розсіювання
- біля межі гетеропереходу утворюється двомірний електронний газ



## Модуляційно-леговані структури

У МЛ-структурі донорна домішка вводиться в НП з більшою шириною забороненої зони.

Структура зберігає електричну нейтральність доти, поки донори не іонізовані.

Після іонізації електрони перетинають межу розділу і переходять у сусідню область. Там електрони втрачають свою енергію і локалізуються в прикордонній області, оскільки не можуть перейти потенціальний бар'єр  $\Delta E_c$ .

Електрони в потенціальній ямі індукують електростатичний потенціал, що разом з притяганням позитивних іонів донора «притискає» їх до межі розділу між матеріалами А і В.

У результаті утворюється квантовий колодезь з приблизно трикутним просторовим профілем розподілу потенціалу. Ширина колодезя - декілька нанометрів.

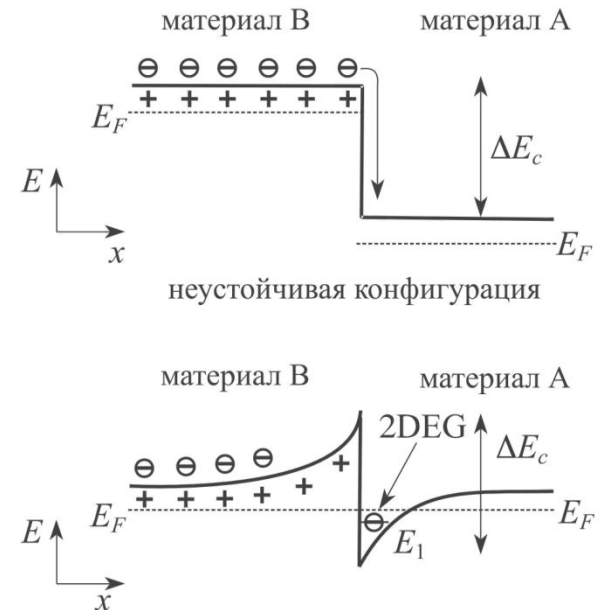
Енергетичні рівні для поперечного (уздовж осі  $x$ ) руху електронів є квантованими

### Приклад

гетероструктура на основі з  $n\text{-AlGaAs}$  (матеріал з більшою шириною забороненої зони) і нелегованого  $\text{GaAs}$ .

**Рухливість** електронів  $2 \cdot 10^7 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  - **рекорд**.

**Концентрація** електронів в двомірному електронному газі  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  - **звичайна**.



## Дельта-леговані структури

**ДЛ-структури** – НП структури з нерівномірним профілем розподілу домішок, що характеризується локалізацією домішкових атомів в дуже тонкому внутрішньому шарі (в ідеалі - в межах одного моношару).

Носії заряду в сильно легованій області пов'язані кулонівською взаємодією з іонізованими домішковими атомами, тому вони не йдуть далеко від області локалізації домішок.

Електричне поле іонізованих домішкових атомів екранується полем вільних носіїв заряду.

Для рухливих носіїв утворюється V-подібний квантовий колодезь

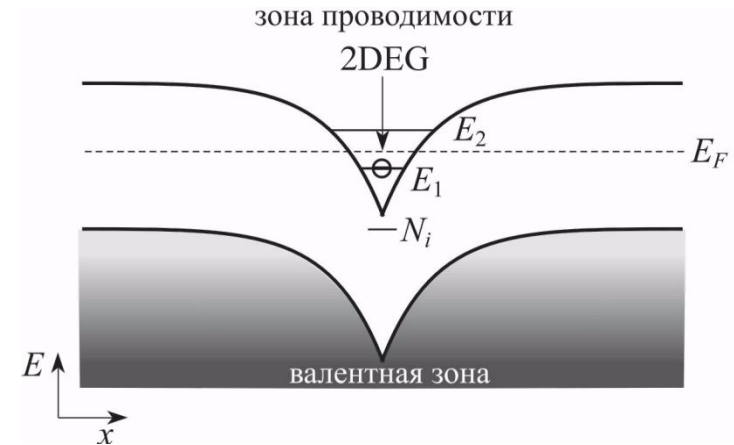
$$U(x) = \frac{me^4}{\varepsilon^2 \hbar^2} \left[ \left( \frac{15\pi^3}{8\sqrt{2}} N_i^2 (a_B^*)^4 \right)^{-1/10} + \sqrt{\frac{2\sqrt{2}}{15\pi}} \frac{x}{a_B^*} \right]^{-4},$$
$$a_B^* = \varepsilon \hbar^2 / me^2$$

Енергетичні стани у колодезі квантуються, утворюються двомірні підзони, які заповнюються електронами.

### Приклад ДЛ-структури

моноатомний шар кремнію, нанесений на монокристал GaAs і потім покритий епітаксialьним шаром GaAs. Донорні атоми кремнію, перерозподіляються дифузійно, залишаючись в околі вихідного моноатомного шару. Область квантового обмеження для електронів становить до 10 нм.

Шарова концентрація електронів в двомірному електронному газі досягає високих значень (до  $10^{14} \text{см}^{-2}$ ), але ціною зменшення їх рухливості.



# Структури з квантовим обмеженням за рахунок зовнішнього електричного поля

---

## Ідея

Керування рухом носіїв в НП зовнішнім потенціалом, прикладеним через затвор, використовується для створення потенціальних бар'єрів на границях метал/напівпровідник і напівпровідник / діелектрик.

## Можливості

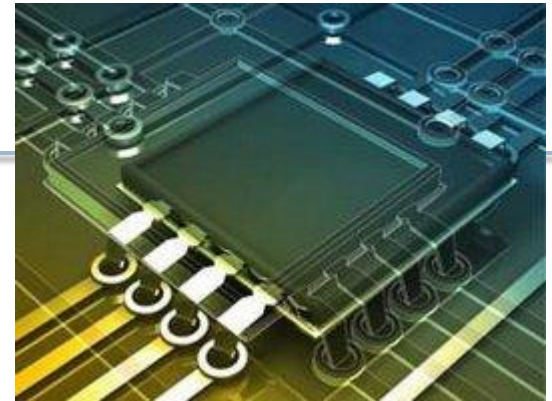
Вибір полярності потенціалу дозволяє формувати в НП області, збагачені або збіднені носіями заряду поблизу цих меж розділу.

## Наслідок

Розмір областей під впливом ефекту поля залежить від величини прикладеної напруги. Електрони чи дірки в цих областях можуть відчувати квантове обмеження.

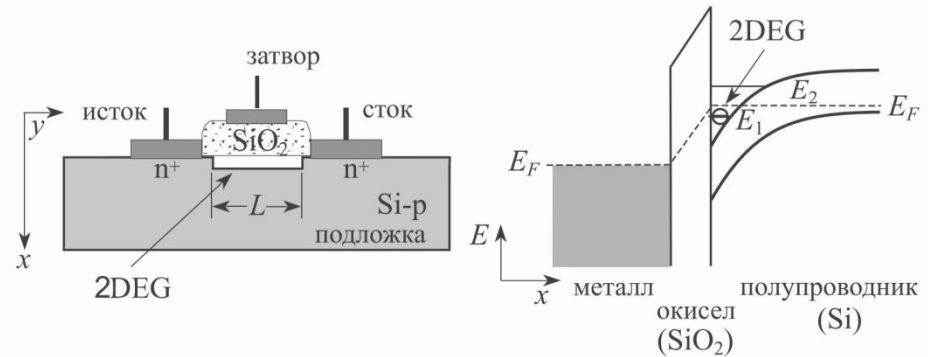
## Результат

Формування електростатично індукованих нанорозмірних структур.



## Структури метал / діелектрик / напівпровідник

Рух електронів в одному напрямі може бути обмежений структурами метал/окисел/НП (МОП), які формують польовий транзистор.



У **МОП-структурі** кремнієва підкладка (p-тип), шар SiO<sub>2</sub> на ній і затвор, утворюють обкладки **конденсатора**. Позитивний зсув, прикладений до затвора, відокремленому від НП діелектричним шаром, притягує електрони, збіднюючи таким чином прикордонний шар напівпровідника дірками.

При збільшенні напруги утворюється тонкий інверсійний шар, збагачений електронами, що призводить до викривлення енергетичних зон в області напівпровідника, що межує з діелектриком.

Інверсійний шар відіграє роль квантового колодязя для електронів.

Потенціальні стінки колодязя утворені з одного боку межею діелектрик / напівпровідник, а з іншого - електричним полем, що притискає електрони до цієї межі.

Через малу ширину колодязя в ньому формується двовірний електронний газ.

Загальний індукований заряд визначається величиною напруги на затворі, тому кількість електронів в газі легко регулюється.

У кремнії концентрація електронів досягає  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>, їх рухливість в межах  $10^3$ - $10^4$  см<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup>.

## Транспорт носіїв заряду в низьковимірних структурах

---


**Умова прояву впливу низької розмірності** структур - розміри менші, ніж довжина фазової когерентності електрона (відстань між двома найближчими точками, в яких відбувається розсіювання електрона на домішкових атомах, фононах або інших неоднородностях в матеріалі, внаслідок чого змінюється фаза електронної хвилі).

Фази невзаємодіючих хвиль зберігаються на всьому шляху, який вони проходять в таких структурах - інтерференційні ефекти проявляються, коли хвилі з різними фазами зустрічаються.

**Наслідок** - застосування рівняння Больцмана для опису процесу переносу носіїв заряду неможливе.

---

### Фазова інтерференція електронних хвиль:

- відбувається в структурах з розмірами порядку довжини фазової когерентності електрона
  - має місце в балістичних режимах переносу носіїв заряду (слабке розсіювання носіїв заряду, типове для наноструктур).
  - критична довжина визначається середньою довжиною вільного пробігу носіїв заряду при непружному розсіюванні.
- 
- 



## Фазова інтерференція електронних хвиль

Дві хвилі  $\psi = A \exp(i\phi)$ .

Ймовірність утворення нової хвилі  $W = |\psi_1 + \psi_2|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 4|A_1 A_2| \cos(\phi_1 - \phi_2)$

Ймовірність змінюється від суми амплітуд двох хвиль до їх різниці, в залежності від співвідношення їх фаз

**Для макроскопічних систем** не важливо зберігати інформацію про фази електронних хвиль:

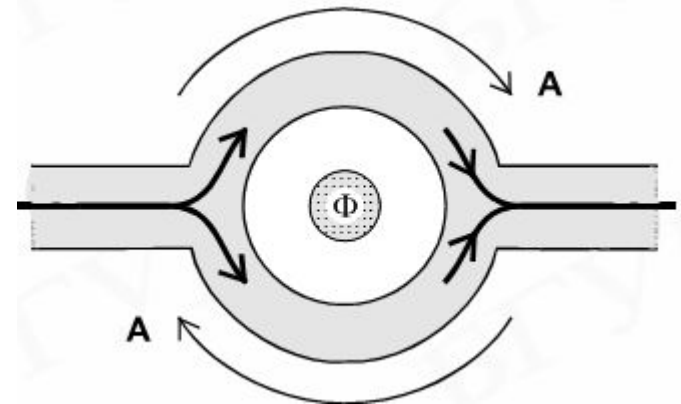
- їх розміри більші довжини фазової когерентності і середньої довжини вільного пробігу носіїв заряду при непружного розсіюванні.
- усереднення по великій кількості парних взаємодій повністю згладжує ефект від інтерференції окремих електронних хвиль, тому що всі вони об'єднуються випадковим чином.

**Для наносистем** усереднення мінімальне – спостерігаються квантові інтерференційні ефекти

### Ефект Ааронова - Бома.

Електронні хвилі, що надходять з хвилеводу до лівого вхідного контакту, розщеплюються на дві групи рівних по амплітуді хвиль, огинають дві половинки кільця, зустрічаються, інтерферують в правій частині кільця.

Соленоїд, що створює магнітний потік  $\Phi$ , розміщується всередині кільця так, що його магнітне поле перпендикулярне площині кільця і проходить через отвір в ньому (хвильовід малих розмірів для обмеження кількості електронних мод до однієї чи кількох)



## Фазова інтерференція електронних хвиль

### Ефект Ааронова - Бома.

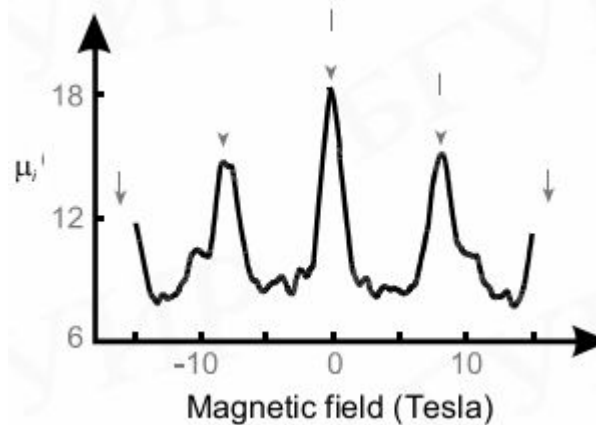
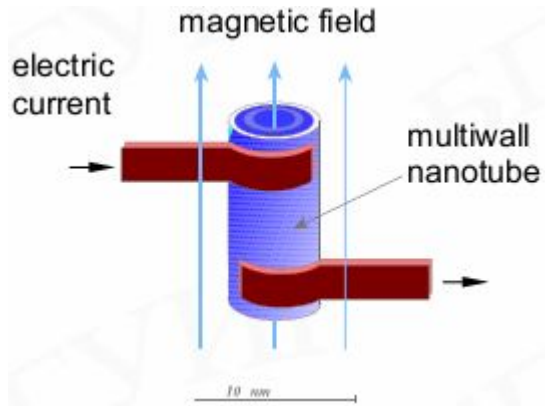
Повний потік через структуру залежить від співвідношення між довжиною гілок кільця і середньою довжиною вільного пробігу електронів при непружному розсіюванні в матеріалі кільця.

Якщо це відношення задовольняє вимогам баллістического транспорту, то струм у вихідному контакті визначається фазовою інтерференцією електронних хвиль на його вході.

Електрони, що проходять по кожній з гілок кільця, рухаються або паралельно, або антипаралельно потенціалу магнітного поля.

**Наслідок** - різниця у фазах електронних хвиль

$$\Delta\phi = 2\pi(\Phi/\Phi_0), \quad \Phi_0 = h/e - \text{квант магнітного потоку}$$



**Ефект Ааронова – Бома** - модуляція провідності кільця магнітним полем .

**Нанотрубка** - циліндричний провідник, електрони можуть поширюватися в ній або за, або проти годинникової стрілки, взаємодія двох потоків призводить до періодичної модуляції поздовжнього електричного опору трубки, оскільки магнітний потік через неї змінюється.



## Фазова інтерференція електронних хвиль

Зміна провідності в результаті фазової інтерференції може відбуватися і в довгих і тонких изькорозмірних провідниках.

Домішки або дефекти створюють потенціальні бар'єри, які електронні хвилі повинні подолати

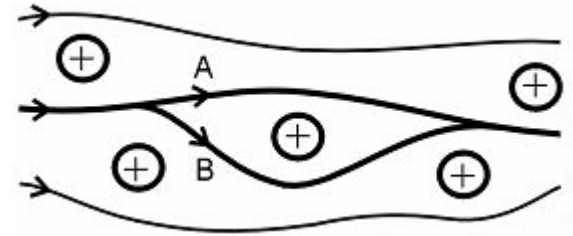
При низьких температурах матеріал вироджується - тільки носії з енергією Фермі приймають участь у транспортних процесах.

Енергію Фермі можна змінити потенціалом, який подається на затвор, що покриває НП, або полем, яке збіднює зону провідності.

Після зміни енергії Фермі носій, який пересувався по одну сторону від дефекту (шлях А), може змінити свою траєкторію так, що він стане рухатися з іншого боку дефекту (шлях В).

Зміна траєкторії еквівалентна змиканню петлі Ааронова-Бома, складеної з А-і В-шляхів.

**Результат**- виникають коливання електронної провідності матеріалу. Назва - явище універсальної флуктуації провідності залежить від особливостей конфігурації розсіюючих центрів у зразку.



**Підсумок** - щоб спостерігати квантові зміни провідності, пов'язані з фазовою інтерференцією електронних хвиль, розміри зразка повинні бути порівняні з довжиною фазової когерентності, яка визначається густиною центрів розсіювання в матеріалі зразка.

Якщо зразок стає «макрометричним», квантовані коливання провідності згладжуються усередненням по значній кількості інтерференційних процесів.

# Вольт - амперні характеристики низькорозмірних структур

**Електрони** в структурі з розмірами меншими, ніж довжина когерентності електронної хвилі розподілені по всьому її об'єму.

**Наслідок** - електричні властивості структури просторово неоднорідні.

Через хвильову природу електрона на транспорт носіїв заряду впливають зовнішні процеси

Опис транспортних явищ в наноструктурах пов'язані з інтерференцією багаторазово розсіяних електронних хвиль вимагає підходу, в якому квантова когерентність може включена в модель –

**підхід Бютікера** на основі робіт **Ландауера**.

**Ідея** - провідність визначається кількістю одновірних каналів, доступних для носіїв заряду, інжекттованих з контактів, які допускають проходження електронних хвиль з довільними фазами.

$$I_{im} = 2ev_i(dn/dE)\Delta\mu_i$$

- потік електронів, що інжектуються з і-ого джерела з певним хім. потенціалом

Швидкість руху  
Густина станів

$$dn/dE = 1/hv_i$$

- для одновірної структури



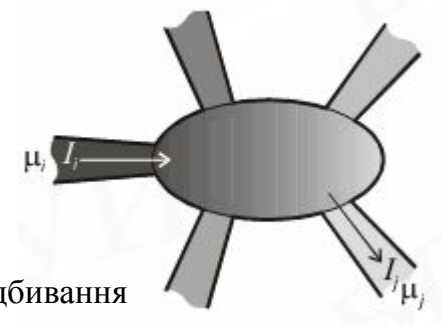
$$I_{im} = (2e/h)\Delta\mu_i$$

Струм з і-ого джерела (ідеальний випадок)



$$I_i = \frac{2e}{h} [(1 - R_i)\mu_i - \sum_{j \neq i} T_{ij}\mu_j]$$

Струм з і-ого джерела (реальний випадок)



**Формула Ландауера-**

**Закон Бютікера** для низькорозмірних структур



# Вольт - амперні характеристики низькорозмірних структур

Для чотирьохполюсних структур (вимірювання опору чотирьохзондовим методом, пропускається струм між однією парою контактів і реєструється спад напруги між іншою парою контактів).

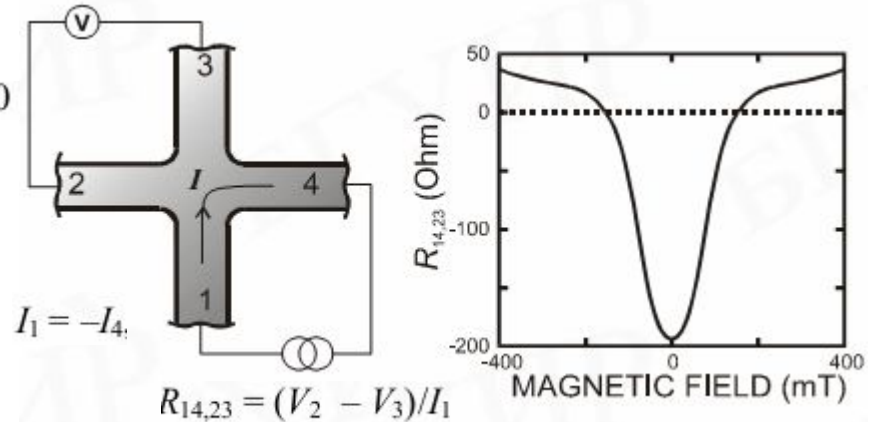
В чотирьохполюсній структурі струм пропускається від виводу 1 до 4, а спад напруги вимірюється між 2 і 3.

Магніторезистивні аномалії в нанорозмірних структурах

$$R_{mn,kl} = (h/e^2)[T_{km}T_{ln} - T_{kn}T_{lm}]/D$$

Позитивна константа

$$I_2 = I_3 = 0$$



**Наслідок –**

опір чотирьохполюсника не обов'язково позитивний.

Причина – лінії струму вимушені вигинатися, проходячи по двох нанорозмірних шнурах з балістичним переносом електронів. Коли напруга поблизу вигину вимірюється на контактах 2 і 3, існує ймовірність, що контакт 3 знаходиться під більш високим потенціалом, ніж контакт 2.

$$R_{14,23} = (h/e^2)[T_{21}T_{34} - T_{24}T_{31}]/D$$

Електронам легше досягти контакту 3, ніж змінити свою траєкторію на  $90^\circ$  і потрапити на контакт 4.

**Наслідок -**  $T_{24}T_{31} > T_{21}T_{34}$  - опір негативний.



## Ефект Хола

### Класичний ефект Холла

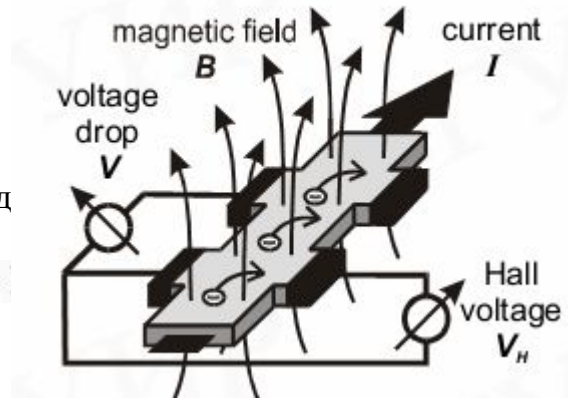
**Ідея** - провідний матеріал поміщають у магнітне поле і через пропускають через нього струм;

на електрони діє сила Лоренца, перпендикулярна до магнітного поля і початкового напрямку руху електронів. під її дією електрони притискаються до однієї зі сторін зразка (в залежності від напрямку магнітного поля), викликаючи накопичення заряду на цій стороні. Спад напруги  $V$ , виміряний при заданому струмі  $I$  через зразок, характеризує опір матеріалу  $R = V / I$ .

Опір, виміряний у присутності магнітного поля – **магнітоопір**  $R_H$

Різниця потенціалів індукована магнітним полем – **напруга Хола**.

$R_H =$



$$R_H = B/(en)$$

Опір Хола  $R_H$  не залежить від форми зразка, збільшується лінійно зі збільшенням магнітного поля, в той час як поздовжній опір  $R$  незалежний від нього

**Результат** - класичний ефект Холла став стандартною методикою

для визначення типу, концентрації та рухливості вільних носіїв заряду в металах і напівпровідниках.



# Квантовий ефект Хола

**Проявляється** при низьких температурах в зразку, що містить двомірний електронний газ, в якому електрони здатні рухатися тільки в межах площини,

**Прояв** - на залежності напруги Хола від магнітного поля з'являється ряд плоских сходинок (плато).

Цілочисельний квантовий ефект Хола

$$R_H = h/(ie^2)$$

Дробовий Квантовий ефект Хола

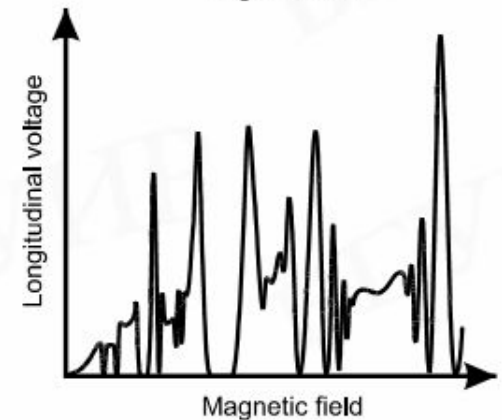
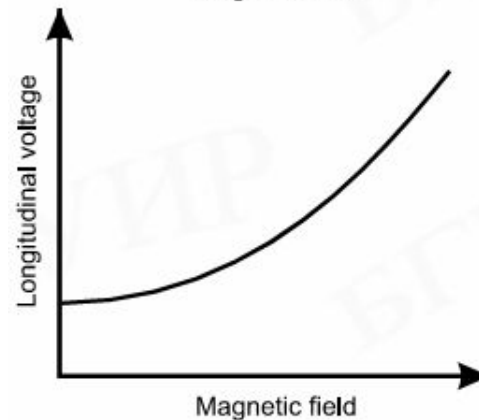
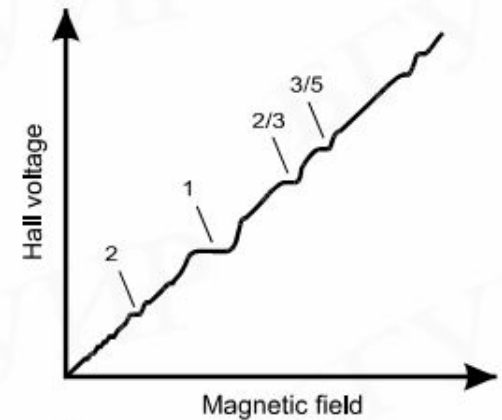
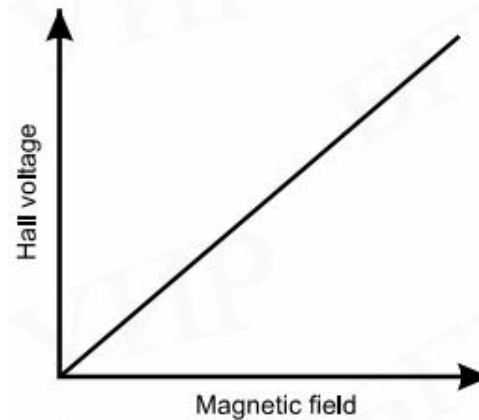
$$i = p/q \quad 1/3, 2/3, 2/5, 3/5$$

**Умова** дробового ефекту Хола – часткове заповнення рівнів Ландау.

**Походження** - взаємодія між електронами: у результаті електростатичної взаємодії електрони займають лише частину рівнів Ландау (щоб триматися якнайдалі від сусідів).

**Приклад** -фактор заповнення  $1/3$ - третина рівнів зайнята; якщо електрон додається до одного з незаповнених рівнів, енергія його відштовхування буде більшою, тому що він буде ближче до сусідів, ніж всі інші електрони

**Наслідок** - існує енергетичний зазор між частково зайнятим станом і станом, розташованим вище.



a

б

## Квантовий ефект Холла

Електрони, що рухаються перпендикулярно магнітному полю, змінюють траєкторію руху на колову - циклотронний рух з частотою  $\omega_c$

$$\omega_c = eB/m,$$

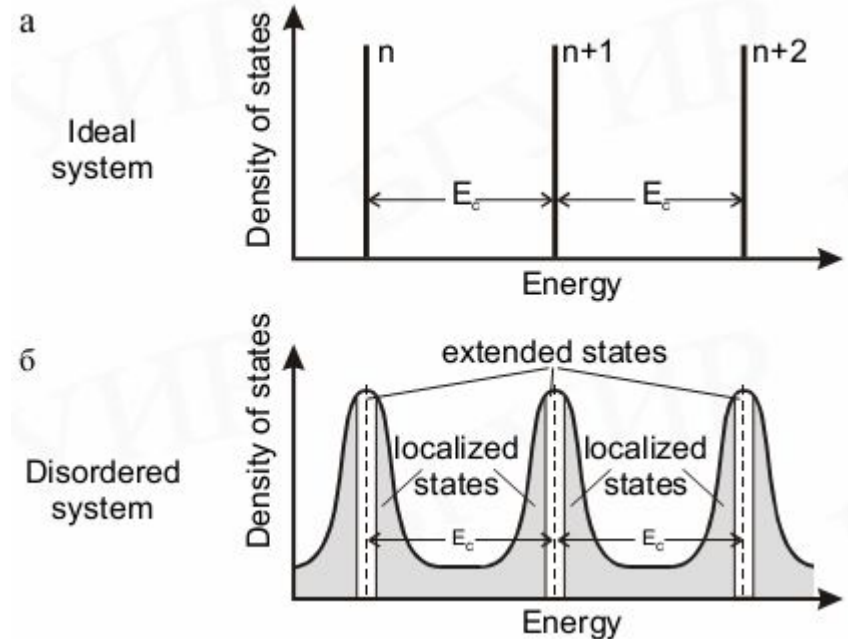
Наслідок – дозволені енергетичні стани для електронів стають квантованими (рівні Ландау)

$$E_i = (i + 1/2)\hbar\omega_c \quad \text{с } i = 1, 2, \dots$$

- Електрони можуть знаходитися тільки на рівнях Ландау, але не в проміжках між ними.
- Існування зазорів між рівнями є критичним для виникнення квантового ефекту Холла.
- Двовірний електронний газ відрізняється від газу вільних електронів. Рух в третьому вимірі, уздовж магнітного поля, може призвести до додавання енергії до енергії рівнів Ландау і до заповнення, таким чином, зазорів між ними.

**Наслідок** при русі носіїв у трьох вимірах не спостерігається енергетичних зазорів і немає передумов появи квантового ефекту Холла.

Число зайнятих рівнів Ландау – **фактор заповнення**



Необхідною умовою для спостереження квантового ефекту Холла є наявність у зразку **структурних недосконалостей, домішок**, які викликають розширення дозволенних енергетичних зон біля рівнів Ландау

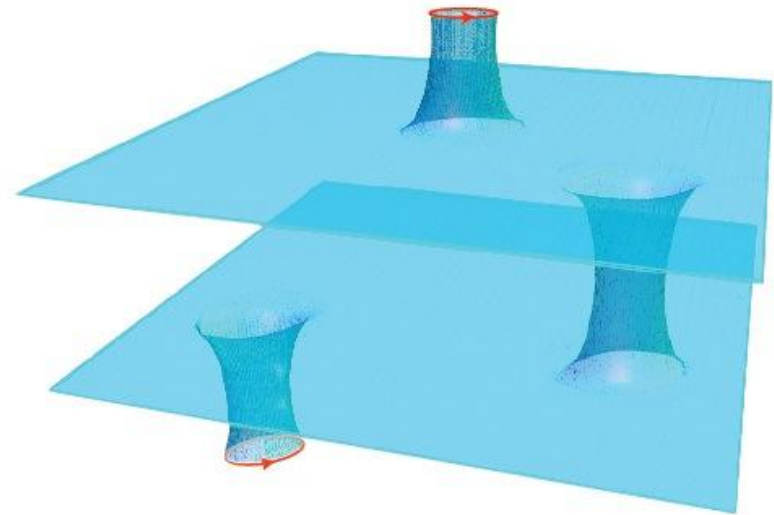


Наслідок ідеї про часткове заповнення рівнів Ландау –

електрони в двовірному електронному газі, поміщеному в сильне магнітне поле, конденсуються в новий колективний стан - квантову рідину.

Квант магнітного потоку і електрон існують як квазічастинка, яка несе дробовий заряд.

Такі частинки не підкоряються ні статистикою Фермі-Дірака, ні статистиці Бозе-Ейнштейна. І описуються спеціальною, дробовою статистикою.



# Прилади на інтерференційних ефектах

Основна характеристика електронних приладів, принцип дії яких ґрунтується на інтерференції електронних хвиль і балістичному транспорті носіїв заряду:

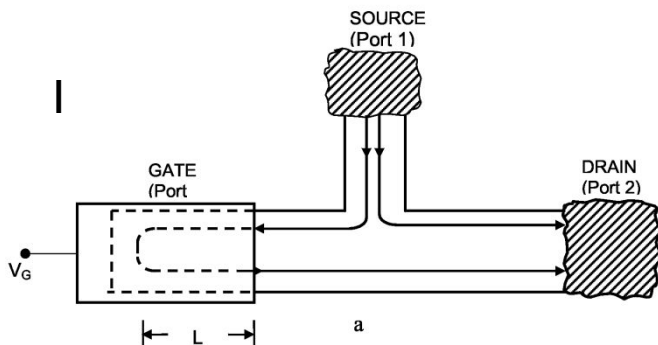
мірою протяжності активної області є довжина фазової когерентності.

В приладових структурах з розмірами активних областей менше довжини фазової когерентності електронних хвиль можуть бути присутніми ефекти, пов'язані з розмірним квантуванням.

## Інтерференційні транзистори

Електрони в деяких напівпровідниках мають фазову когерентність на довжині в декілька мікрон. **Квантовий інтерференційний транзистор (КІТ)**- прилад в якому перенесення електронів через області з розмірами меншими за довжину фазової когерентності контролюється інтерференційно через затвор.

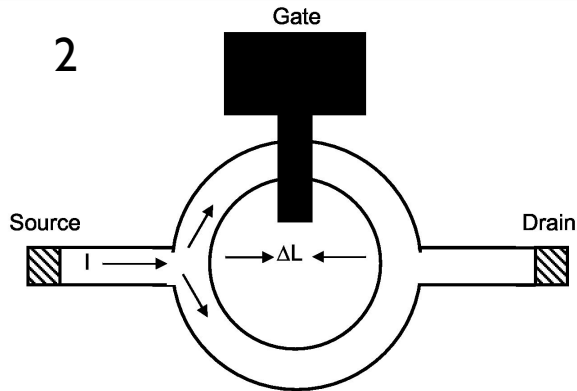
### *Типи конструкцій КІТ*



Транзистор на самоузгодженому хвилеводі  
Солсо (1989) і Датта (1989)

1. Струм може текти від виток до стоку або по коротких траєкторіях, або ж по довгих шляхах через хвилевід.
2. Різниця ходу між двома шляхами регулюється за допомогою затвора.
3. Електронні хвилі, за умови відсутності зіткнень що змінюють фазу, досягаючи стоку по двох шляхах інтерферують (додаються) якщо їх різниця ходу рівна цілому числу довжин хвиль Фермі (близько 50 нм в двовірному електронному газі).
4. Інтерференція локалізує електрони на виході узгоджувального хвилеводу, і провідність між витком і стоком збільшується.

## Прилади на інтерференційних ефектах



Транзистор на на кільцевому  
інтерферометрі  
Фаулер (1984)

1. Електрони з різних віток покидають кільце в одній і тій же точці
2. Якщо різниця фаз дорівнює  $2\pi$ , вони будуть інтерферувати і провідність кільця буде максимальною.
3. Наслідок - провідність кільця може змінюватися – осцилювати з періодом хвильового вектора Фермі.

### Причини інтересу до КІТ

КІТ - швидкодіючий прилад з великим коефіцієнтом підсилення.

Висока швидкодія забезпечується малими розмірам.

Швидкість руху електронів в GaAs близько  $10^5$  м/с - час переносу носіїв зарядів (час прольоту) через активну область протяжністю 100 нм складає всього  $10^{-12}$ с.

**Проблема** - як і в звичайних польових транзисторах, максимальна робоча частота буде обмежуватися часом зарядки RC-ланцюжки затвора.

**На практиці** швидкодія квантового інтерференційного транзистора така ж, як у короткоканальних польових транзисторів, їх перевага пов'язана з високою ефективності прямої передачі сигналу.

## Прилади на інтерференційних ефектах

### Польові транзистори на відбитих електронах

У гетероструктурах з модульованим легуванням GaAs/AlGaAs середня довжина вільного пробігу електронів у двовимірному електронному газі перевищує 10 мкм (низькі температури).

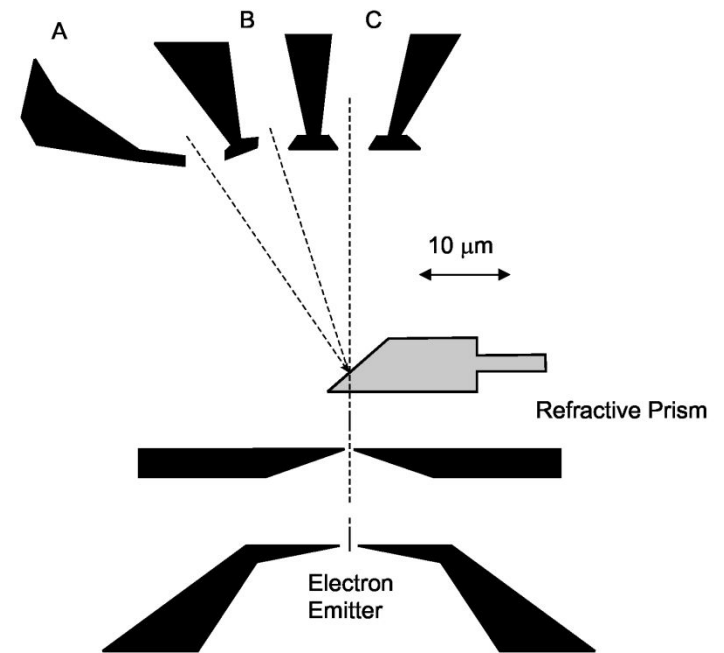
**Наслідок** – можливість створення приладів, в яких електрони розповсюджуються балістично між стоком і виток, крім випадкових зіткнень з межами розділу.

**Ідея** - електричний струм тече так, як рухаються окремі електрони (за законами геометричної оптики).

**Аналогія з геометричною оптикою** – конструюють лінзи і призми з польовим ефектом, які можуть змінювати траєкторії балістичних електронів.

Змінюючи умови відбивання на межі розділу з допомогою зовнішнього поля, можна контролювати струм між парою контактів. Лінзи та призми зроблені з металевих затворів, які змінюють щільність основного двовимірного електронного газу, забезпечуючи відбивання на межі розділу між керованою і некерованою областями.

**Результат** - польові транзистори на відбитих електронах.



# Тунелювання носіїв заряду через потенціальний бар'єр

## Одноелектронне тунелювання

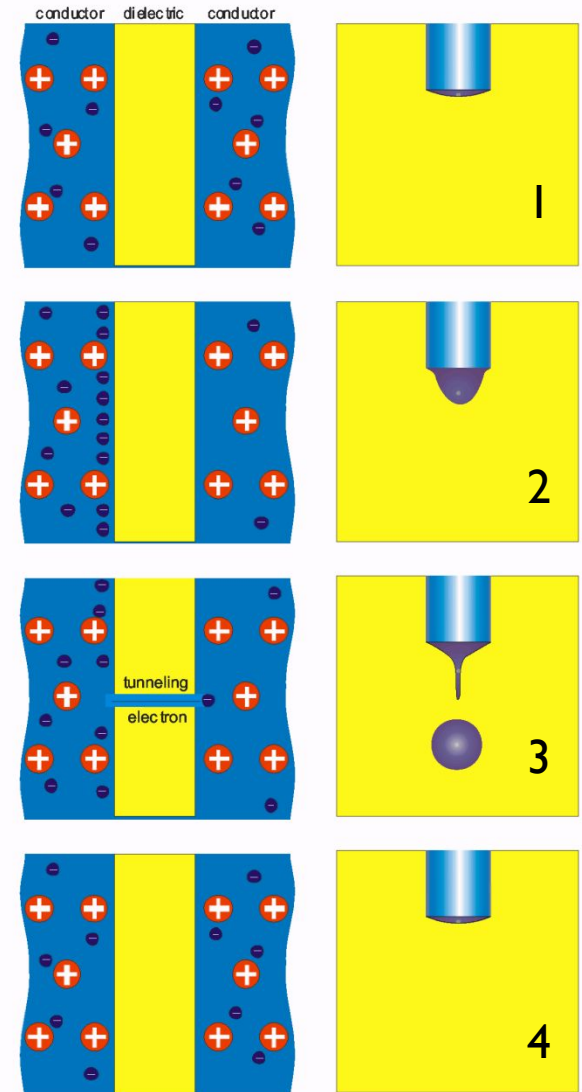
### 1. Провідник

Кожен електрон несе дискретний заряд, загальний але перенесений колективом ними заряд змінюється не стрибкоподібно, а неперервно. Електрони в провіднику можуть зміщуватися на як завгодно малі відстані - сумарний переносимий заряд змінюється неперервно з дискретністю меншою, ніж заряд електрона.

### 2. Провідник/діелектрик/провідник

Заряд переноситься комбіновано - неперервно в провіднику і дискретно через діелектрик

1. Спочатку межа розділу між провідником і діелектриком нейтральна.
2. При накладанні до контактів структури потенціалу починається неперервна зміна заряду в провіднику - на межі розділу з провідник / діелектрик накопичується заряд (наслідок невеликих зміщень електронів в прикордонній області провідника відносно рівноважних положень).
3. Накопичення заряду продовжується поки його величина не виявиться достатньою для відриву і тунелювання через діелектрик одного електрона.
4. Після акту тунелювання система повертається в початковий стан. При збереженні зовнішньої прикладеної напруги все повторюється знову.



# Тунелювання носіїв заряду через потенціальний бар'єр

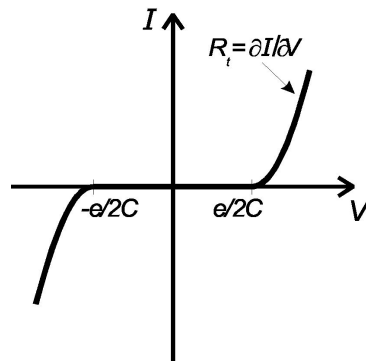
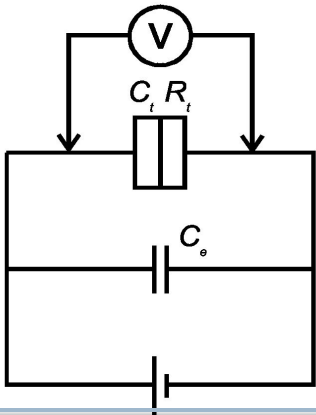
Електрон **може тунелювати** через діелектрик, якщо накопичений заряд стає більше  $+e/2$  (тунелювання в «прямому» напрямку) або менше  $-e/2$  (тунелювання в «зворотному» напрямку), оскільки при цьому зменшується електростатична енергія системи. В цьому інтервалі тунелювання неможливе через кулонівську взаємодію електрона з іншими рухомими та нерухомими зарядами в провіднику - кулонівська блокада

**Одноелектронне тунелювання в умовах кулонівської блокади** (Д. Аверін і К. Ліхарев (1985-1986 рр.)

**Наслідок** - новий напрям в наноелектроніці - **одноелектроніка**.

В залежності від кількості об'єднаних тунельних структур і їх конструктивних особливостей одноелектронне тунелювання володіє особливостями

## 1. Однобар'єрні структури



Ємність утвореного діелектриком конденсатора  $C_t$  Тунельний опір  $R_t$  (характеризує тунельний перехід)  
Зміна електростатичної енергії при тунелюванні одного електрона - різниця між запасеною в конденсаторі енергією і роботою, виконаною джерелом живлення-

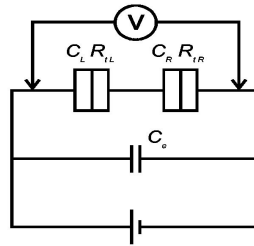
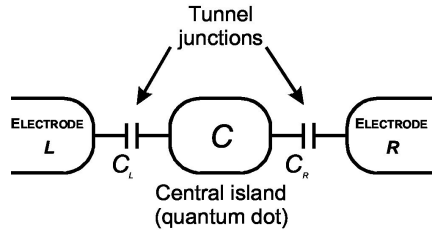
$$\Delta E = e^2/2C - eV$$

Струм в структурі з'являється тільки при накладанні напруги більшої порогової і визначається величиною опору  $R_t$ . Пов'язані з одноелектронним тунелюванням осциляції напруги змінюють величину струму на  $\pm e/2C$

# Тунелювання носіїв заряду через потенціальний бар'єр

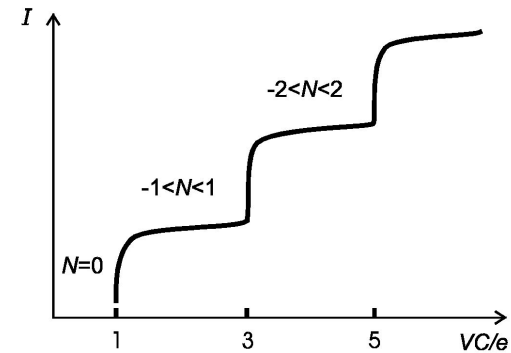
## 2. Двобар'єрні структури

Дві топологічно суміщені, послідовно з'єднані тунельні структури



**Приклад :** металевий провідник з металевим або напівпровідниковим острівцем в його розриві.

1. Острівець за розмірами відповідає квантовій точці і має ємнісний зв'язок як з правим, так і з лівим електродом, яка характеризується відповідно ємностями  $C_L$  і  $C_R$ .
2. Острівець має ємність  $C$  рівну сумі  $C_L$  і  $C_R$ .
3. Існує діапазон напруг, в якому відсутній струм внаслідок кулонівської блокади переносу електронів.
4. Симетрія вольт-амперної характеристики, типова для однобар'єрної структури, буде порушена додатковими обмеженнями на перенос електронів, пов'язаними з дозволеними електронними станами в острівці.



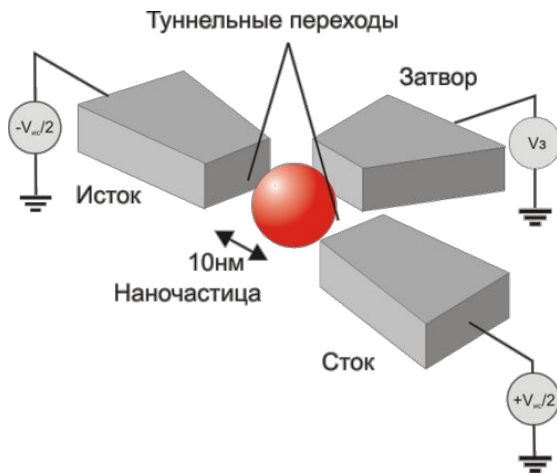
Дискретність енергетичних станів електронів в острівці визначається дискретним характером зміни його заряду з приходом чи відходом одного електрона. Одиниця зміни  $e^2/2C$ .  
У сусідніх макроскопічних областях за межами бар'єру енергетичні стани електронів квазінеперервні.

# Прилади на одноелектронному тунелюванні

## Прилади на одноелектронному тунелюванні

використовують явище одноелектронного тунелювання з однієї або декількох квантових точок, з'єднаних тунельними переходами між собою чи з підвідними електродами.

### Одноелектронний транзистор



1. Якщо прикласти різницю потенціалів між виток і сток транзистора, то струм протікати не буде, оскільки електрони в даний момент заблоковані на наночастинці.
2. Для появи струму необхідно збільшити потенціал на керуючому електроді - затворі.
3. Коли потенціал на затворі стане більшим порогового значення, кулонівська блокада проривається, електрон проходить через бар'єр, в ланцюзі витік-стік протікає струм.
4. При цьому електричний струм в ланцюзі протікає порціями, що відповідає рухам одиничних електронів.
5. Керуючи потенціалом на затворі, можна пропускати через бар'єри одиночні електрони.
6. Кількість електронів в наночастинці повинна бути не більше .

У цифрових інтегральних схемах на ОЕТ один біт інформації (два можливих стани «0» і «1») представлений як присутність або відсутність одного електрона на наночастинці.

Схема пам'яті ємністю  $10^{12}$  біт розміщується на кристалі площею  $6,45 \text{ см}^2$ .



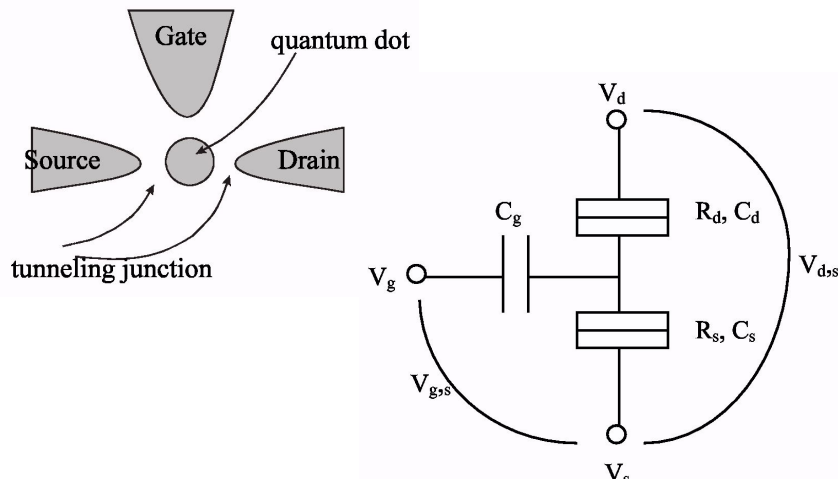
# Прилади на одноелектронному тунелюванні

## Прилади на одноелектронному тунелюванні

використовують явище одноелектронного тунелювання з однієї або декількох квантових точок, з'єднаних тунельними переходами між собою чи з підвідними електродами.

## Одноелектронний транзистор

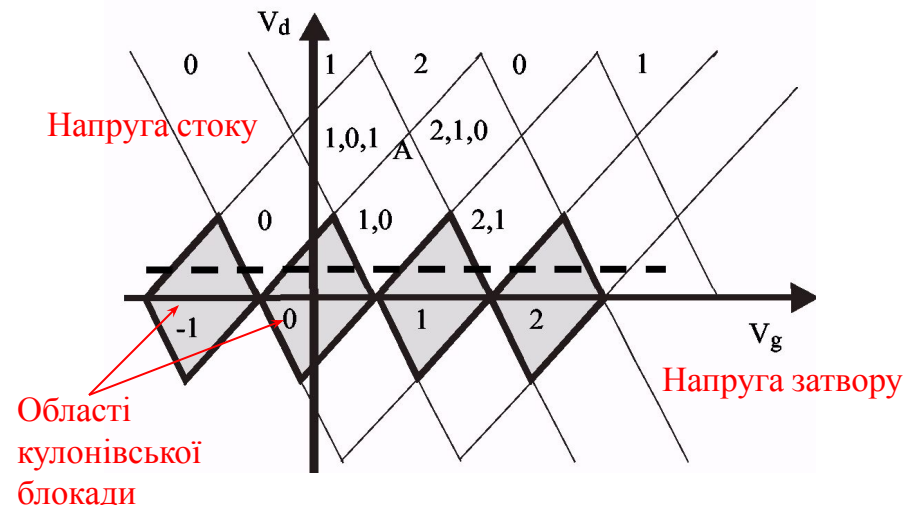
трихвивідний перемикаючий прилад, у якому електрони «поштучно» переносяться від витоку до стоку через їх розділюючу їх квантову точку, електронні стани в якій електростатично контролюються затвором.



Робота ОЕТ описується шляхом виділення в його структурі і подальшого аналізу двох одноелектронних комірок: однієї-зв'язаної з витоком, іншої - зі стоком.

Заштриховані області - умова КБ при певній кількості електронів у квантовій точці

В незаштригованих областях квантова точка може мати два значення кількості електронів 0 або 1.



# Прилади на одноелектронному тунелюванні

## Одноелектронний транзистор

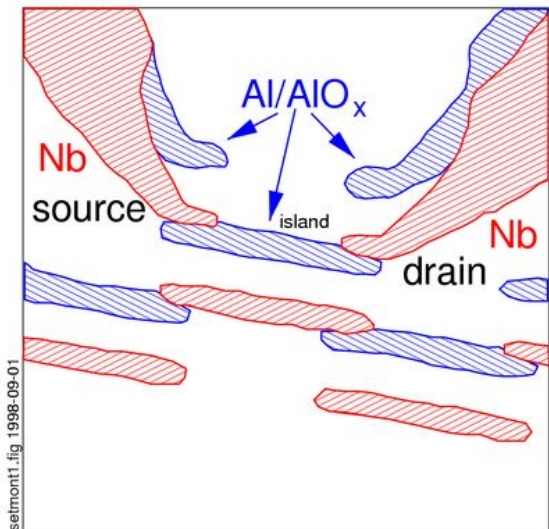
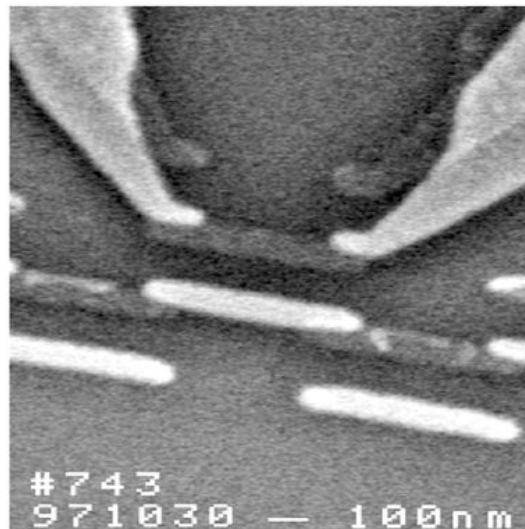
### Переваги ОЕТ

1. малі розміри (до розмірів декількох атомів) і пов'язана з цим можливість високого ступеня інтеграції,
2. надзвичайно низька споживана потужність.

### Два методи реалізації логічних операцій в схемах на ОЕТ

1. один біт інформації представляється одним електроном. перенесення електронів відбувається послідовно, тобто контролюється кожен біт інформації.
2. один біт інформації представлений, як і в класичній мікроелектроніці, двома станами одноелектронного транзистора - включений (струм тече через прилад) і вимкнений (струм через прилад не тече).

З точки зору споживаної потужності перший метод є кращим.  
Тому з точки зору робочої стабільності другий метод кращий.



## Прилади на одноелектронному тунелюванні

### Одноелектронна пастка

основна властивість бі-або мультистабільна внутрішня зарядова пам'ять.

В одноелектронній пастці в межах деякого діапазону напруг, що прикладається до затвора, один з наноостровців (найближчий до затвора) може бути в одному, двох або більше стійких зарядових станах, тобто містити один, два або кілька електронів. На цій основі створюються різні логічні елементи, які є елементною базою нанокomp'ютерів.

