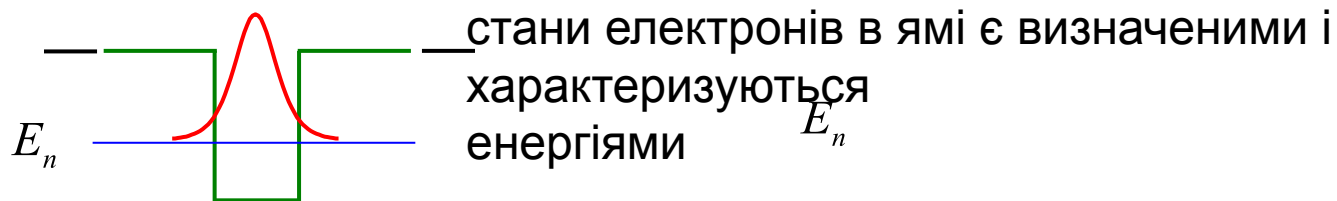


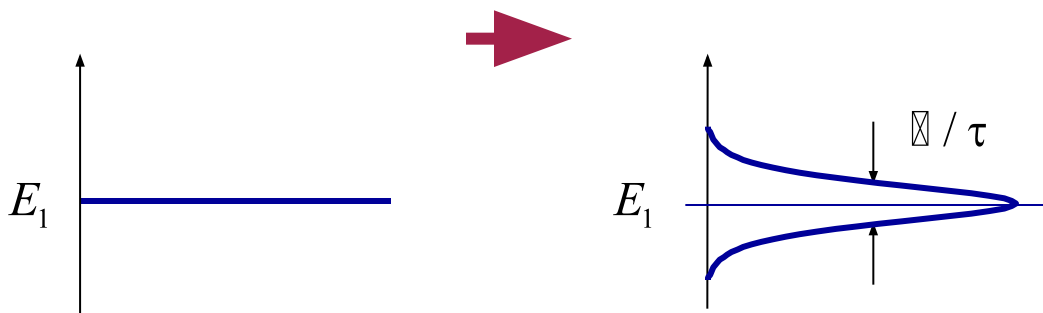
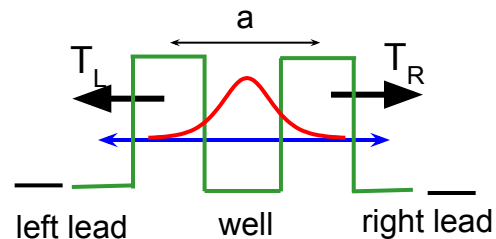
**Тунельно-резонансні явища.
Інтерференційні ефекти та
прилади.**

Резонансне тунелювання

Квантова яма між двох дуже широких бар'єрів добре вивчена.



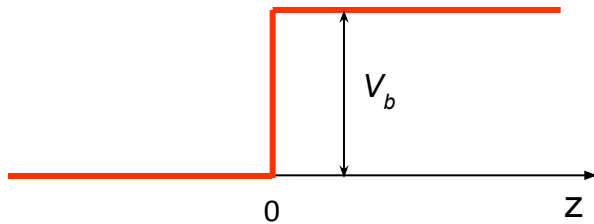
Коли бар'єри звужуються – маємо невизначені стани оскільки електрон може тунелювати через бар'єри і покинути яму



τ – час життя електрона в ямі

Транспорт через гетероструктуру

- Хвильові вектори руху частинки в передбар'єрній ($z \leq 0$) та підбар'єрній ($z > 0$) областях



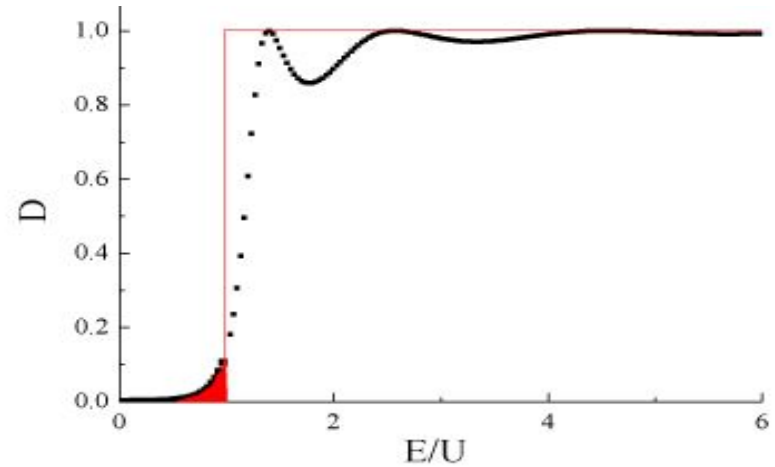
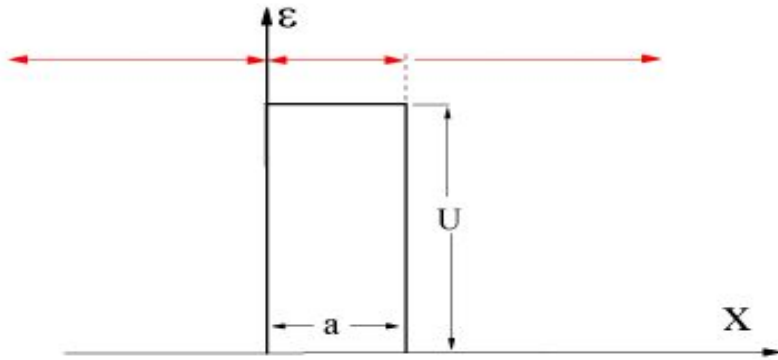
$$k = \sqrt{2m * E / \hbar^2} , z \leq 0$$

$$k_b = \sqrt{2m * (E - V_0) / \hbar^2} , z > 0$$

- Хвильова функція частинки

$$\psi(z) = \begin{cases} Ae^{ikz} + Be^{-ikz} , & z \leq 0 \\ Ce^{ik_b z} + De^{-ik_b z} , & z \geq 0 \end{cases}$$

Потенціальний бар'єр



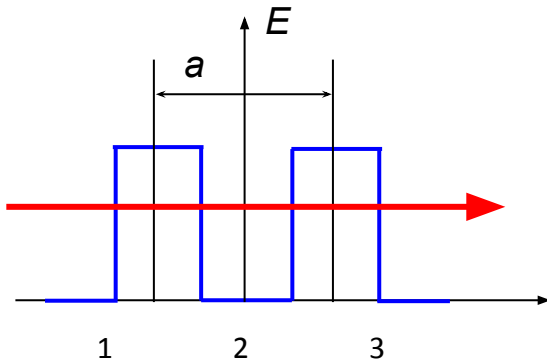
Аналогічно:

(задавши хвильові функції + граничні умови)

Отримаємо коефіцієнт пропускання

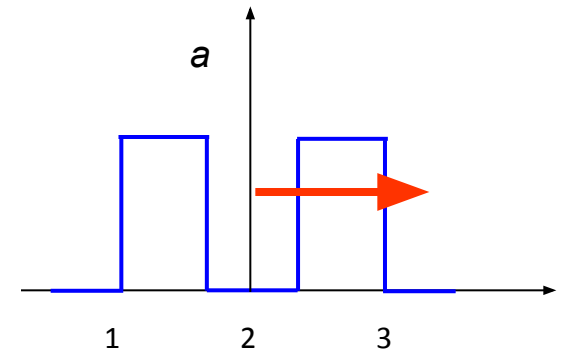
$$D = 4k^2k_1^2 \{ 4k^2k_1^2 + (k^2 - k_1^2)^2 \sin^2 k_1 a \}^{-1} = \{ 1 + U^2/4E(E-U) \sin^2 k_1 a \}^{-1}.$$

Коефіцієнт проходження частинки в одновимірній резонансній структурі



Правий (лівий) бар'єр характеризується амплітудами проходження та відбиття t_R (t_L) та r_R (r_L)

Матриця переходу з ями через бар'єр праворуч



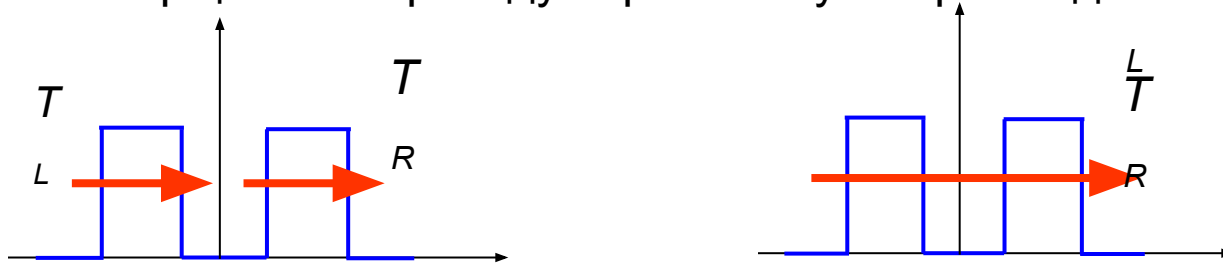
$$\mathbf{T}_R = \begin{pmatrix} 1/t_R^* & -r_R^*/t_R^* \\ -r_R/t_R & 1/t_R \end{pmatrix}$$

Для значень енергії далеких від резонансу можна фазовий фактор $\sin^2(\varphi/2)$ замінити його середньою величиною $1/2$, і отримати оцінку для коефіцієнту

проходження через двобар'єрну структуру

Тривіальний результат $T \approx (T_L T_R)/2$ коефіцієнт проходження через дві перешкоди

є добутком коефіцієнтів переходу через кожну з перешкод. T



Квадрати модуля амплітудних коефіцієнтів¹ проходження та відбиття дають

коефіцієнти проходження та відбиття по потоку.

$$T = \left| \frac{t_L t_R}{1 - |r_L| |r_R| e^{2ika + i\rho_L + i\rho_R}} \right|^2 = \frac{T_L T_R}{1 + R_R R_L - |r_R| |r_L| (e^{i\varphi} + e^{-i\varphi})}$$

$$\varphi = 2ka + \rho_L + \rho_R$$

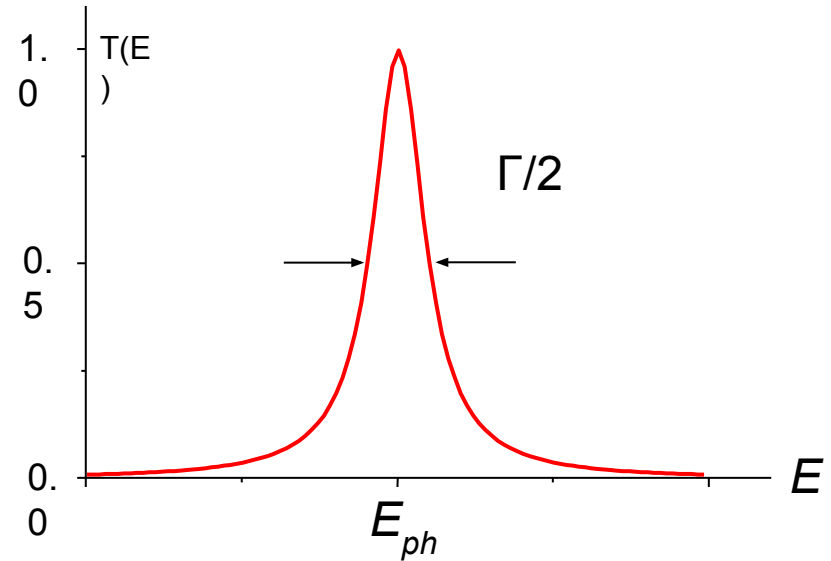
Використовуючи те, що $\cos \varphi = 1 - 2 \sin^2 \varphi / 2$, перепишемо цю формулу у іншому вигляді.

Залежність коефіцієнта тунелювання від енергії

$$T = T_{ph} \approx \frac{4T_L T_R}{(T_L + T_R)^2}$$

$$T(E) \approx T_{ph} \left[1 + \left(\frac{E - E_{ph}}{\Gamma/2} \right)^2 \right]^{-1}$$

В умовах
тунелювання



резонансного

$$2ka + \rho_L + \rho_R = 2n\pi$$

Умова резонансного переходу через двобар'єрну область є ні чим іншим як умовою інтерференції електронної хвилі в ямі

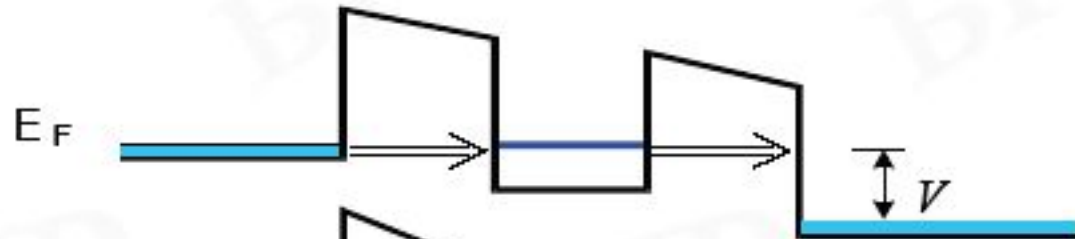
При резонансному тунелюванні через симетричну структуру, коли $T_L = T_R$, коефіцієнт проходження дорівнює одиниці.

ВАХ у випадку резонансного тунелювання

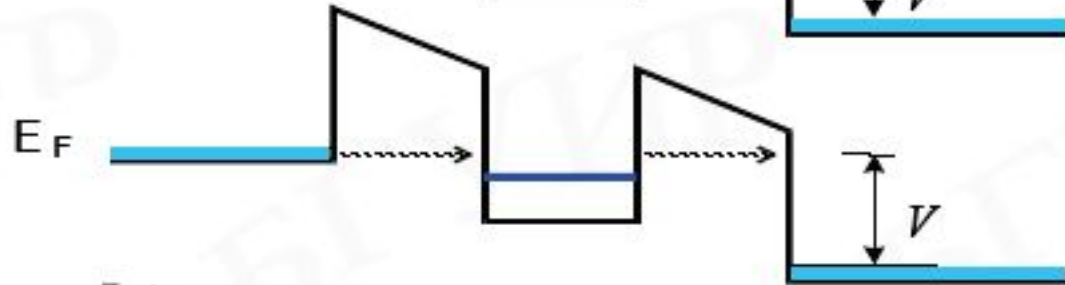
Класичний випадок тунелювання



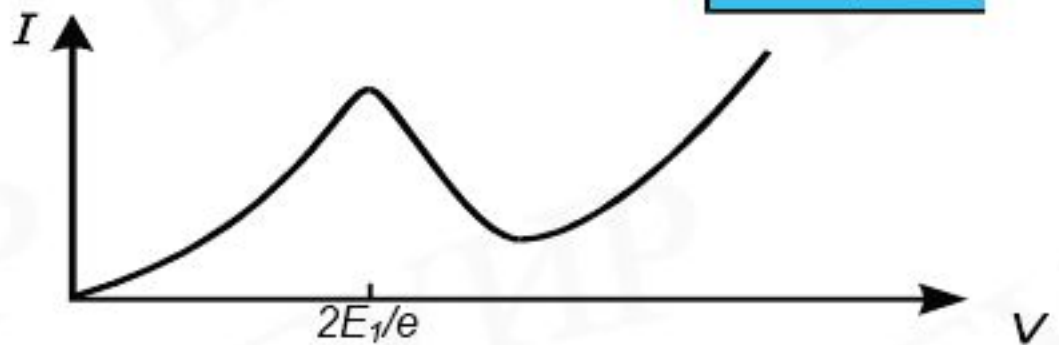
$$T_n(E_n) = T_{1n} T_{2n}$$



Резонансне тунелювання



$$T_n(E_n) = \frac{4T_{1n}T_{2n}}{(T_{1n} + T_{2n})^2}$$



ДБРТ –структури

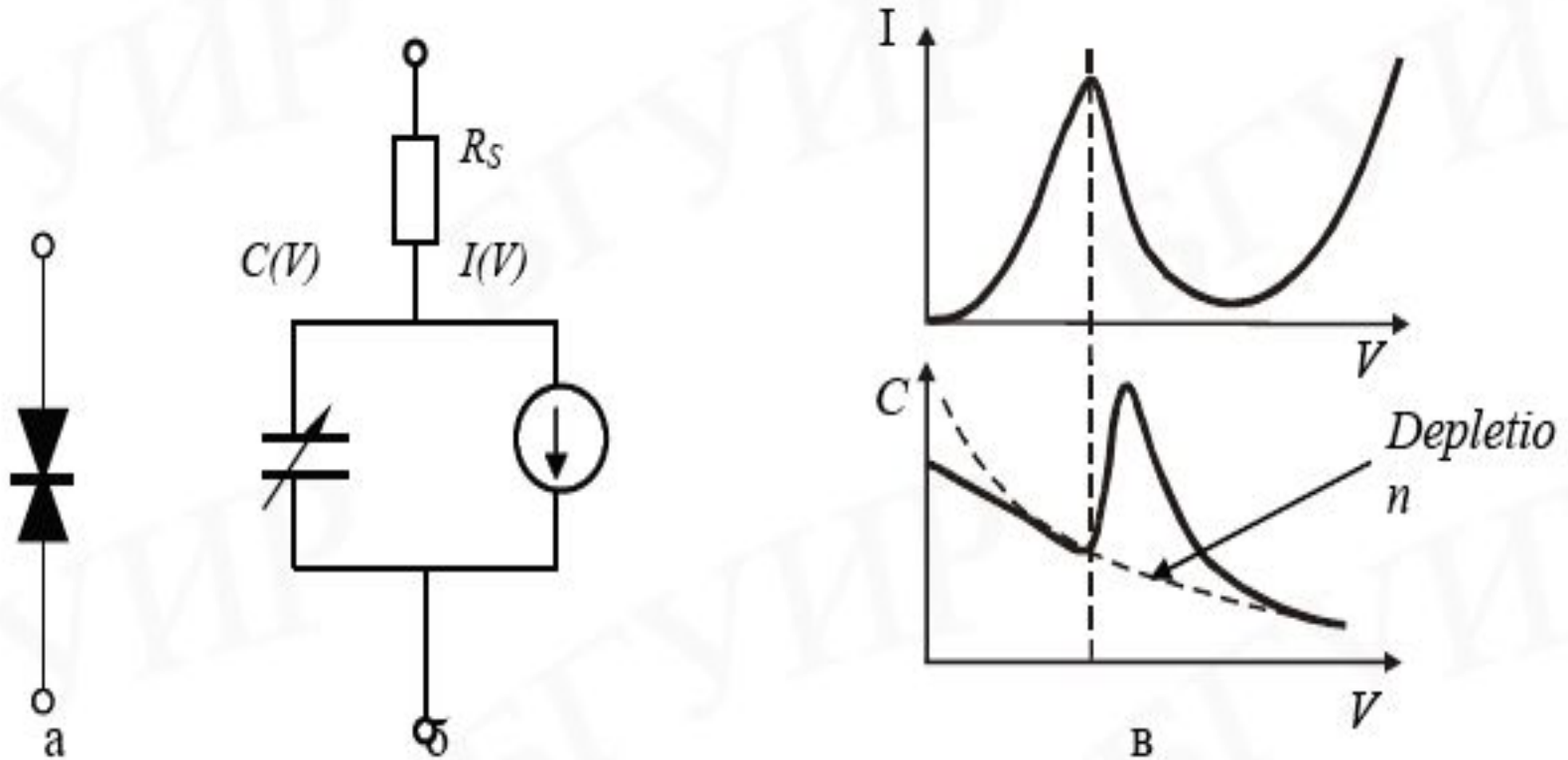
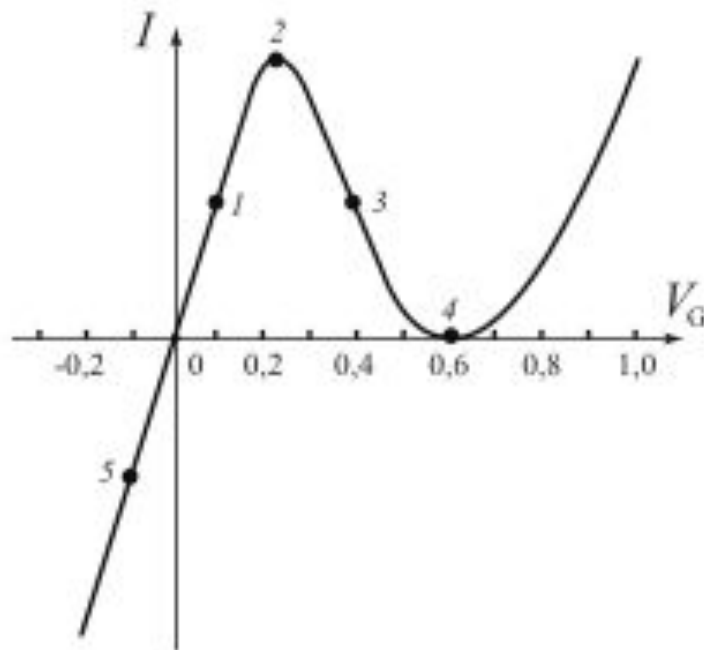
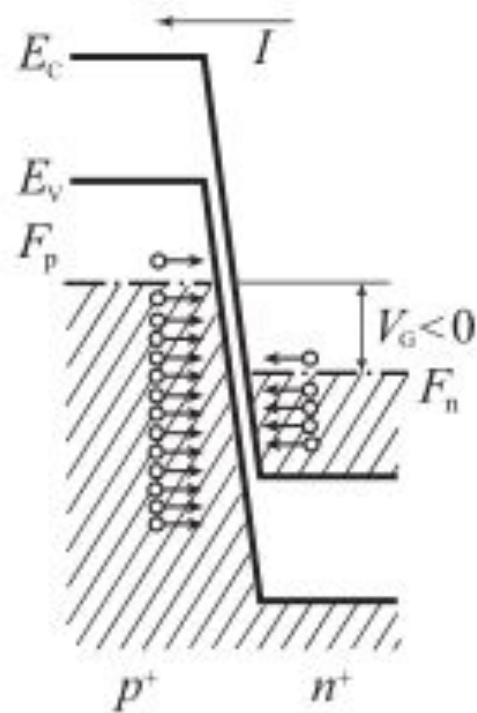


Рис. 2.15. Условное обозначение резонансно-туннельного диода (а), его эквивалентная схема (б), вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики (в)

Тунельний діод (діод Есакі)

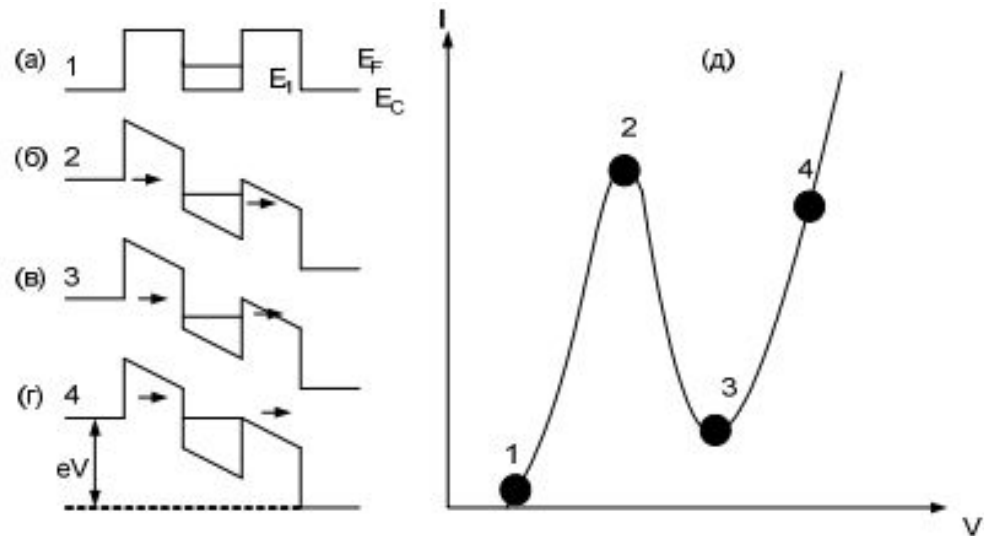
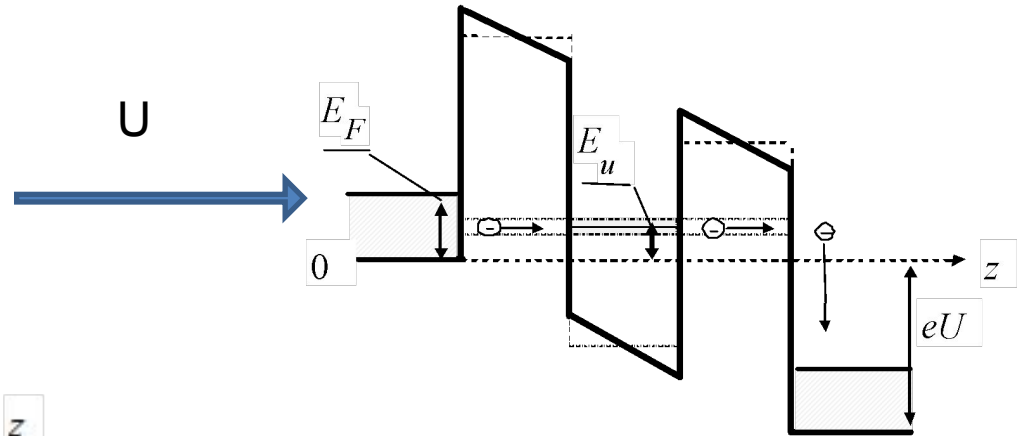
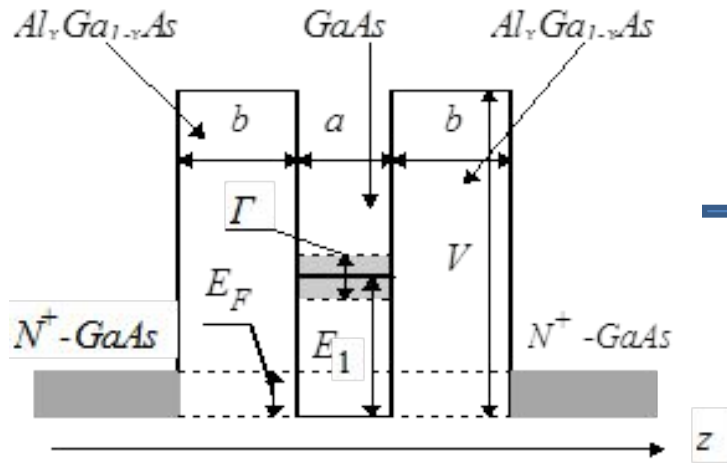


a



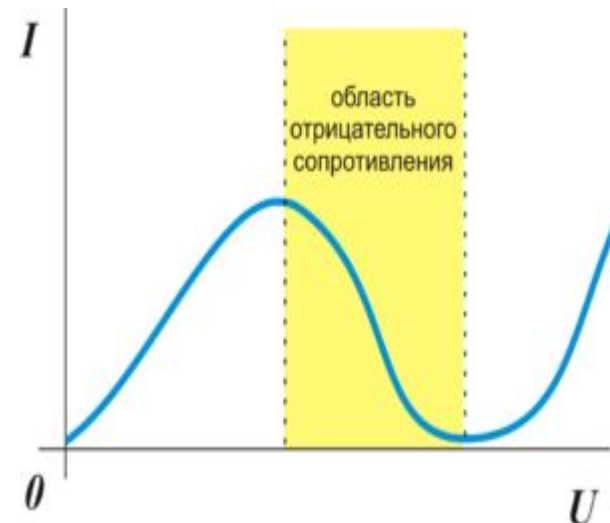
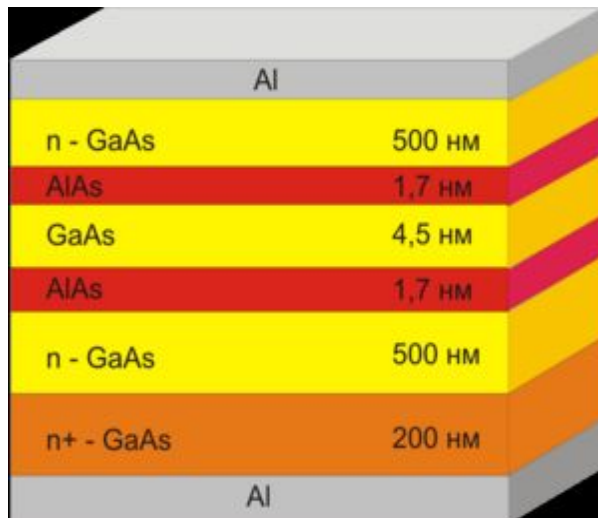
б

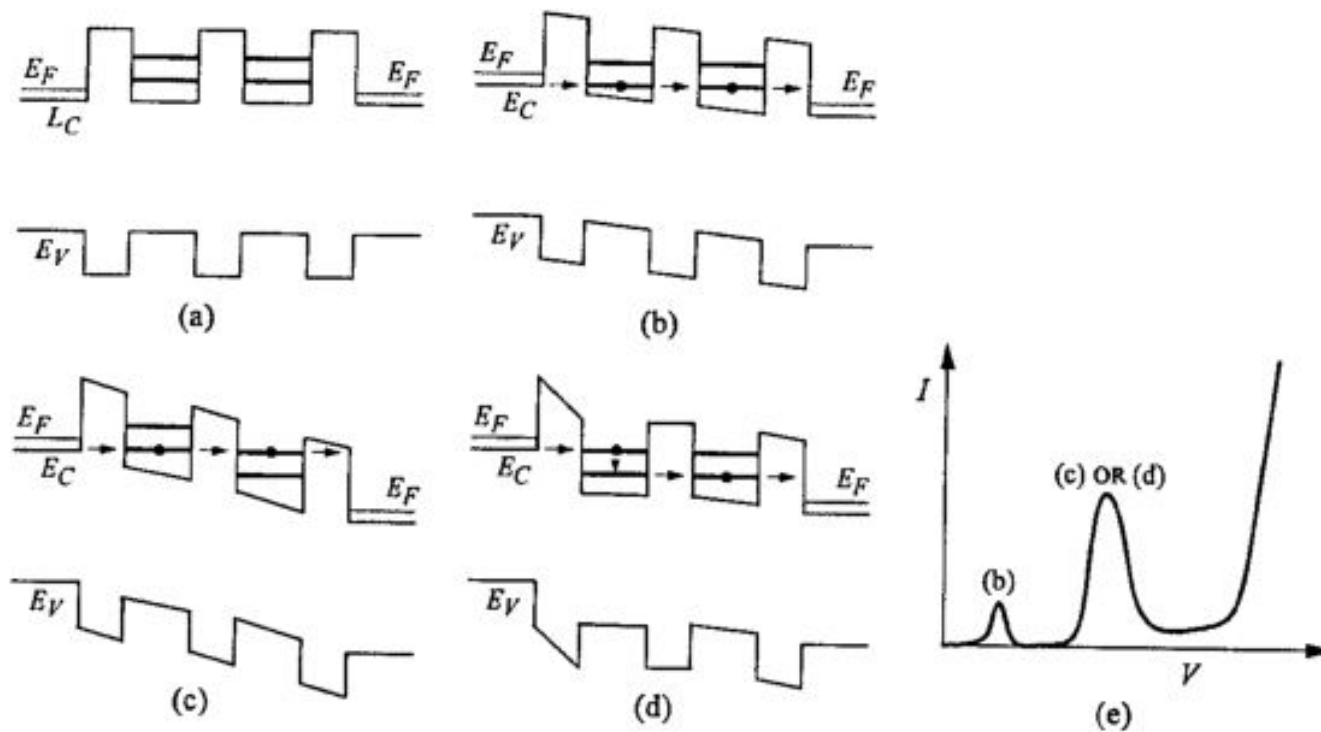
Резонансний тунельний діод



Резонансно - тунельний діод

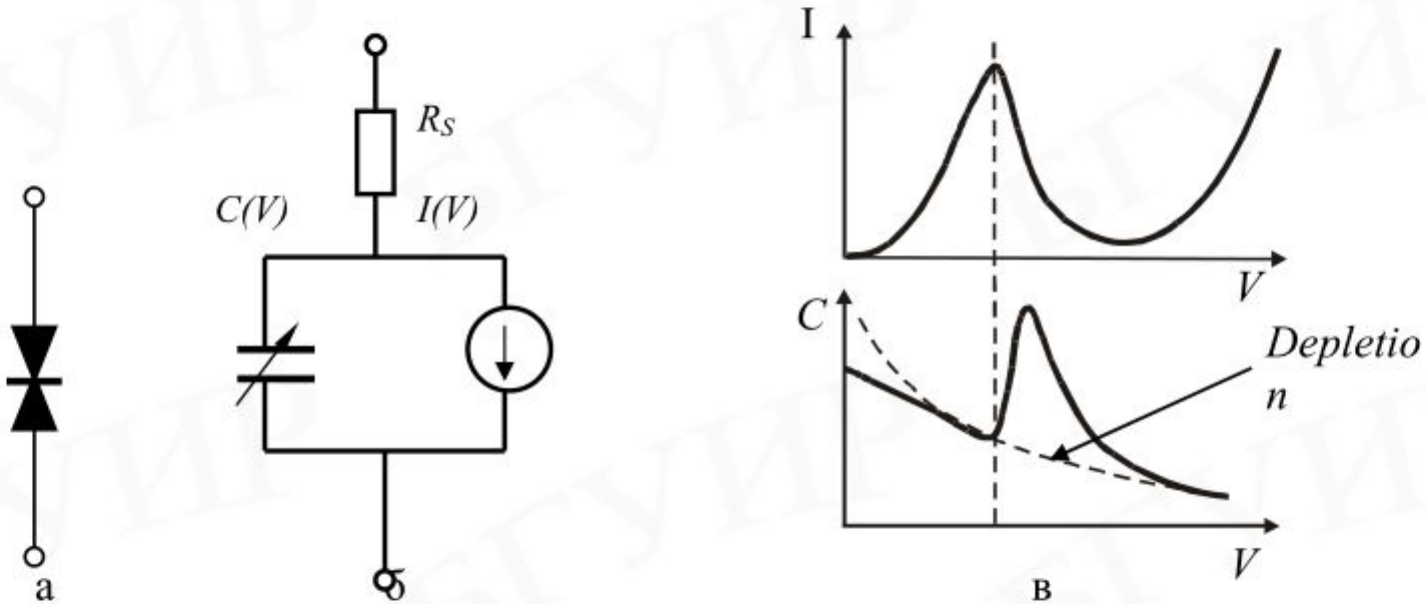
$I = f(U)$, I – струм, U – прикладена напруга. Якщо прикладена напруга мала, та E електронів, що проходять через потенціальний бар'єр $< E$ дискретного рівня, то прозорість бар'єра і, струм, що протікає - малі. $I \rightarrow \max$ при напругах, коли E електронів = E дискретного рівня. При більш високих напругах енергія електронів стане більше енергії дискретного рівня, і прозорість бар'єра для електронів зменшиться.





Створення двох ям з двома рівнями дозволяє отримати два резонансних піки: резонансне тунелювання через перші рівні (b) ям та тунелювання через перший рівень першої ями і другий рівень другої (c) або тунелювання на другий рівень першої ями, релаксація і резонансне тунелювання через перший рівень другої ями (d).

Робоча частота генерації РТД

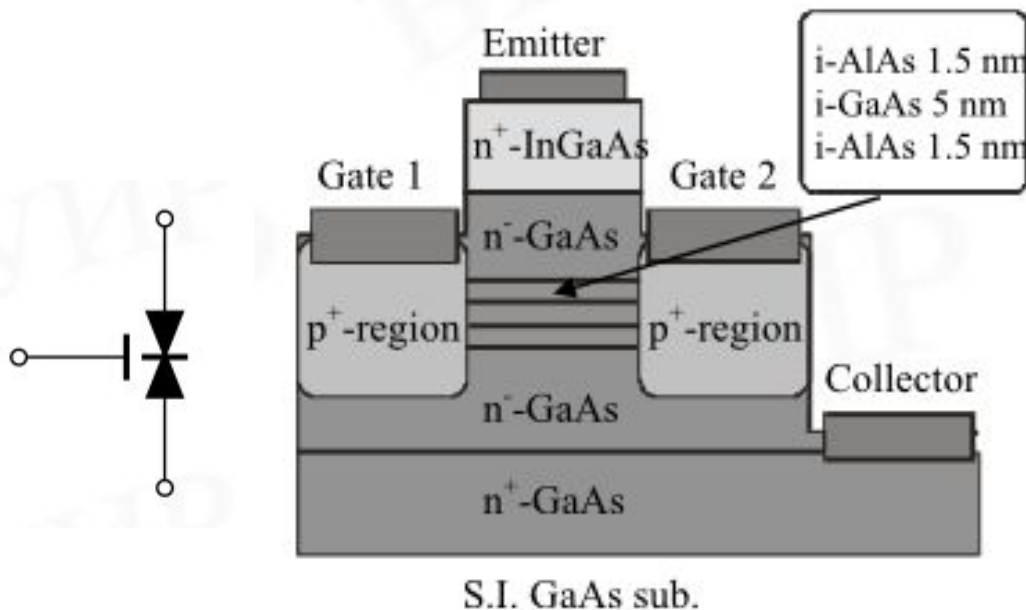


- Характерний час життя стабільного резонансного рівня в ямі $t \approx \frac{h}{\Gamma_0} \rightarrow$
теоретична границя швидкодії РТД $\sim 0,1$ пс

- Характерний час життя стабільного резонансного рівня в ямі $t \approx \frac{h}{\Gamma_0} \rightarrow$
теоретична границя швидкодії РТД $\sim 0,1$ пс

Резонансно-тунельний діод з керуючим затвором

Емітерний струм керується р-n переходом (або Шотткі), що дозволяє регулювати резонансний струм.



Резонансний тунельний діод може бути використаний разом з біполярним, польовим або транзистором на гарячих електронах, утворюючи комбіновані пристрої, відповідно резонансно-тунельний біполярний транзистор або резонансно-тунельний транзистор на гарячих електронах

Резонансно-тунельний біполярний транзистор

РТБТ є біполярним транзистором з резонансно-тунельною структурою в області емітерно-базового переходу або в базі.

Емітерно-базовою напругою можна змінювати знак крутизни прохідної характеристики

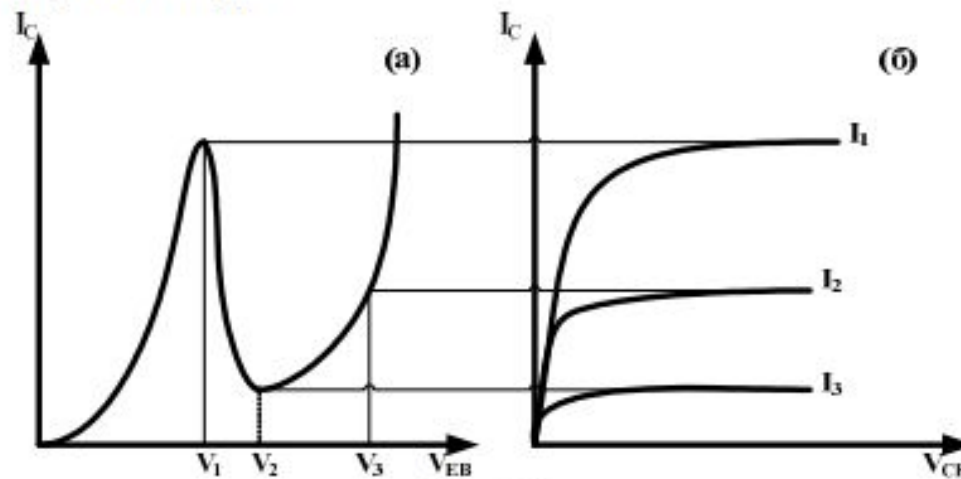
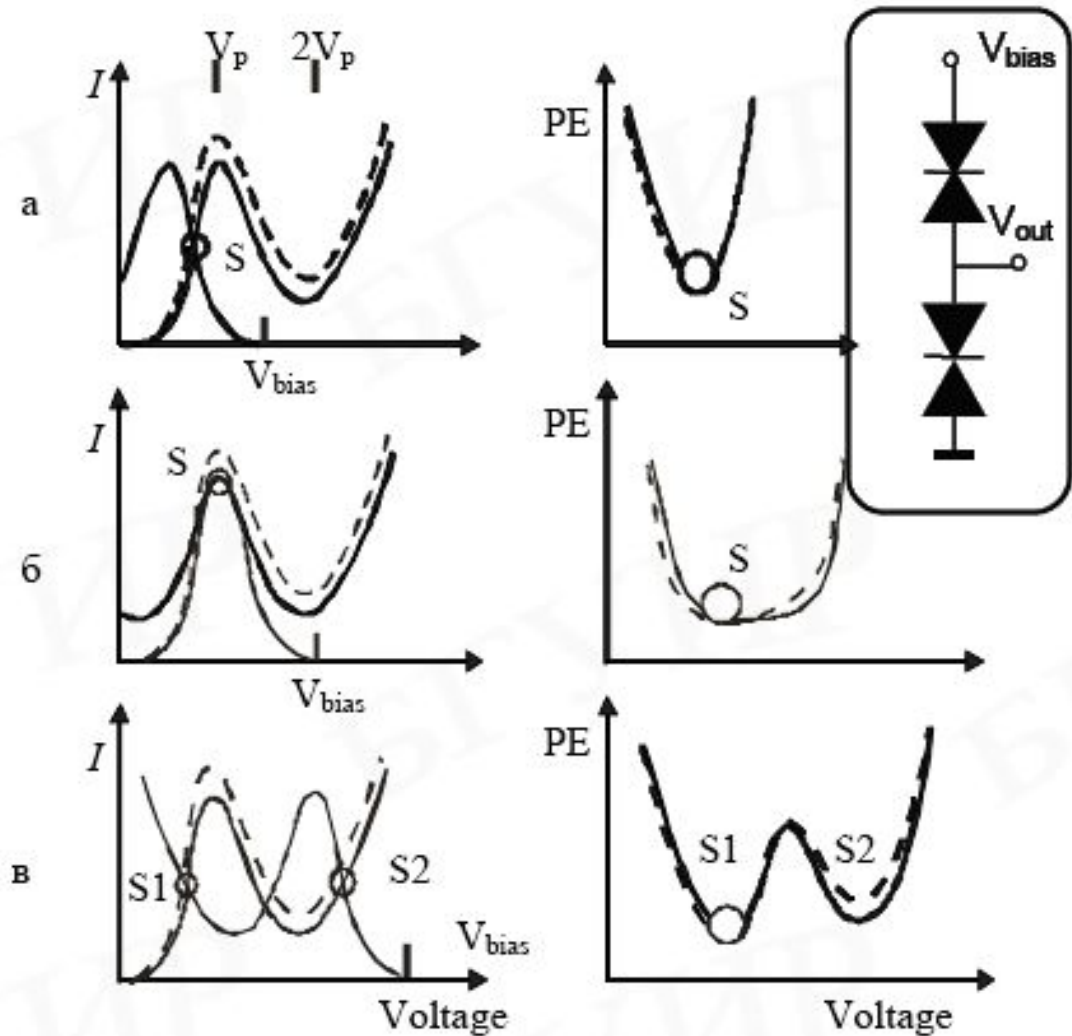


Рис. 8.8.

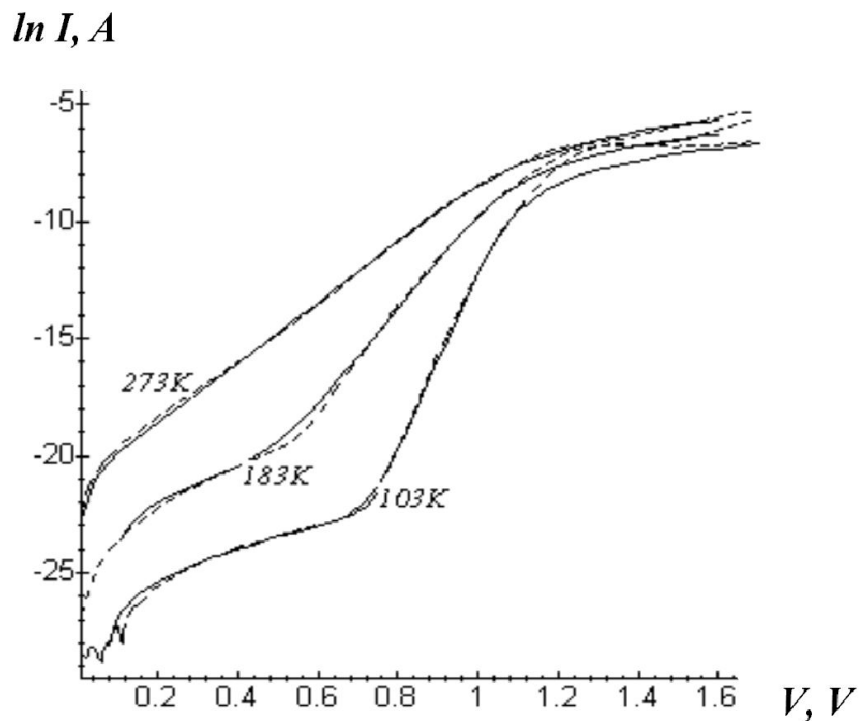
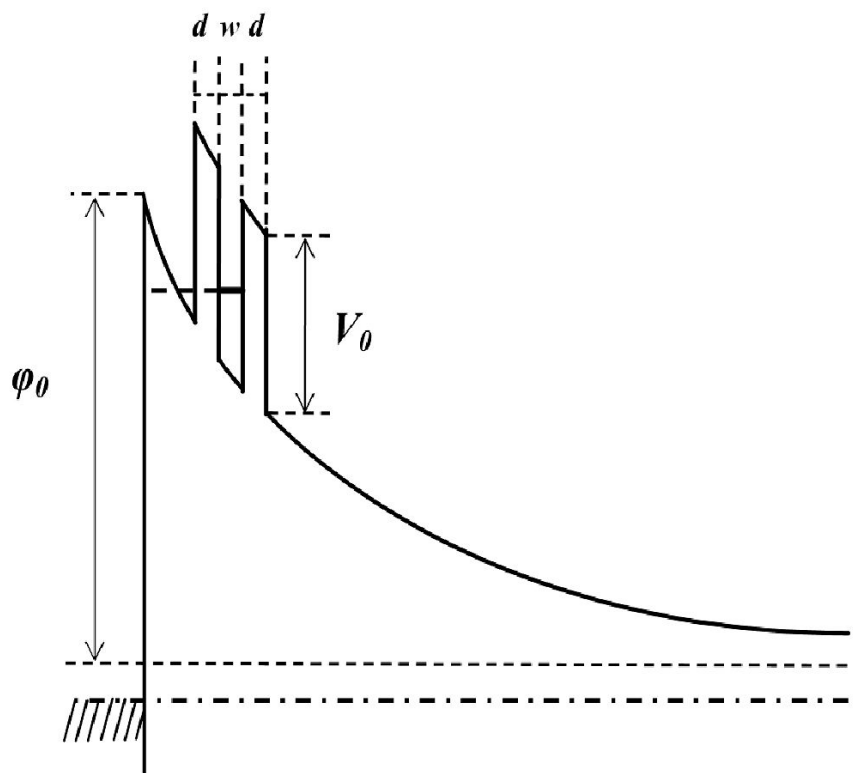
ВАХ Резонансно-тунельного біполярного транзистора

Логічні елементи на тунельно-резонансних транзисторах

Monostable-bistable transition logic elements (MOBILES)

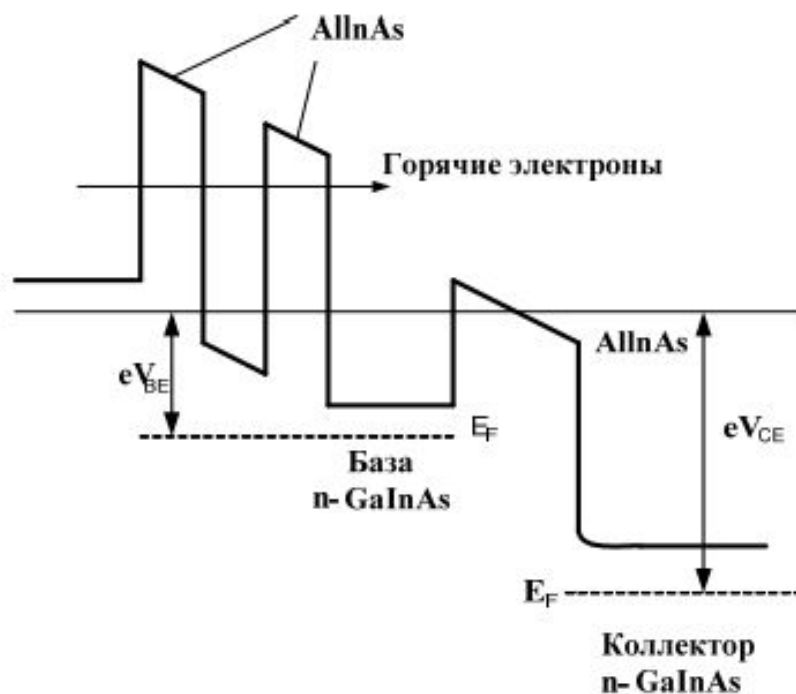


ДБРТ структури з блокуючими бар'єрами та їх характеристики



Структура розміщувалась на підкладинці (100) з досить товстим (300 нм) буферним шаром n-GaAs, концентрація домішки в якому була $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Потім інший шар n-GaAs високої якості товщиною 150 нм вирощувався на початку шару Шотткі при досить високій 540° C температурі осадження. Наступні 4 нм шару $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$, 3.5 нм GaAs та 4 нм $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ формували ДБРТ діод.

Транзистори на гарячих електронах з резонансним тунелюванням



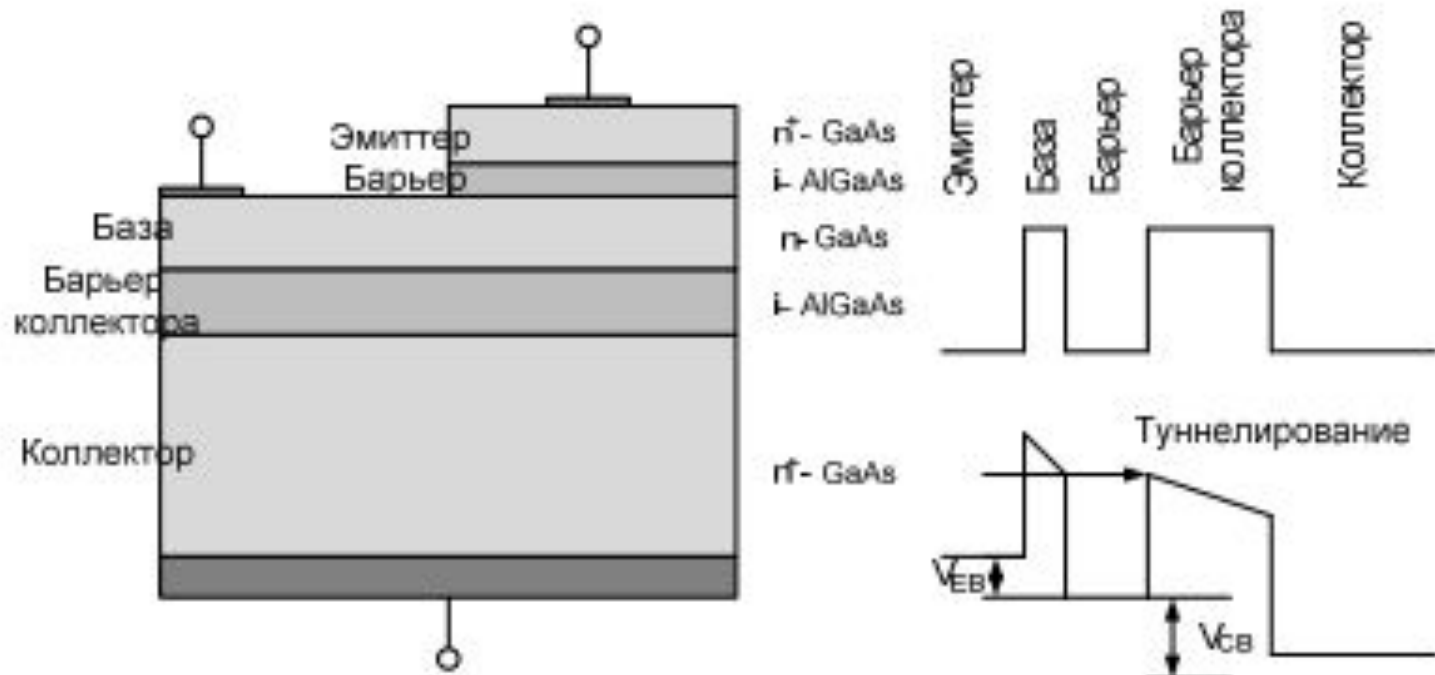
В області емітера розташована гетероструктура, що інжектує великі струми при виконанні резонансної умови. Положення резонансного рівня регулюється базо-емітерною напругою.

Транзистори на горячих электронах

При встановленні теплової рівноваги між електронами і ґраткою напівпровідника температура електронів $T_e =$ температурі ґратки T . В суттєво нерівноважних системах, коли електрони набувають енергій значно більших за теплову ($E = 3/2 kT$ для тривимірної системи) температура $T_e \gg T$.

Висота бар'єра в гетеропереходах $\sim 0,2 - 0,3$ еВ, що в 10 разів вище за kT .

Транзистори на горячих електронах дозволяють отримати монохроматичний ($\delta E = 1-10$ meV) потік високоенергетичних $E = 0,2-0,3$ еВ електронів.



Інтерференційні явища. Основні ідеї та співвідношення.

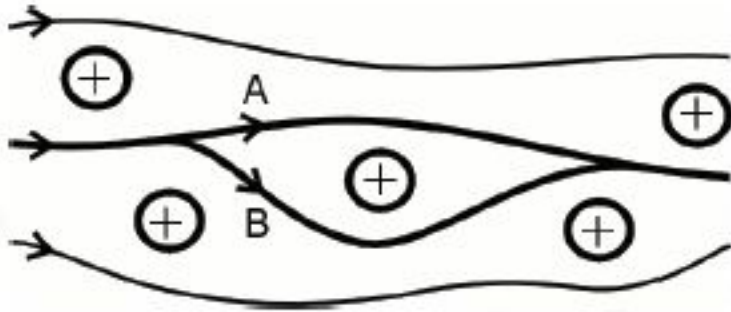


Рис. 1.3. Расщепление траектории движения электронов в твердом теле под действием атома примеси

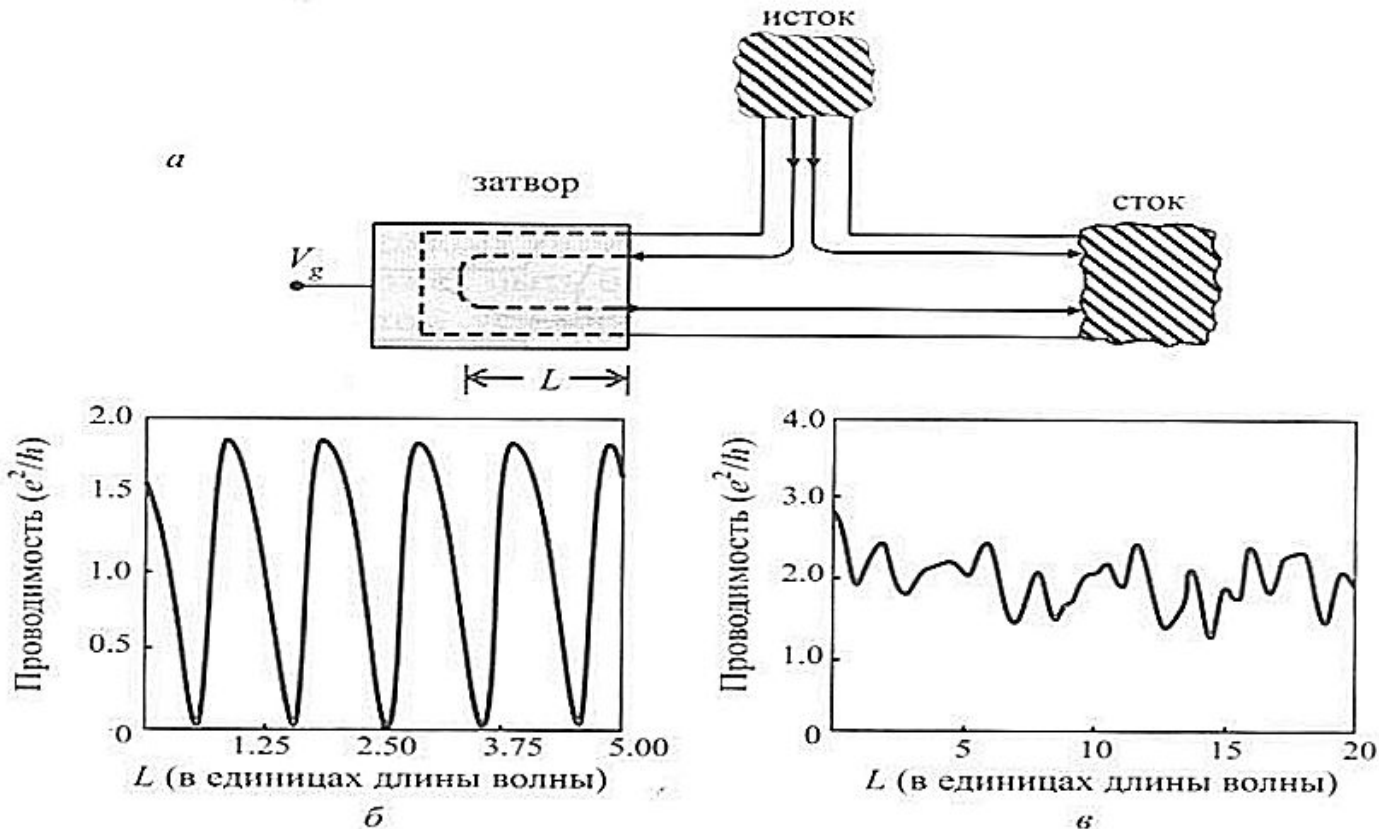
$$\Psi = A \exp(i\varphi)$$

$$\begin{aligned} W &= |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 = \\ &= 4 |A_1| |A_2| \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned}$$

Інтерференційний транзистор

Солс (1989), Датт(1989) і Фрон (1989)

$$k_F(L_1 - L_2) = k_F L = 2\pi n$$

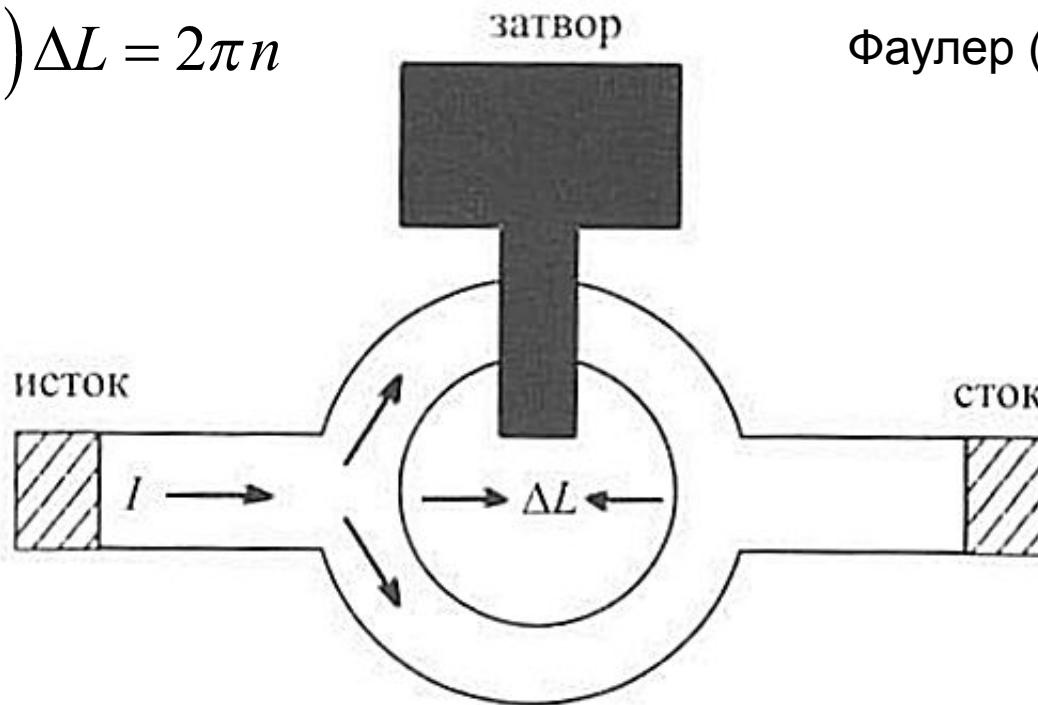


Конструкция интерференционного транзистора (а) и результаты численного моделирования его проводимости от истока к стоку для случаев одной (б) и нескольких (в) заполненных подзон

Принцип дії приладу основаного на ефекті інтерференції

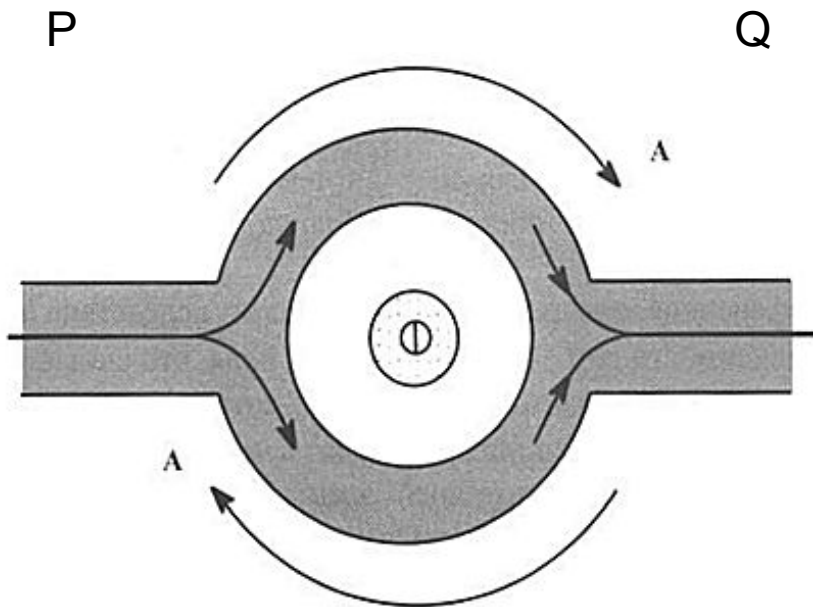
$$(k_F - k'_F) \Delta L = 2\pi n$$

Фаулер (1984)



Кольцевая конструкция электронного интерференционного транзистора

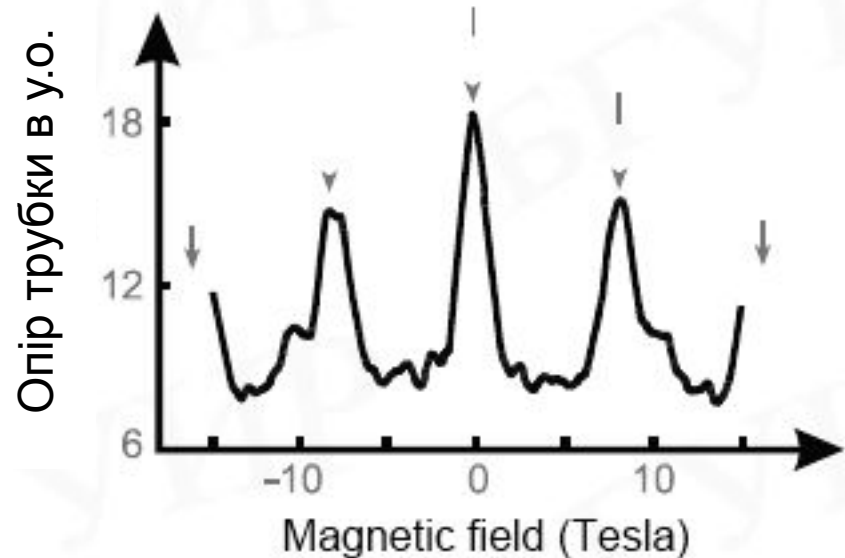
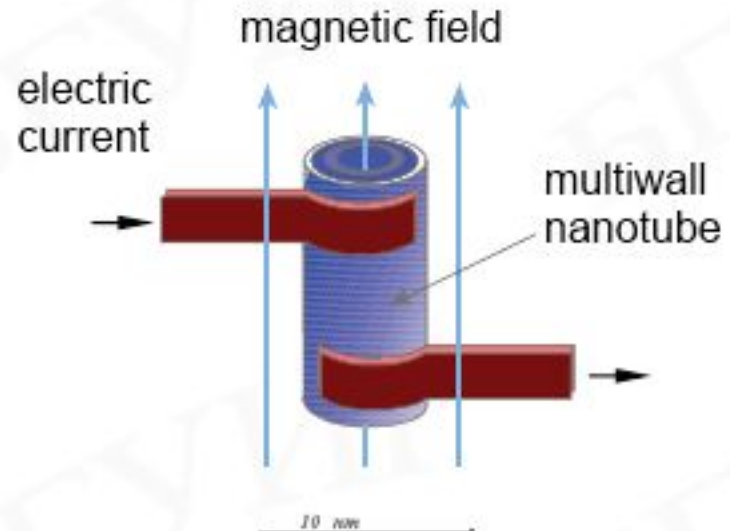
Ефект Ааронова-Бома



Конструкция интерферометра для экспериментального наблюдения эффекта Ааронова-Бома

$$\Delta\varphi = 2\pi(\Phi / \Phi_0)$$

$$\Phi_0 = h / e$$



Формальні співвідношення для ефекту Ааронова-Бома

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{e}{\hbar} \cdot \int_P \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar}{e}$$

$$\Delta\varphi = \frac{e}{\hbar} \left[\int_{\text{нижній маршрут}} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} - \int_{\text{верхній маршрут}} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} \right] =$$

$$\frac{e}{\hbar} \int_{\text{по контуру}} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} = \frac{e}{\hbar} \int_{\text{по площі перерізу}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \frac{e}{\hbar} \Phi$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \Phi}{\Phi_0}$$

$$W = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = \text{Cos}(\varphi_1 - \varphi_2) = \text{Cos} \frac{2\pi \Phi}{\Phi_0}$$