

**Поруваті матеріали.
Одноелектронні явища.
Тунельно-резонансні явища.**

Поруватий кремній

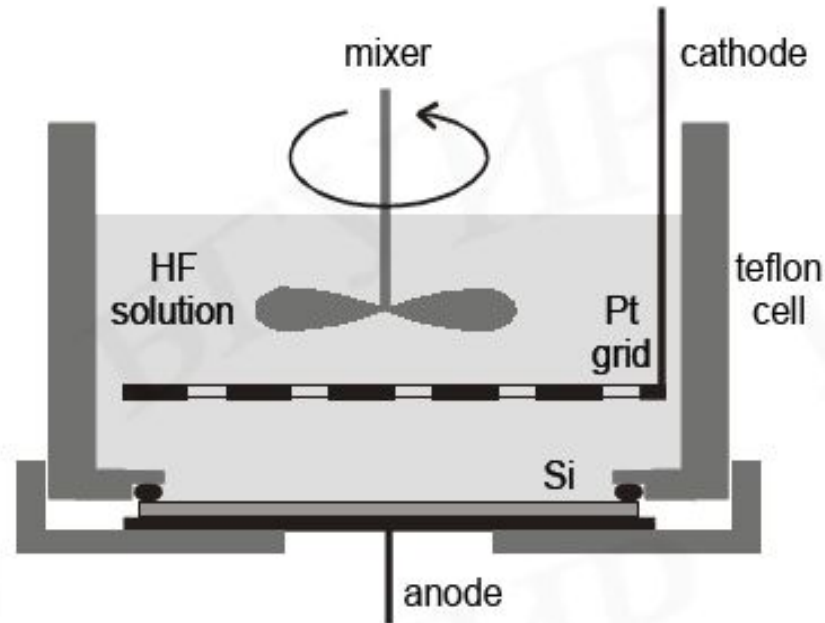
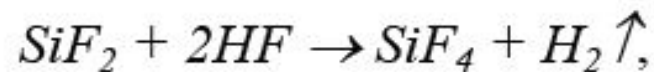
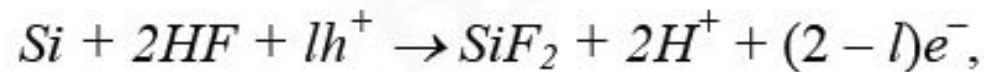


Рис. 5.1. Принципіальне устрійство однокамірної ячейки для електрохімічного анодування



Особенности пористой структуры

Слой пористого кремния может иметь один из двух принципиальных типов структуры.

В одном из них каналы пор имеют более – менее упорядоченную древообразную структуру, прорастающую от поверхности в объем. Такие поры обычно формируются в монокристаллическом кремнии с *n*-типом проводимости.

Другой тип структуры пористого слоя характеризуется хаотическим расположением пересекающихся пор, что типично для пористых слоев в *p*-типе монокристаллического кремния.

Кроме того, в **сильнолегированном кремнии** (удельное сопротивление материала ниже 0,05 Ом·см) обоих типов проводимости поры представляют собой каналы диаметром порядка 10 нм, идущие практически перпендикулярно поверхности. В них пористость может достигать 60 %.

В **слабелегированном кремнии** ситуация несколько иная.

Пористый слой, сформированный в *p*-кремнии и в *n*-кремнии при подсветке, состоит из сети хаотично расположенных пор диаметром 2–4 нм. Достижимая пористость в этом случае выше. Поры в *n*-кремнии, протравленном в темноте, выглядят как параллельно расположенные цилиндры. Пористость таких слоев обычно ниже 10 %.

Морфологія поруватого кремнію

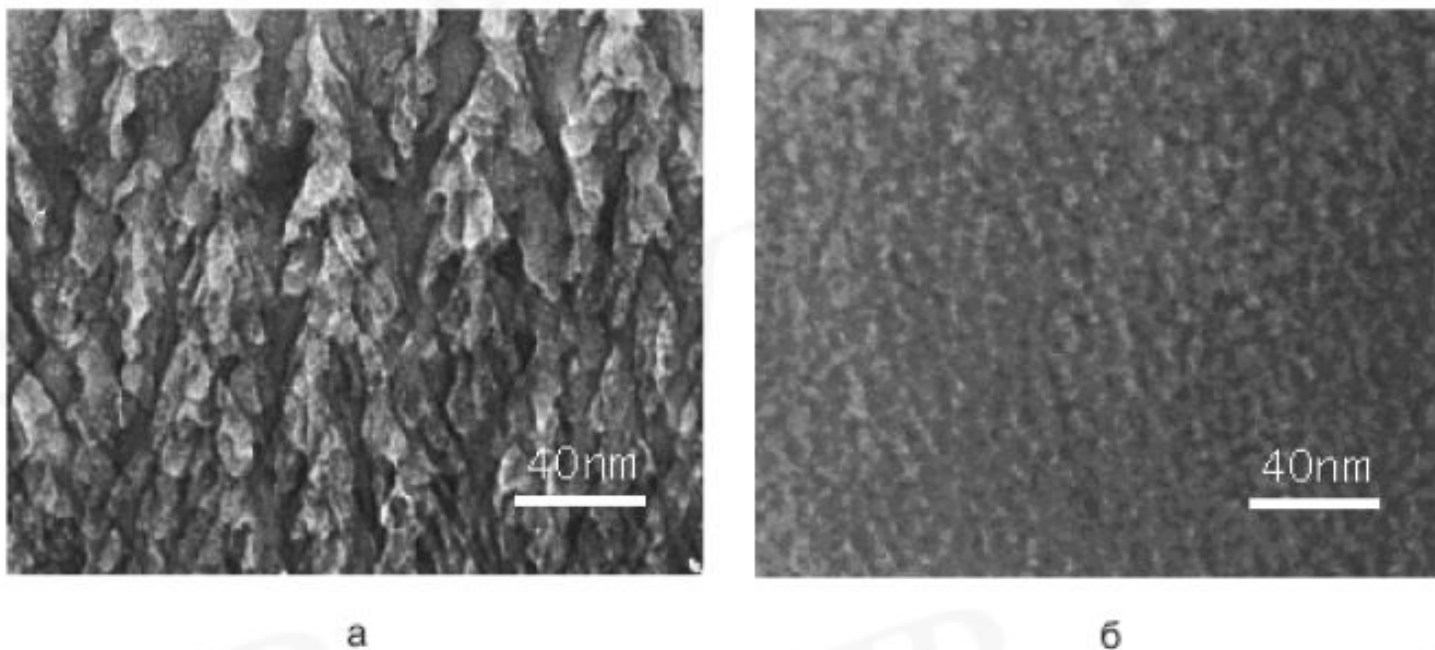
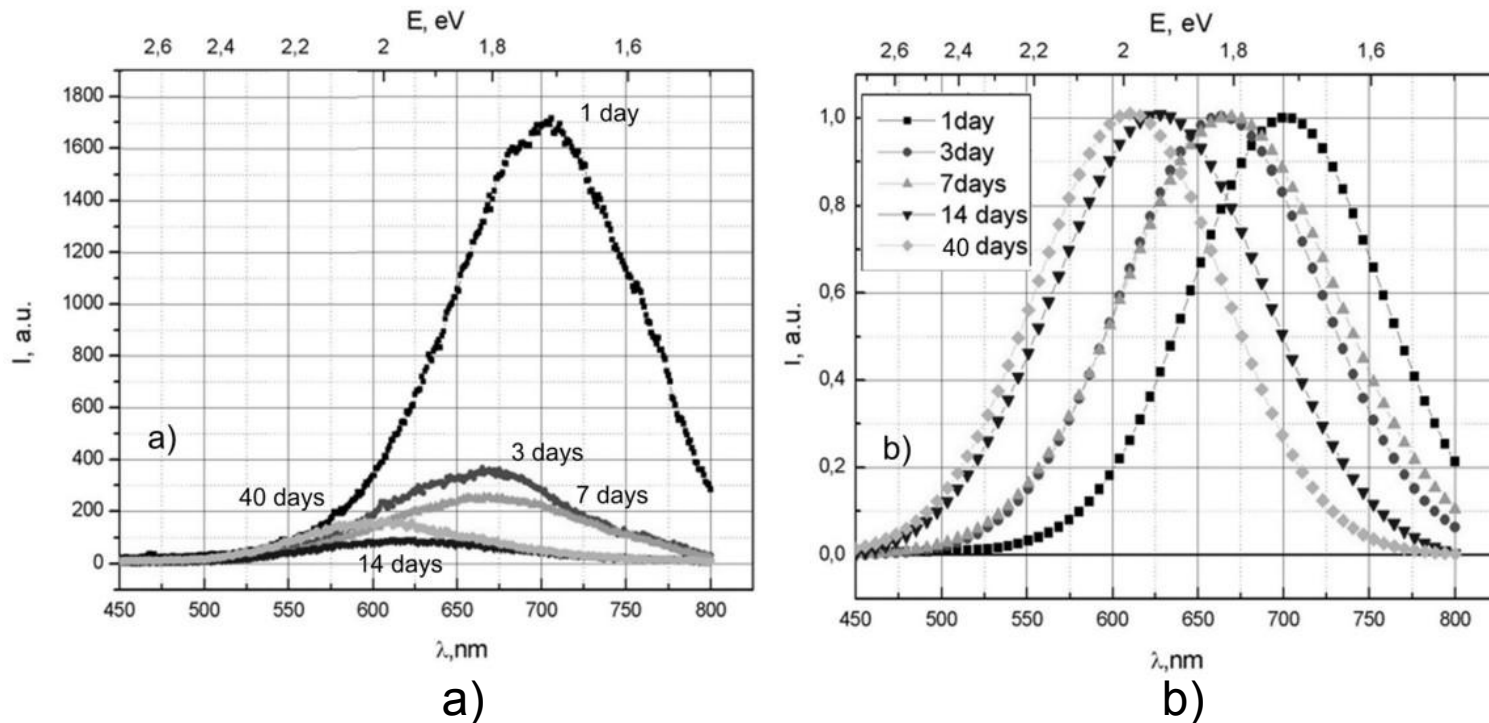


Рис. 5.2. Типичная морфология слоев пористого кремния:

а – монокристалл, анодированный в водном растворе плавиковой кислоты;

б – монокристалл, анодированный в концентрированной плавиковой кислоте (фотографии любезно предоставлены авторам доктором С. К. Лазаруком из своей личной коллекции)

Люмінесцентні властивості поруватого кремнію



Спектри фотолюмінесценції образців пористого кремнію n-типа, выдержанных на атмосфере от 1 до 35 дней: а) без нормировки, б) нормированные на единицу.

Фізико-хімічні властивості сапфіра

Сапфир - Драгоценная разновидность корунда.

Класс минерала: Оксиды.

Формула химически чистого [корунда](#) - Al_2O_3 .

Цвет: синий, голубой, розовый, желтый, зелёный, бесцветный, красно-оранжевый, фиолетовый.

Цвет обусловлен примесями металлов: титана, хрома, марганца, железа, ванадия.

Блеск: стеклянный.

Прозрачность: прозрачный до непрозрачного.

Светопреломление: 1,766-1,774.

Твёрдость по шкале Мооса - 9.

Плотность - 4,0 г/см.

Минерал хрупкий?: Нет.

Спайность: отсутствует.

Сингония: тригональная.

Излом: раковистый.



Фізико-хімічні властивості рубіна

Рубин - разновидность [корунда](#).

Химическая формула рубина - Al_2O_3 .

Спайность - мнимая, кажущаяся или отсутствует.

Сингония - тригональная.

Габитус кристаллов в виде шестигранных уплощенных табличек, также столбчатый.

Цвет рубина обусловлен примесями, изоморфно замещающими алюминий (хром, железо, титан): красный, розово-красный, пурпурно-красный насыщенность разная - менее яркие, более яркие.

Прозрачность - просвечивающийся, прозрачный.

Блеск - стеклянный.

Твёрдость по шкале Мооса - 9.

Плотность - 3,97 - 4,05.

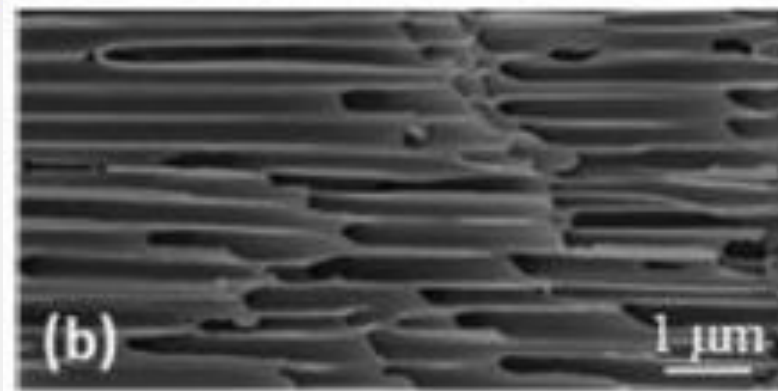
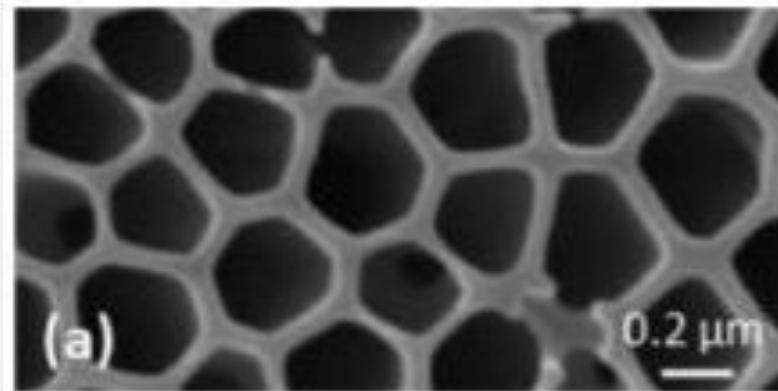
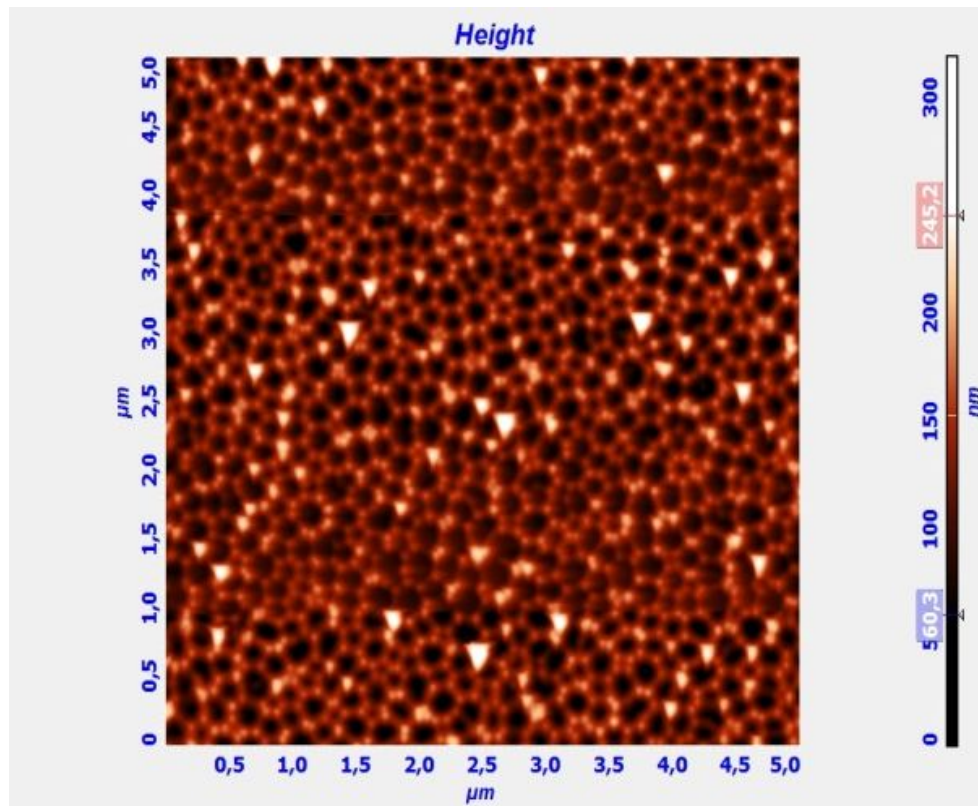
Светопреломление или период рефракции - 1,766-1,774.

Излом - раковистый, неровный, кристалл хрупкий.

Натуральный рубин - самый дорогой драгоценный камень в мире. Рубин идеального качества из Бирмы будет стоить дороже бриллианта, при таком же



Поруватий оксид алюмінія (Al_2O_3)



Образование анодных оксидов из тонких пленок или массивного алюминия в жидких электролитах при электрохимическом анодном окислении (оксидировании) происходит в результате встречной миграции ионов Al^{3+} и O^{2-} в электрическом поле большой напряженности.

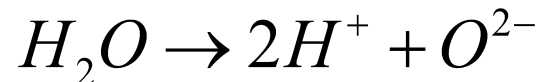
Процес формування пор

Сложный процесс пористого анодного окисления алюминия целесообразно разделить на три стадии: 1) протекание реакции передачи кислорода от анионов или молекул раствора на анодируемый металл и возникновение первичного соединения алюминия с кислородом; 2) формирование сплошной тонкой оксидной пленки барьерного типа; 3) рост утолщенной пленки пористого типа.

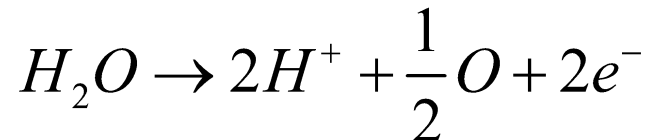
Донорами кислорода могут быть все кислородсодержащие ионы электролита (SO_4^{2-} , HSO_4^- , PO_4^{3-} , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, OH^-), а также недиссоциированные молекулы раствора и, прежде всего, молекулы воды.



відбувається



замість



Плівки з впорядкованими порами

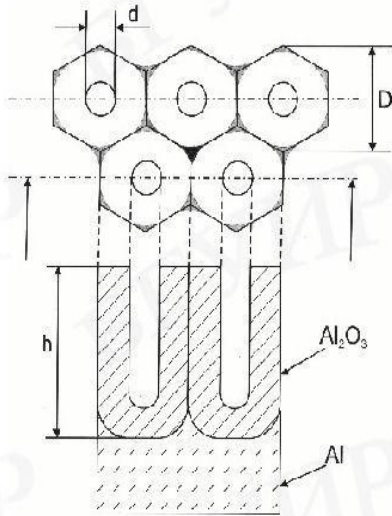


Рис. 5.3. Схематическое изображение фрагмента пористого оксида с плотно упакованными гексагональными ячейками в центре с порой (d – диаметр поры, D – диаметр ячейки, h – высота поры (и пористого оксида))

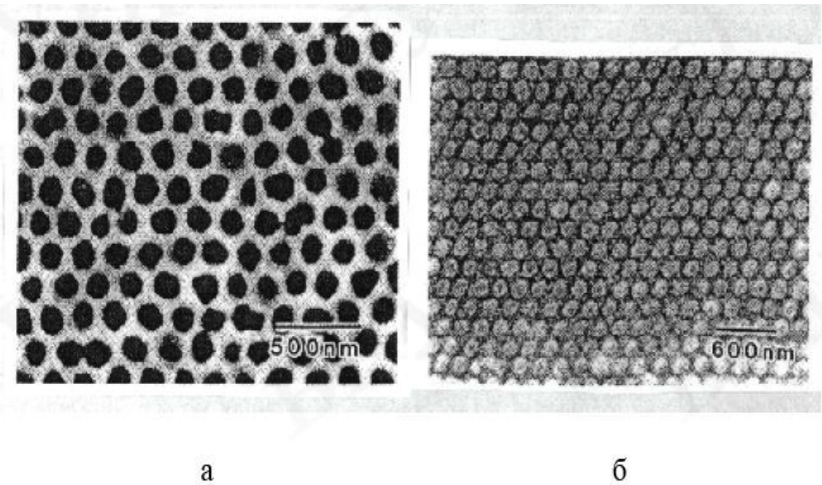


Рис. 5.6. РЭМ-фотографии сетки из пористого оксида алюминия (а) и Ag-точек на поверхности кремниевой подложки, сформированных осаждением пленки серебра через маску из пористого оксида алюминия (б) [6]

Исследования показали, что и барьерные и пористые пленки развивают ячеистую структуру только по истечении некоторого времени t_{\min} , при котором ток имеет минимальное значение в режиме постоянного напряжения. В порообразующих электролитах это время равно примерно 2 с, в 3%-ном растворе тартрата аммония ($\text{pH} = 5,5$) $t_{\min} = 12$ мин, а в том же электролите ($\text{pH} = 7,0$) – 90 мин.

Застосування пористих плівок Al_2O_3

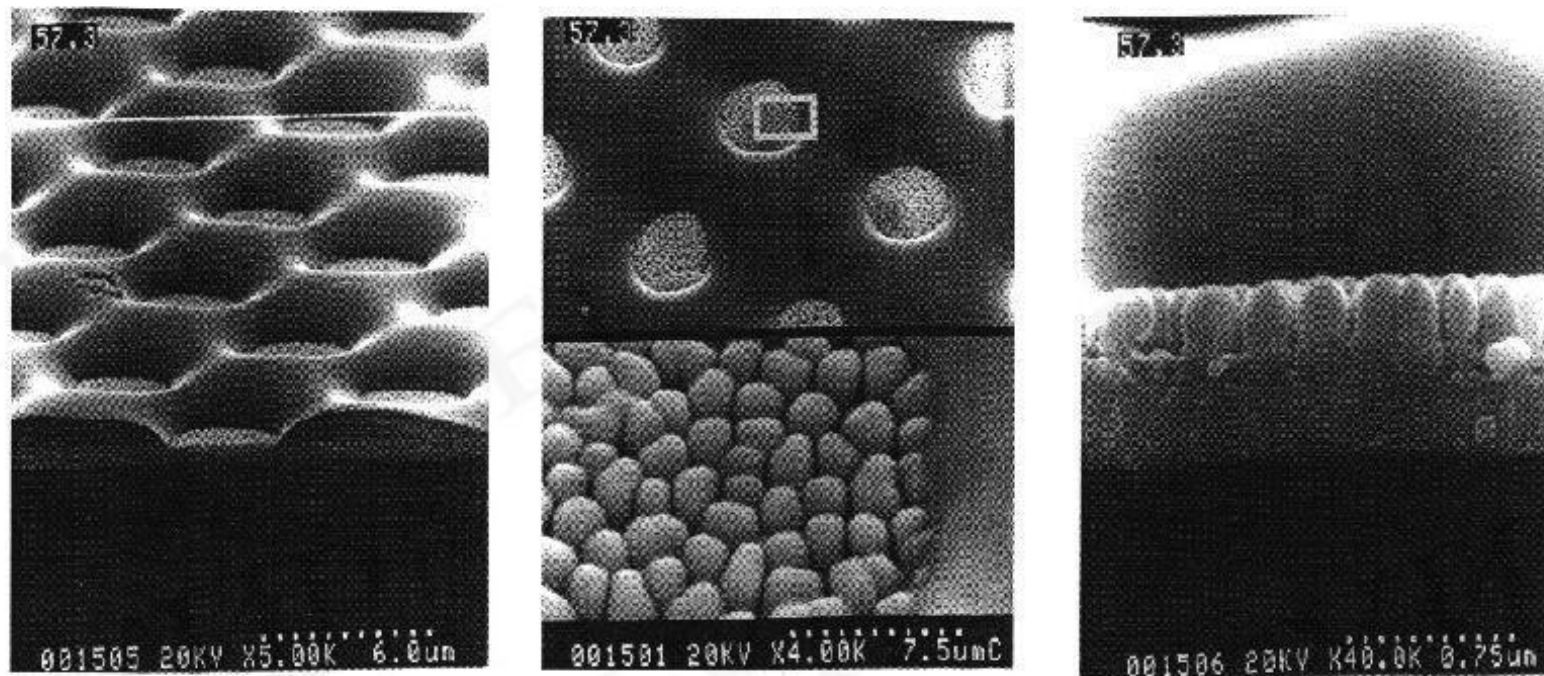


Рис. 5.8. РЭМ-фотографии столбиковых микроструктур, локально сформированных в отверстиях фоторезистивной маски через пористый оксид алюминия [8]

Схема вирощування нанодисків із Au з використанням плівок

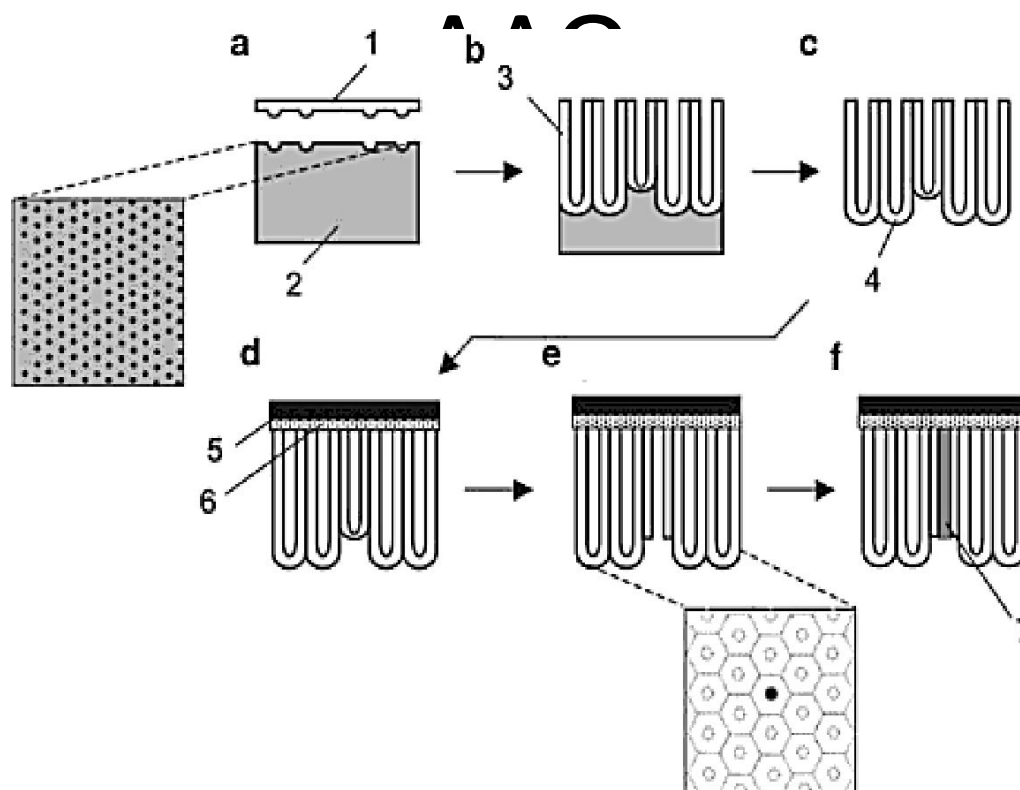


Fig. 14.26. Schematic of the preparation process for a pore-differentiated Au-nanodisk array: (a) imprinting the aluminum with a SiC mold; (b) anodization of the Al; (c) removal of the Al; (d) formation of an electrode on the top-surface of the AAO membrane; (e) selective etching of the barrier layer at shallow sites to form selectively opened holes; (f) deposition of Au. (ICP) etching through the template.

Вирощування масивів квантових точок з використанням пірок ААО

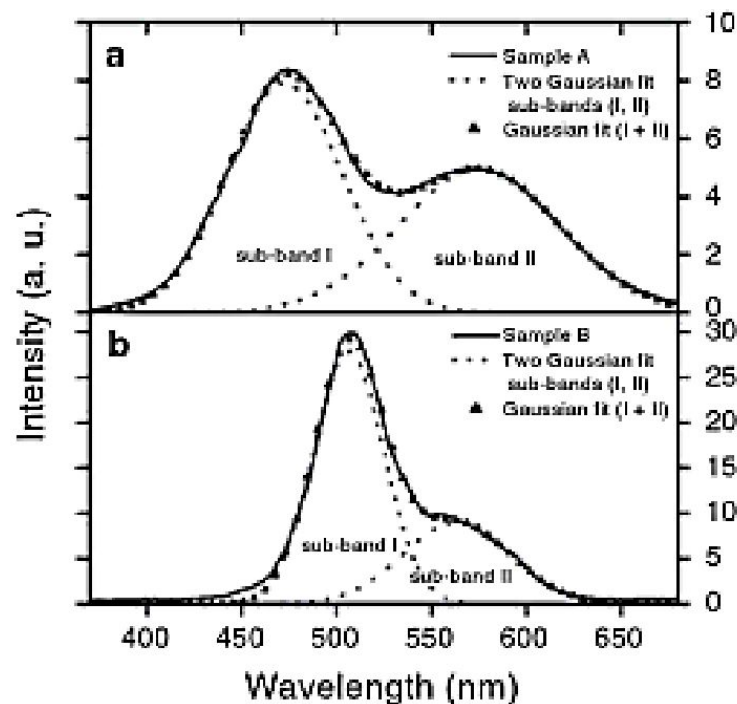
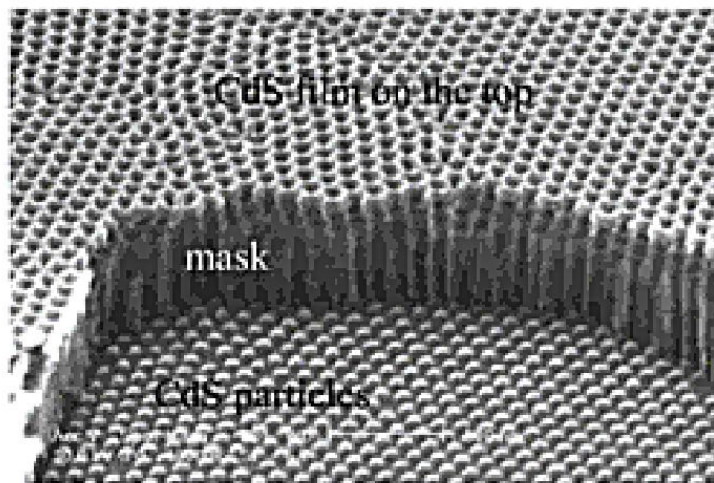
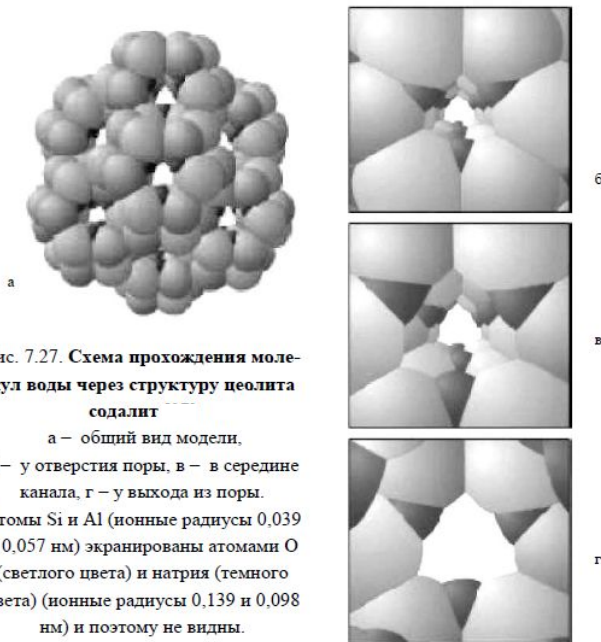


Fig. 14.29. Left, CMS nanodots arrays with an average diameter and spacing of 80 nm and 105 nm respectively, formed on Si substrates using an AAO mask; and right, photoluminescence spectra of CdS nanodot arrays of (a) 10 nm height and (b) 50 nm height and their two Gaussian fit subbands. The excitation wavelength is 350 nm. The peak positions of the subbands I and II are located at about 473 and 575 nm in sad and 506 and 563 nm in sbd, respectively.

Цеоліти

Термин "цеолит" (в переводе с греческого — кипящий камень) был предложен Ф. Кронштедтом, который в 1756 году обнаружил, что минерал стильбита (семейство гидратированных силикатов алюминия) при нагревании вспучивается, т.е. увеличивается в объеме с выделением воды. Подразделяют **содалиты, мордениты, фожазиты, шобазиты, пентасилы** и т.д.



Размеры пор могут быть несколько различными в пределах одного структурного типа цеолитов, поскольку они зависят от соотношения кремния к алюминию – Si/Al, типа катионов, адсорбции различных молекул, прежде всего, воды. Например, для цеолитов КА диаметр кольца равен 0,3 нм, NaA – 0,42 нм, CaA – 0,5 нм.

Соотношение Si/Al в составе кристаллической структуры может меняться в зависимости от условий синтеза

Структуры цеолитів

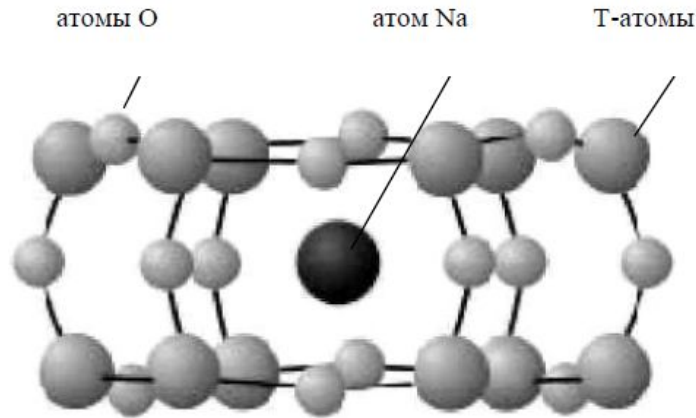


Рис. 7.28. Вторичная структура единица фожазита – гексагональная призма

Размеры атомов условны

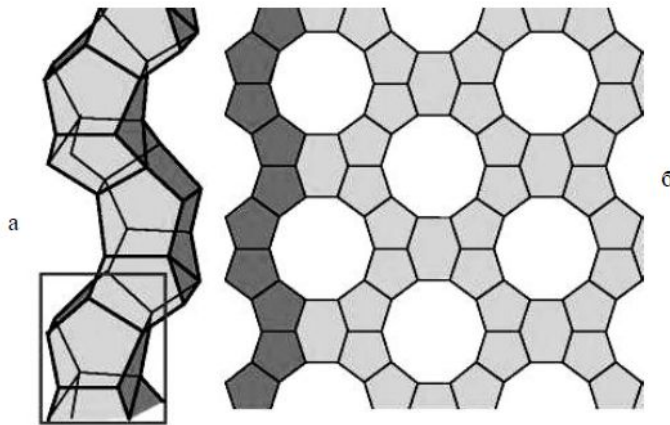


Рис. 7.29. Структура цеолита типа пентасила

а – цепочка, б – слой

Основной структурный элемент выделен рамкой

Основным структурным элементом цеолитов указанных типов является почти правильный тетраэдр, в котором угол связи O–T–O (где T – атомы Al и Si) немного ($\pm 2-3^\circ$) отличается от тетраэдрического ($109^\circ 28'$).

Соединение тетраэдров посредством атомов кислорода приводит к образованию различных вторичных структур: колец (из 4, 5, 6, 8, 10, 12 T-атомов), призм и более сложных многогранников.

Застосування нанопористих мембран

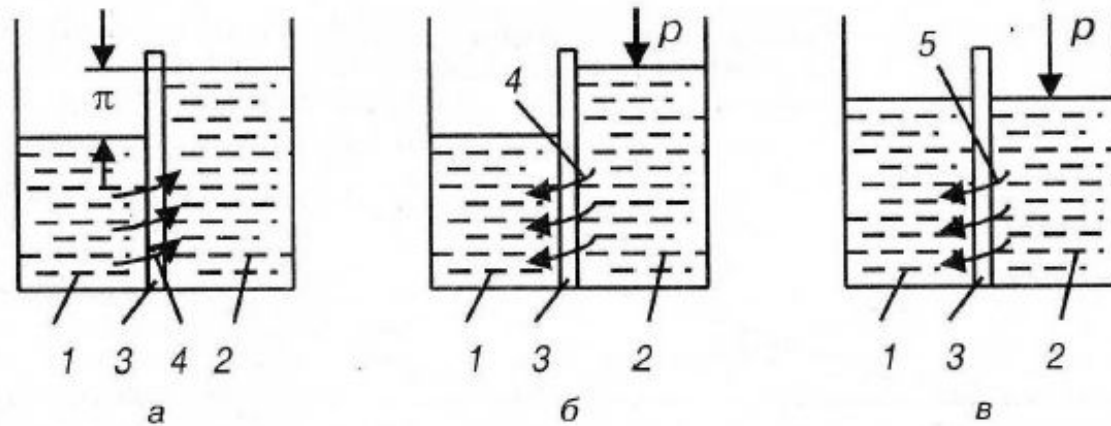


Рис. 7.23. Схема осмоса (а), обратного осмоса (б), диализа и ультрафильтрации (в)

1 — дисперсионная среда (чистая жидкость); 2 — коллоидный или истинный раствор;
3 — мембрана (полупроницаемая перегородка); 4 — поток чистой жидкости
(растворителя); 5 — поток примесей

В качестве материалов для мембран довольно часто используют полимеры: ацетат целлюлозы, полиуретан, поливиниловый спирт, поливинилкарбонат, полиамид, полиэтилен, сложные эфиры целлюлозы и др.

Стандартна технологія отримання нанопористих мембран

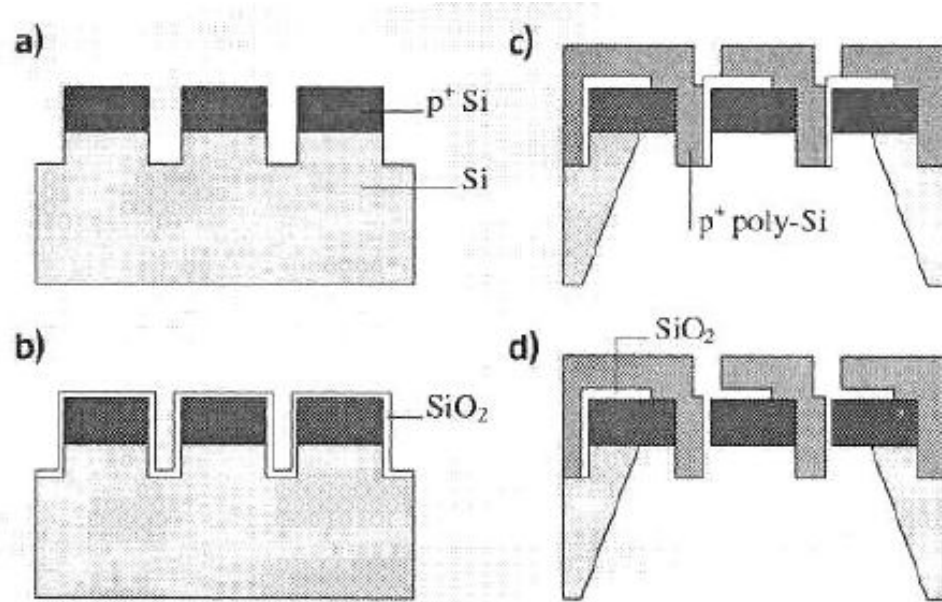


Рис. 7.25. Схема получения нанопористой кремниевой мембраны
а – формирование поровых отверстий в слоях p^+ кремния и борированного кремния, б – наращивание тонкого слоя оксида кремния, в – осаждение толстого поликремниевого слоя на оксидный слой и формирование поровых отверстий в поликремниевом слое, г – открытие пор в результате удаления SiO_2

Сучасні біо-контейнери

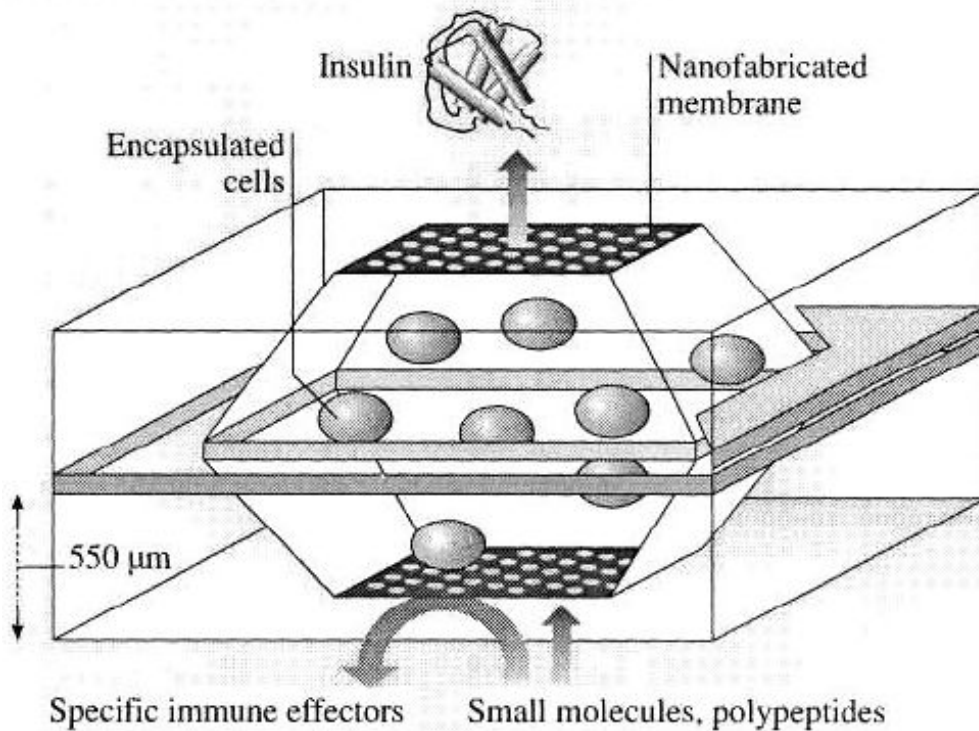


Рис. 7.26. Защита биокomпонентов

от нежелательного воздействия внешней среды
с помощью нанопористых мембран

Мембраны с порами в 10 нм защищают иммуногенные структуры, например, клетки, производящие инсулин, от контакта с крупными по размерам молекул веществ, находящихся во внешней среде и способных оказывать разрушающее действие на иммунную систему. В то же время мембраны обеспечивают свободную диффузию малых по размерам молекул кислорода и питательных вещества (глюкозы, протеинов) в клетки и молекул инсулина из клеток.

Наноаэрогели



Аэрогели – это пористые твердотельные материалы, структура которых представляет жесткий каркас с большим объемом внутренних пор, который в десятки раз превышает объем, занятый каркасом, т.е. самим материалом. Известны аэрогели на основе Li_2O , B_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_3O_4 , Cu_2O , ZrO_2 . Аэрогели состоят из фрактальных агрегатов, которые образуются в процессе фрактального роста отдельных частиц.

В процессе образования аэрогелей фракталы по мере разрастания соприкасаются друг с другом и срастаются, формируя жесткий каркас. С ростом фрактальных агрегатов в объеме аэрогеля возникают дополнительные пустоты и уменьшается объем, занятый веществом. Наноаэрогели содержат каркасные прослойки нанометровой толщины. Среди аэрогелей большее распространение получил наноаэрогель SiO_2 .

Основні властивості аерогелей

Унікальними свойствами аерогелей являются низкая плотность (от 0,002 до 0,25 г х см⁻³), высокоразвитая [удельная поверхность](#), малая подверженность старению и высокие сорбционные свойства (эффективно поглощают NO, NO₂, CO, CO₂, непредельные углеводороды).

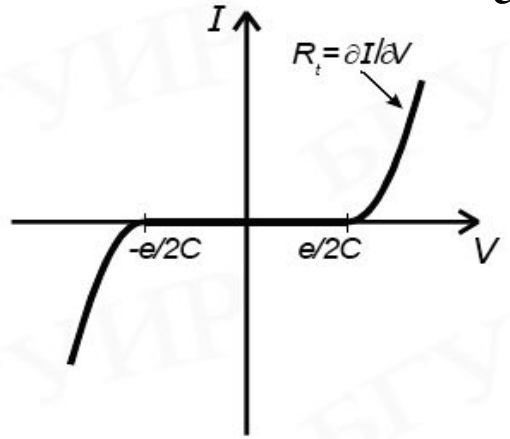
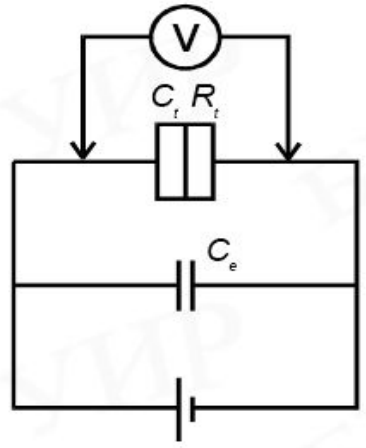
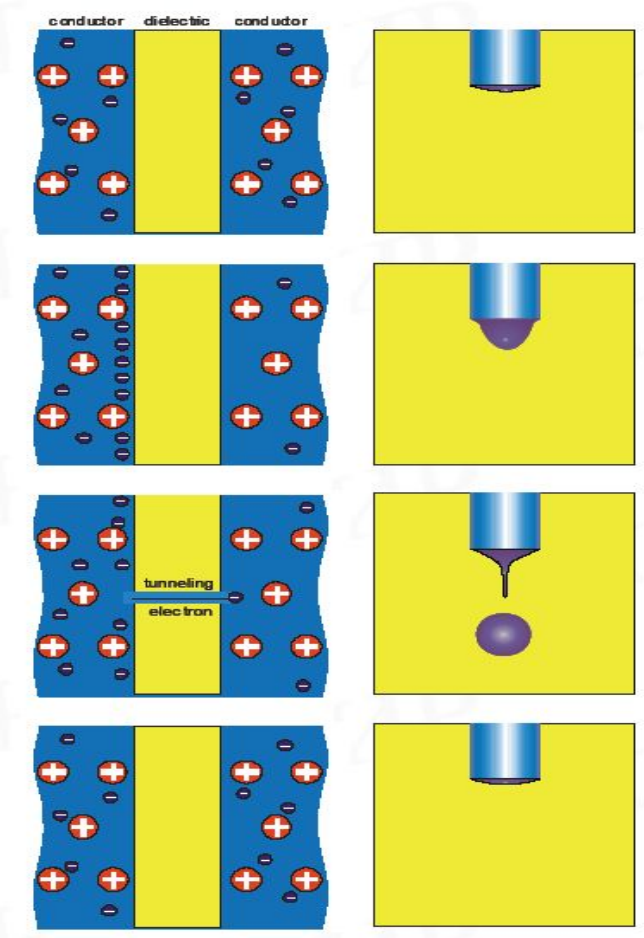
Аэрогели разного состава используются как тепло- и электроизоляционные материалы, нанодисперсные добавки в [гибридных](#) Аэрогели разного состава используются как тепло- и электроизоляционные материалы, нанодисперсные добавки в гибридных органонеорганических композиционных [материалах](#) Аэрогели разного состава используются как тепло- и электроизоляционные материалы, нанодисперсные добавки в гибридных органонеорганических композиционных материалах, носители катализаторов и [сорбентов](#), наноразмерные фильтры.

Аэрогель на основе SiO₂ представляет собой разветвленный трехмерный [кластер](#) представляет собой разветвленный трехмерный кластер, напоминающий древовидную сеть из [наночастиц](#) размером около 4 нм. Пространство между кластерами заполнено воздухом. Так как характерный размер таких пустот (~100 нм) в десятки раз превышает размер кластеров, то материал получается очень легким.

Одноелектронні явища. Прилади з одним Кулонівським бар'єром.

Д.Аверин и К.Лихарев 1985-1986 г.г

$$\Phi \leq 10^{-16} \quad R_t \geq \frac{h}{e^2}$$



$$\Delta E = \frac{e^2}{2C} - eV$$

$$V_{\text{порог}} = \frac{e}{2C}$$

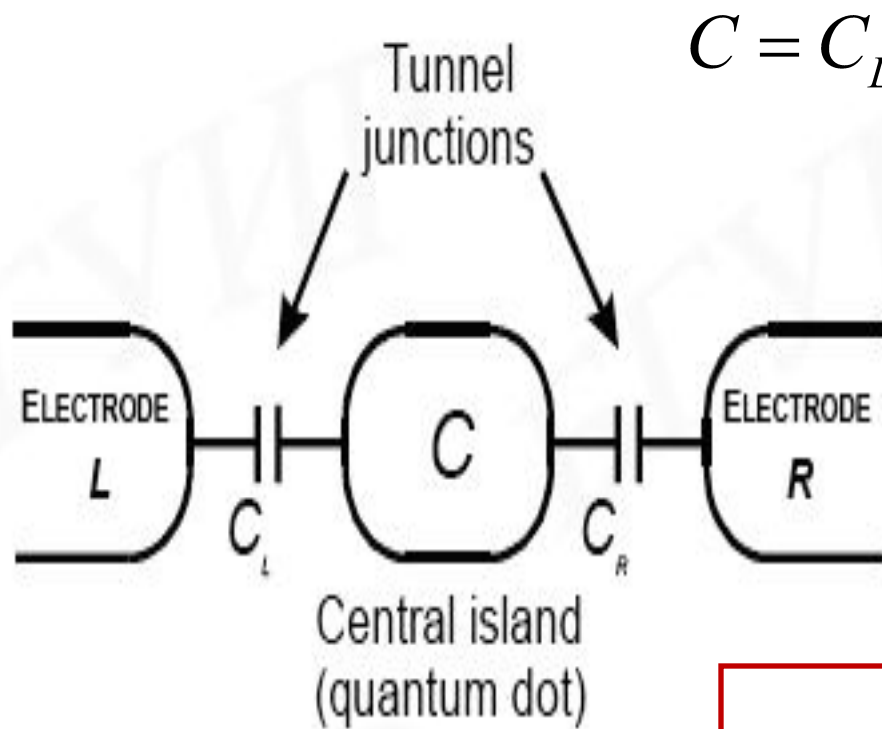
$$\Delta E \leq 0$$

$$C = C_e + C_t$$

$$k_B T \ll e^2 / 2C$$

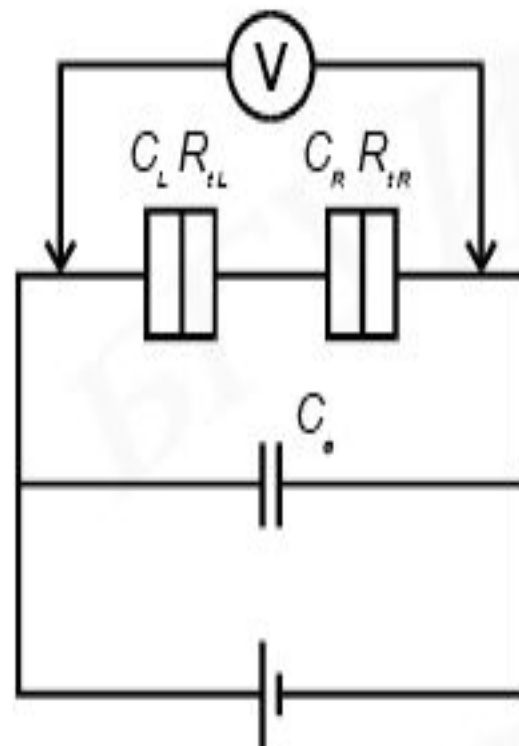
$$T = 4K$$

Одноелектронні прилади з двома Кулонівськими бар'єрами



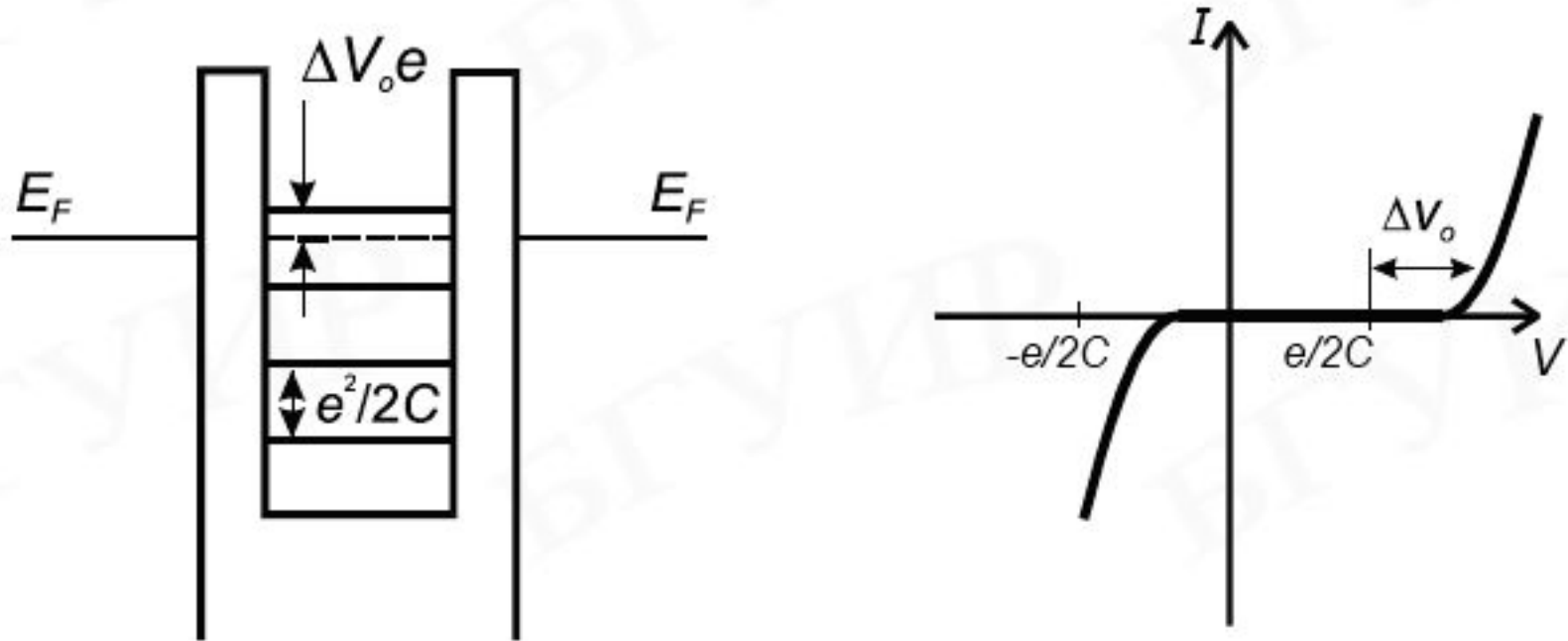
$$C = C_L + C_R$$

$$f = \frac{I}{e}$$



Зонна діаграма та ВАХ приладу з двома Кулонівськими бар'єрами

Асиметрію ВАХ вперше пояснив Т. Торнтон



$$\Delta\mu = \mu_I - \mu_L = \mu_I - \mu_R = e\Delta V_0$$

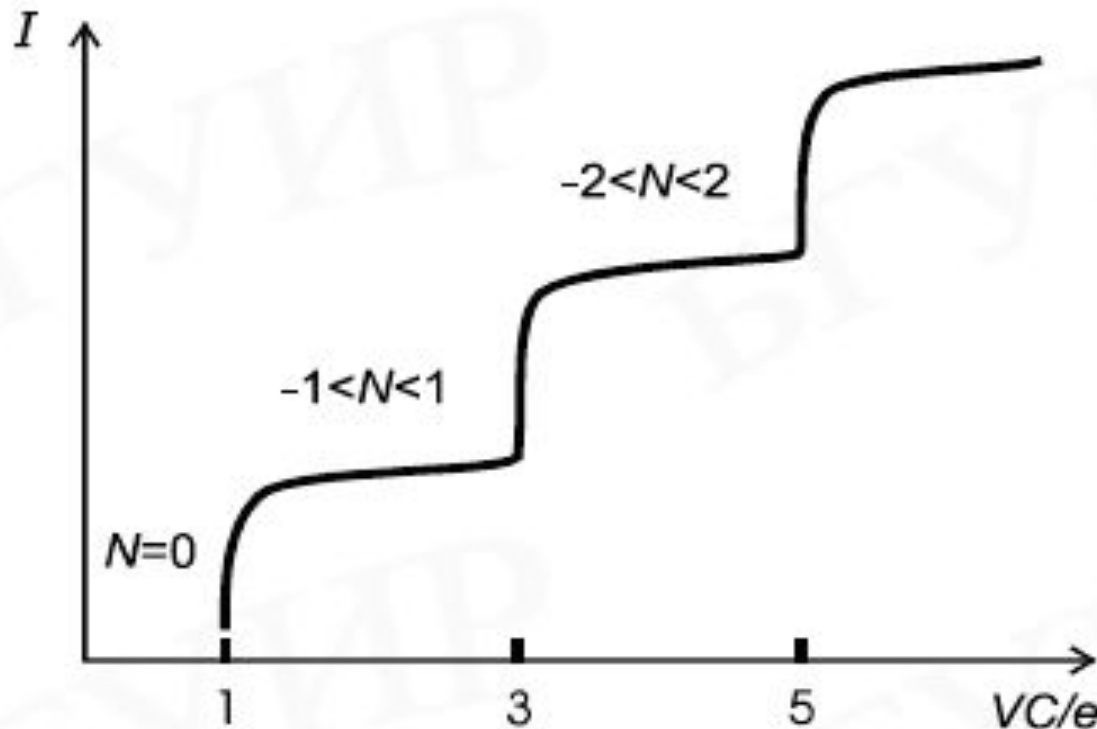
$$\Delta E = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{e}{C} + \Delta V_0 \right)^2 C - \Delta V_0^2 C \right]$$

$$\Delta V_0 < e/2C$$

$$C \approx C_R \gg C_L$$

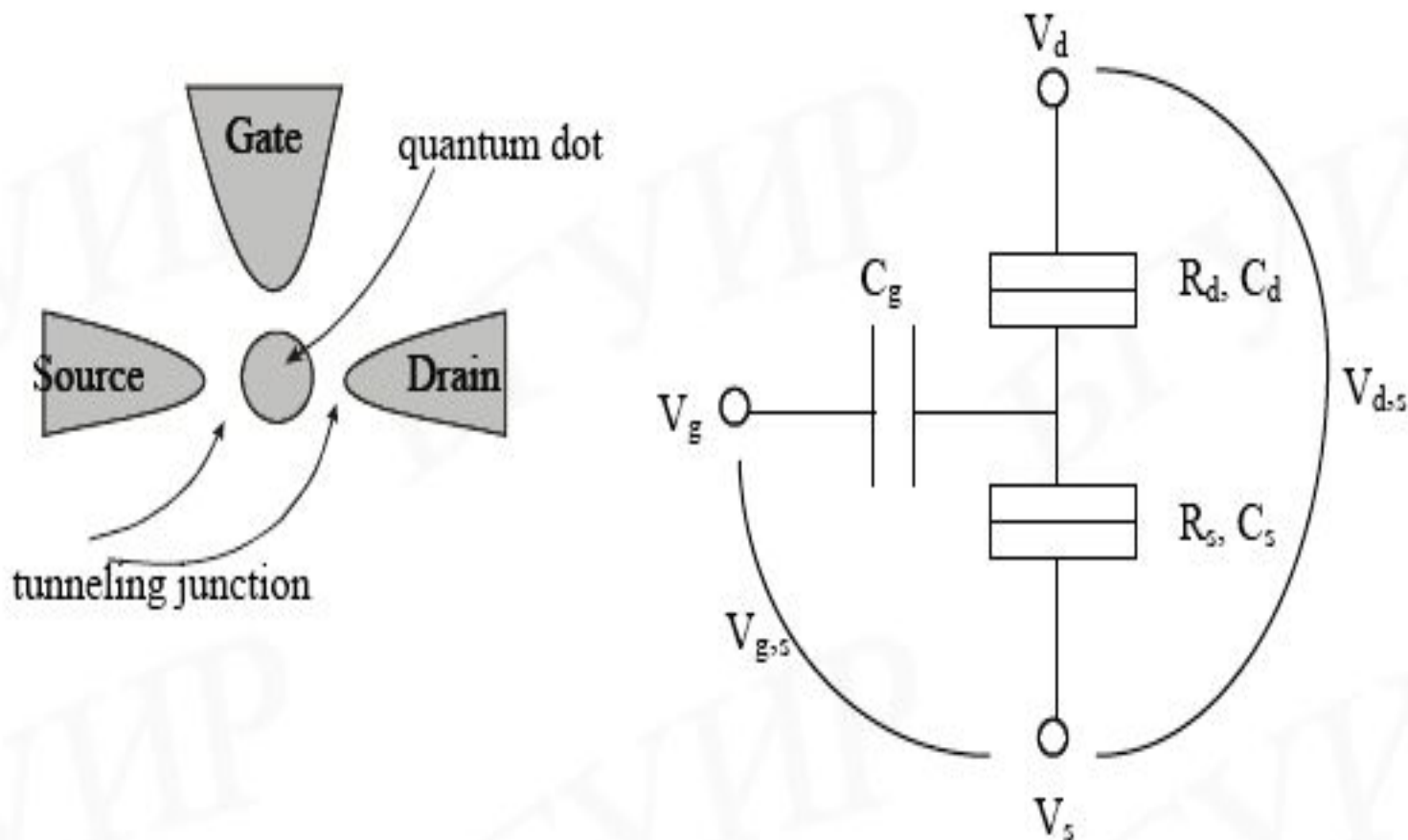
$$V \geq C(e/2C + \Delta V_0) / C_R$$

ВАХ приладу з двома різними показниками прозорості бар'єрів



Кулонівська драбинка

Одноэлектронный транзистор (single-electron transistor)



Критерії існування Кулонівської блокади в одноелектронному транзисторі

$$\frac{1}{C_S + C_G} \left(-ne + \frac{e}{2} + C_G V_G \right) > V_D$$

$$\frac{1}{C_G} \left(ne - \frac{e}{2} - C_G V_G \right) < V_D$$

Співвідношення між напругами на контактах одноелектронного транзистора при яких зберігається певна кількість електронів на островці

Характеристики одноэлектронного транзистору

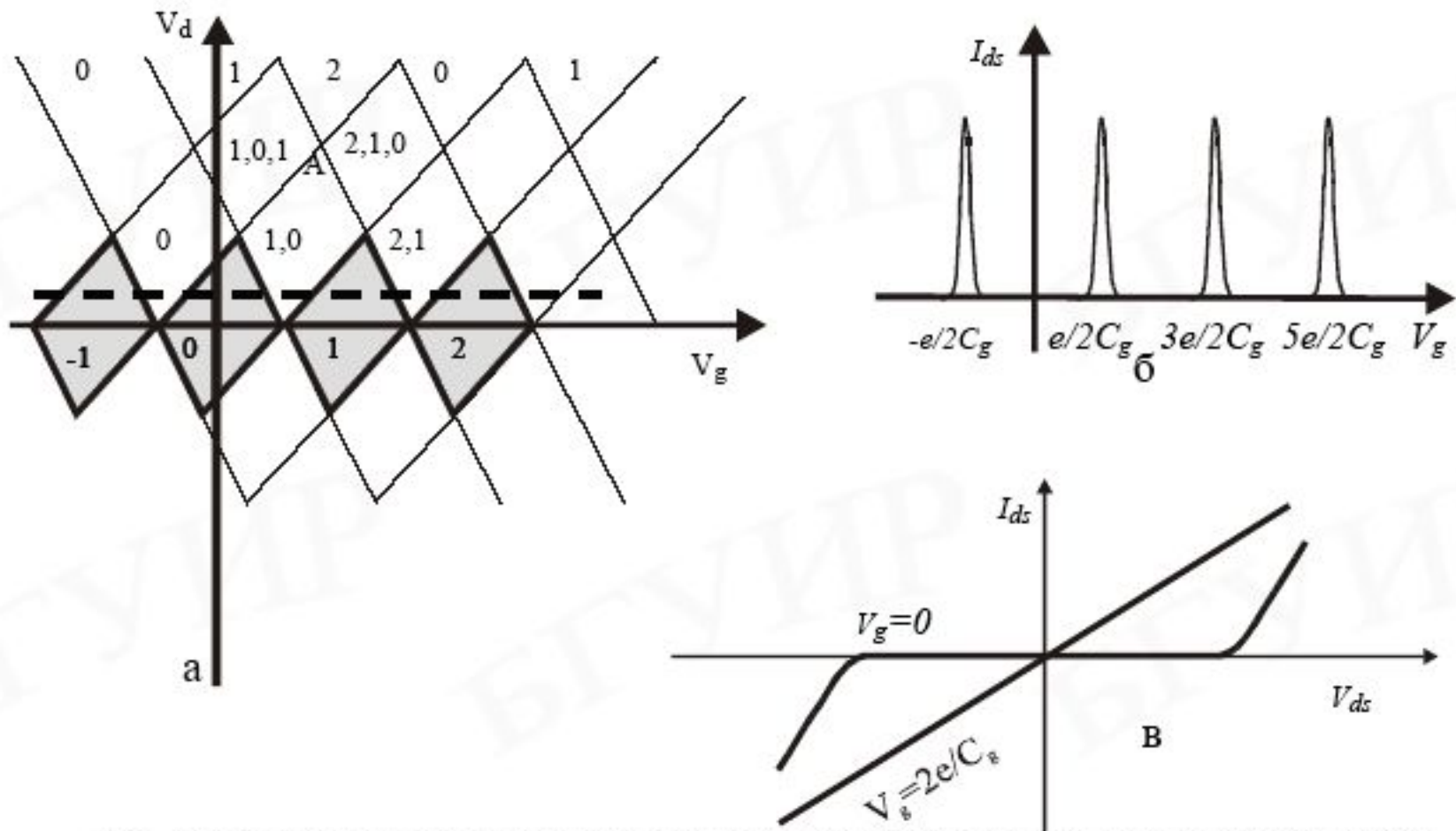


Рис. 2.8. Соотношение между напряжением стока V_d и напряжением затвора V_g (а); характеристики одноэлектронных транзисторов: зависимости I_{ds} от V_g (б) и I_{ds} от V_{ds} (в)

Одноэлектронная пастка (single-electron turnstile)

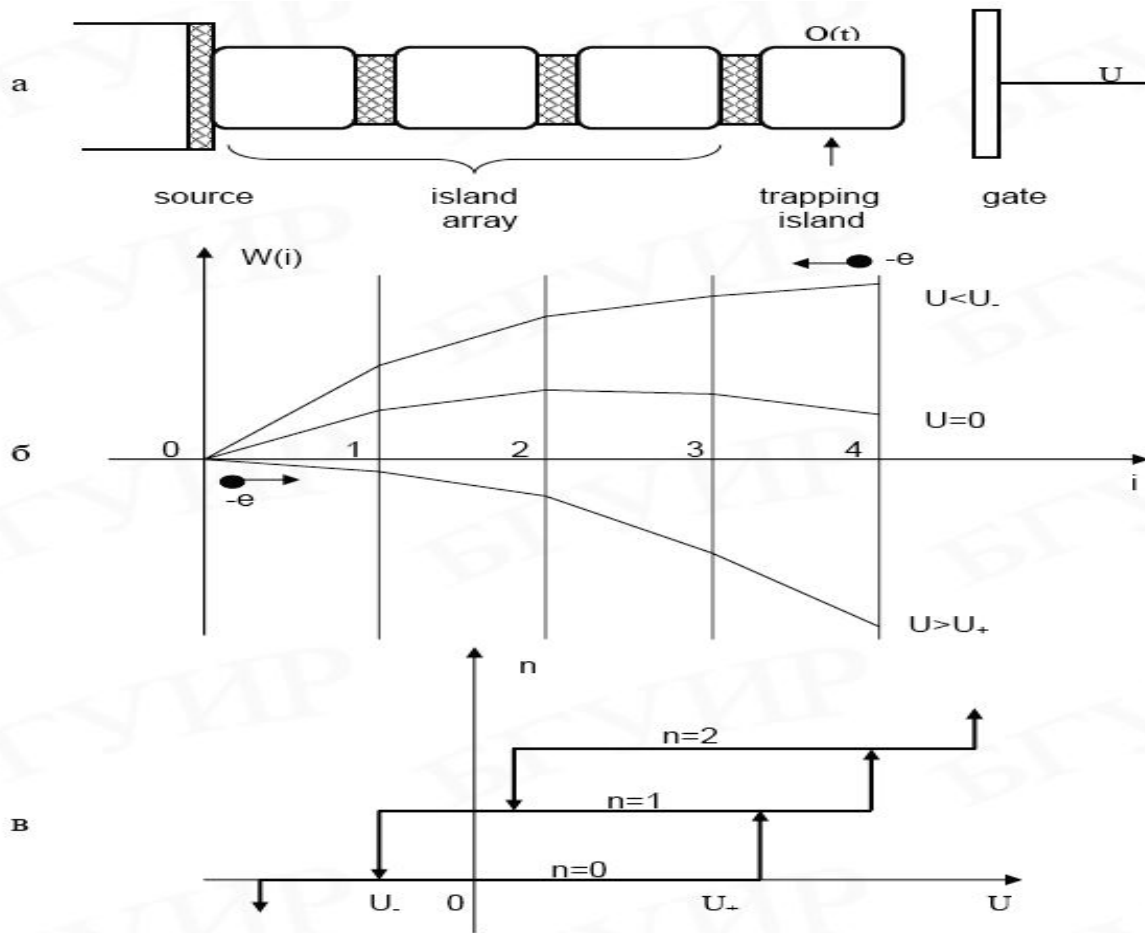


Рис.2.9. Схематическое изображение одноэлектронной ловушки (а), профили распределения энергии (б) и зарядовое состояние ловушки (в)

Одноэлектронный турникет, генератор накачки (single-electron pump)

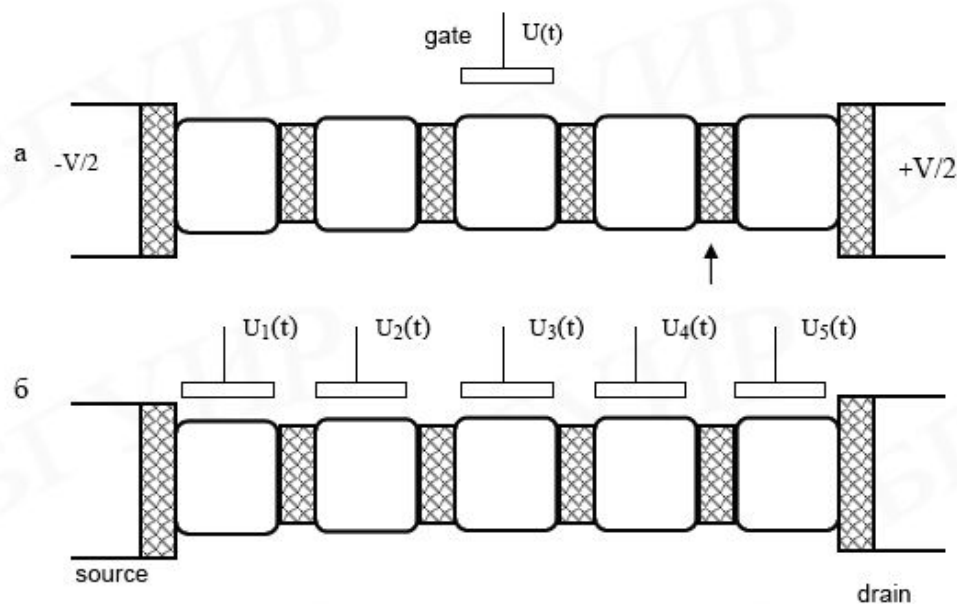
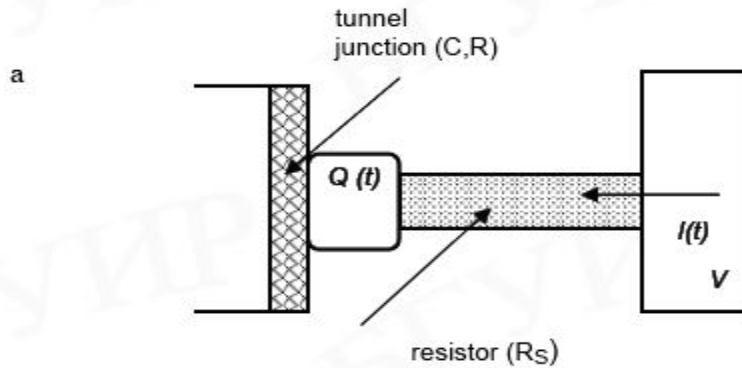
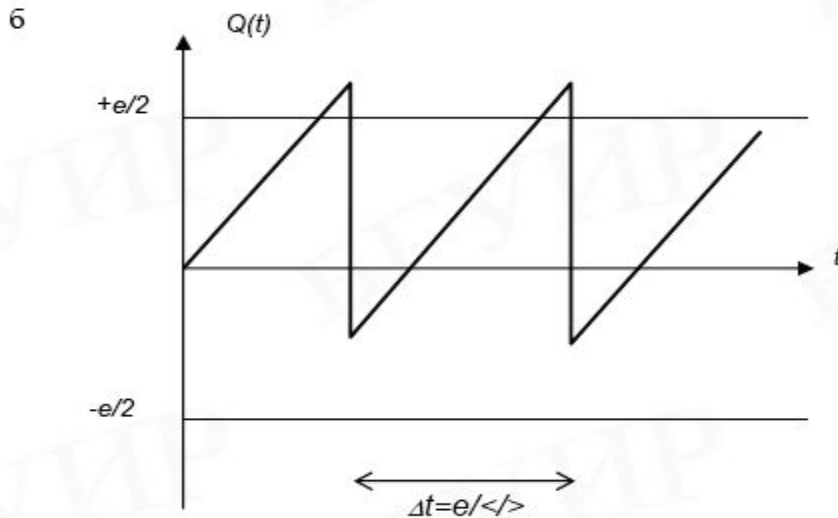


Рис. 2.10. Одноэлектронный турникет (а) и генератор накачки (б); ВЧ-сигналы, приложенные к затворам генератора накачки (в)

Стандарты постоянного струму (DC current standard)



$$I = enf$$



Уровень токов 10^{-12}
Частота внешнего генератора 10 МГц
Относительная погрешность не хуже 10^{-10}

Рис.2.11. Структура простейшего одноэлектронного генератора (а) и его динамические свойства (б)

Одноэлектронна логіка (single-electron parametron)

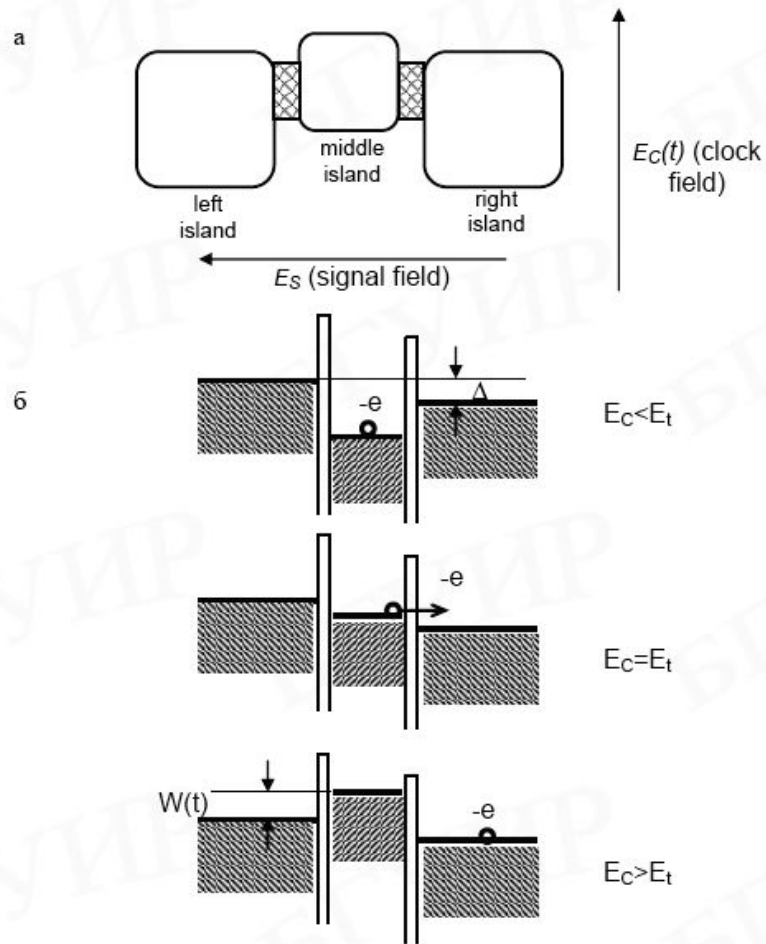
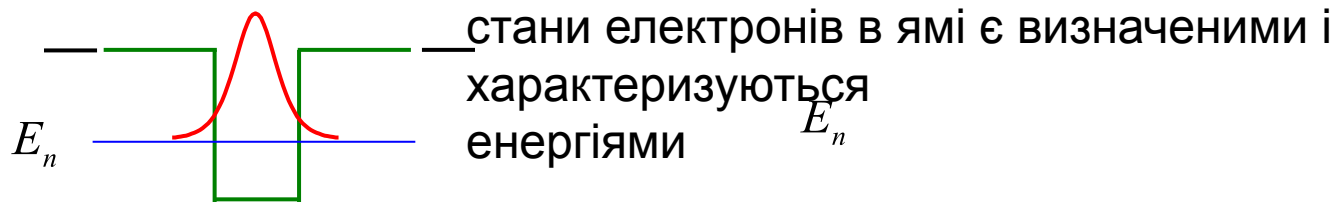


Рис.2.13. Принципиальная структура одноэлектронного параметрона (а) и потенциальные диаграммы электронных процессов в нем (б)

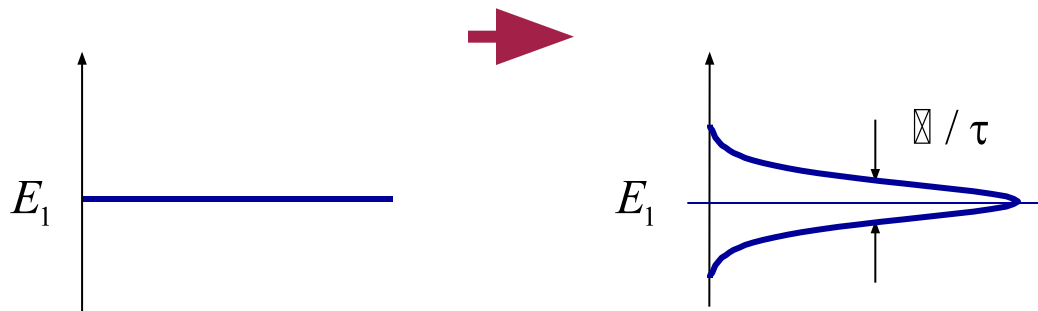
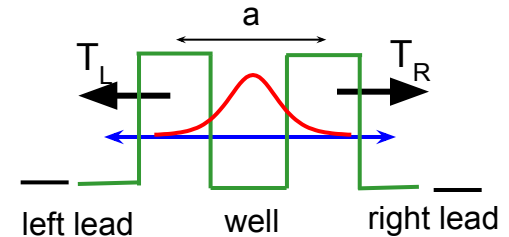
Тунельно-резонансна електроніка

Резонансне тунелювання

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



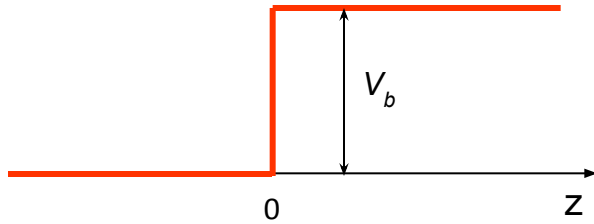
Коли бар'єри звужуються – маємо невизначені стани оскільки електрон може тунелювати через бар'єри і покинути яму



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



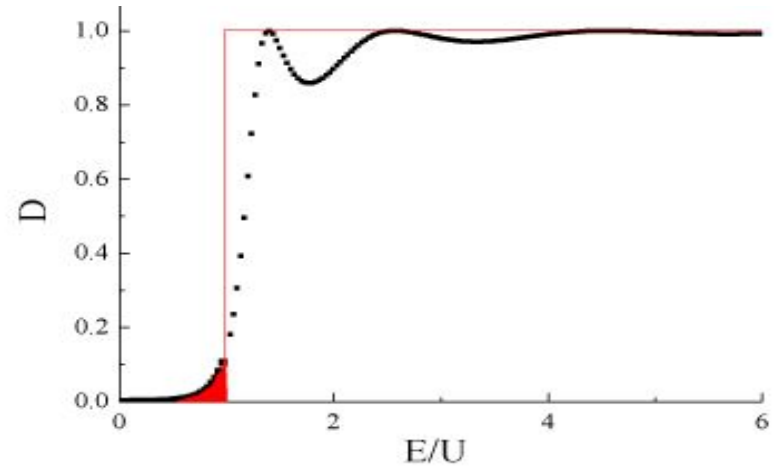
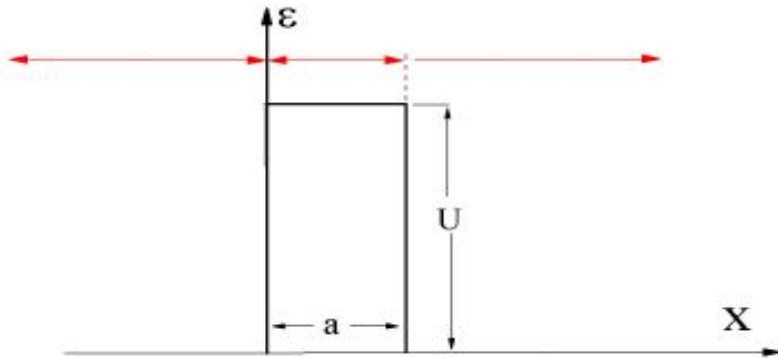
$$k = \sqrt{2m * E / \hbar^2} \quad , z \leq 0$$

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

- Хвильова функція частинки

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

Потенціальний бар'єр



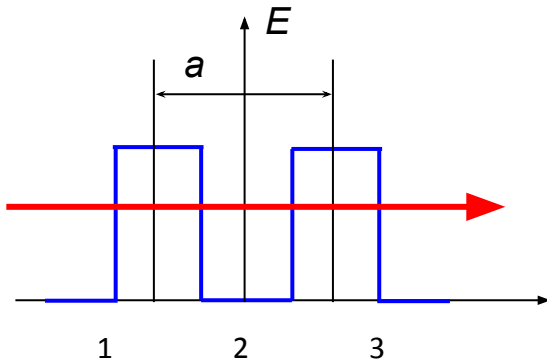
Аналогічно:

(задавши хвильові функції + граничні умови)

Отримаємо коефіцієнт пропускання

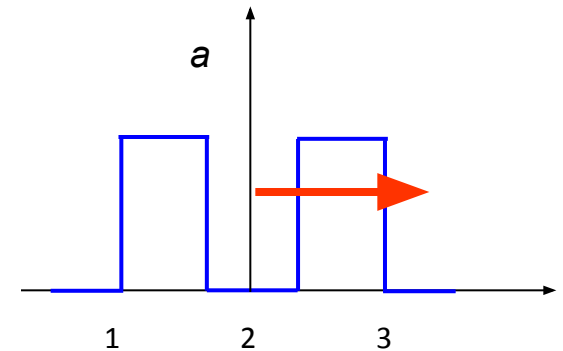
$$D = 4k^2k_1^2 \{ 4k^2k_1^2 + (k^2 - k_1^2)^2 \sin^2 k_1 a \}^{-1} = \{ 1 + U^2/4E(E-U) \sin^2 k_1 a \}^{-1}.$$

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



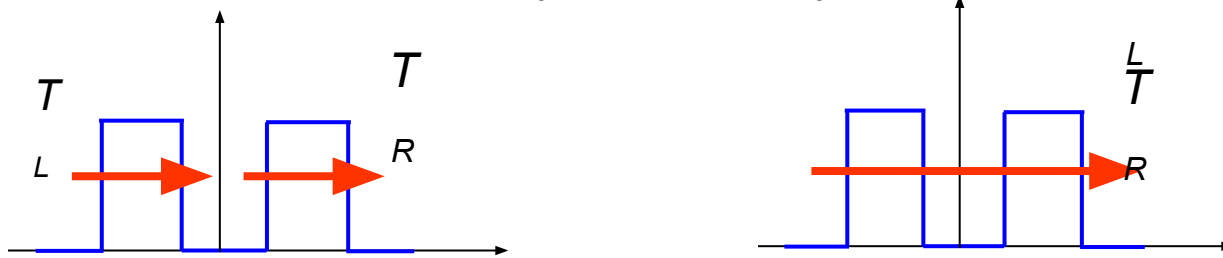
$$\mathbf{T}_R = \begin{pmatrix} 1/t_R^* & -r_R^*/t_R^* \\ -r_R/t_R & 1/t_R \end{pmatrix}$$

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

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

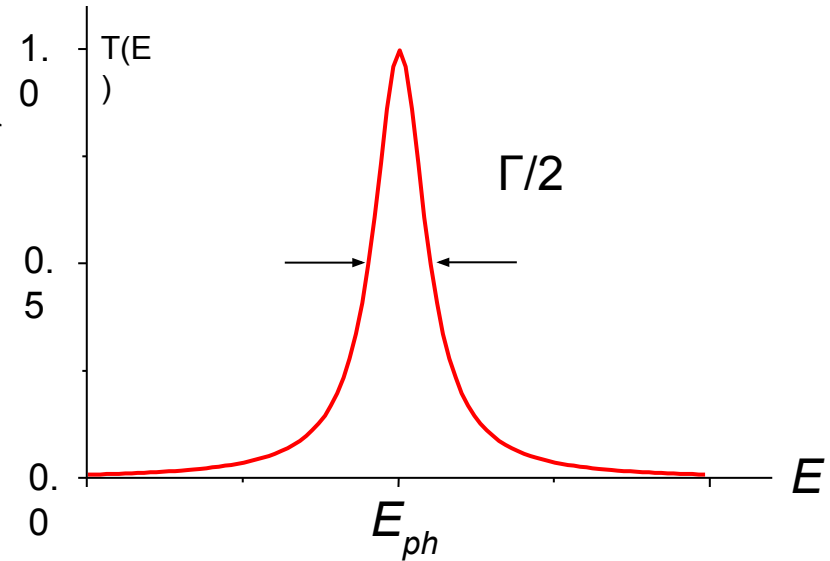
$$\varphi = 2ka + \rho_L + \rho_R$$

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

Залежність коефіцієнта тунелювання від енергії

$$T = \frac{T_L T_R}{(1 - \sqrt{R_R} \sqrt{R_L})^2 + 4\sqrt{R_R} \sqrt{R_L} \sin^2 \varphi / 2}$$

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



В умовах резонансного тунелювання коефіцієнт проходження

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

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

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

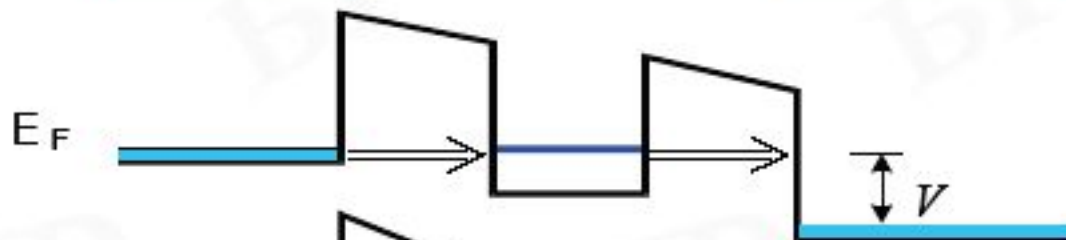
При резонансному тунелюванні через симетричну структуру, коли $T_L = T_R$, коефіцієнт проходження дорівнює одиниці.

Резонансне тунелювання

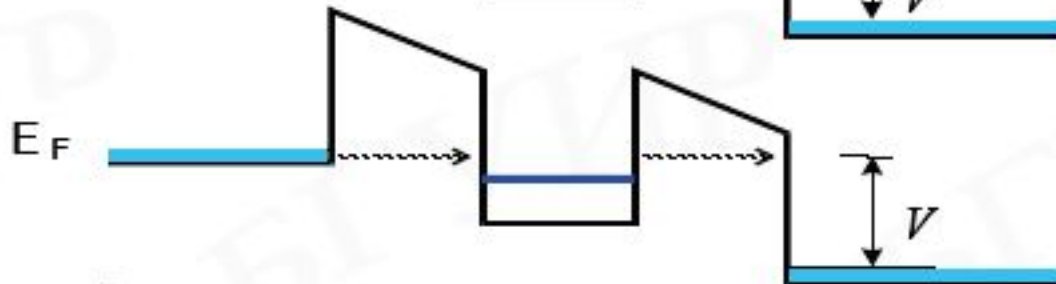
Класичний
випадок
тунелювання



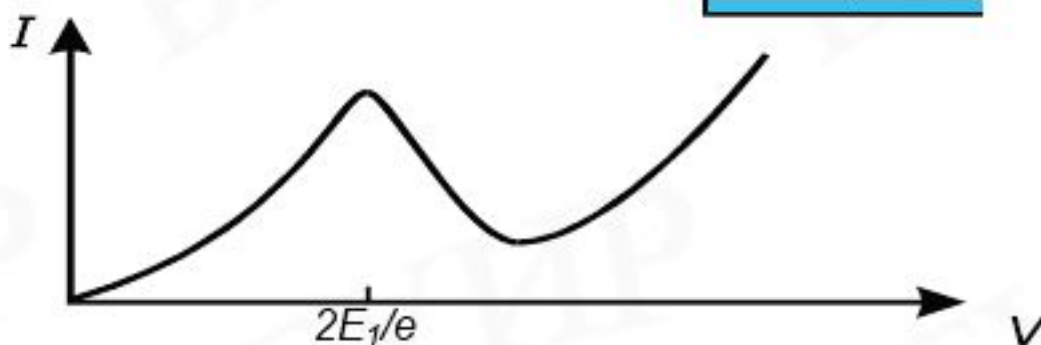
$$T_n(E_n) = T_{1n} T_{2n}$$



Резонансне
тунелювання



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



ДБРТ –структури

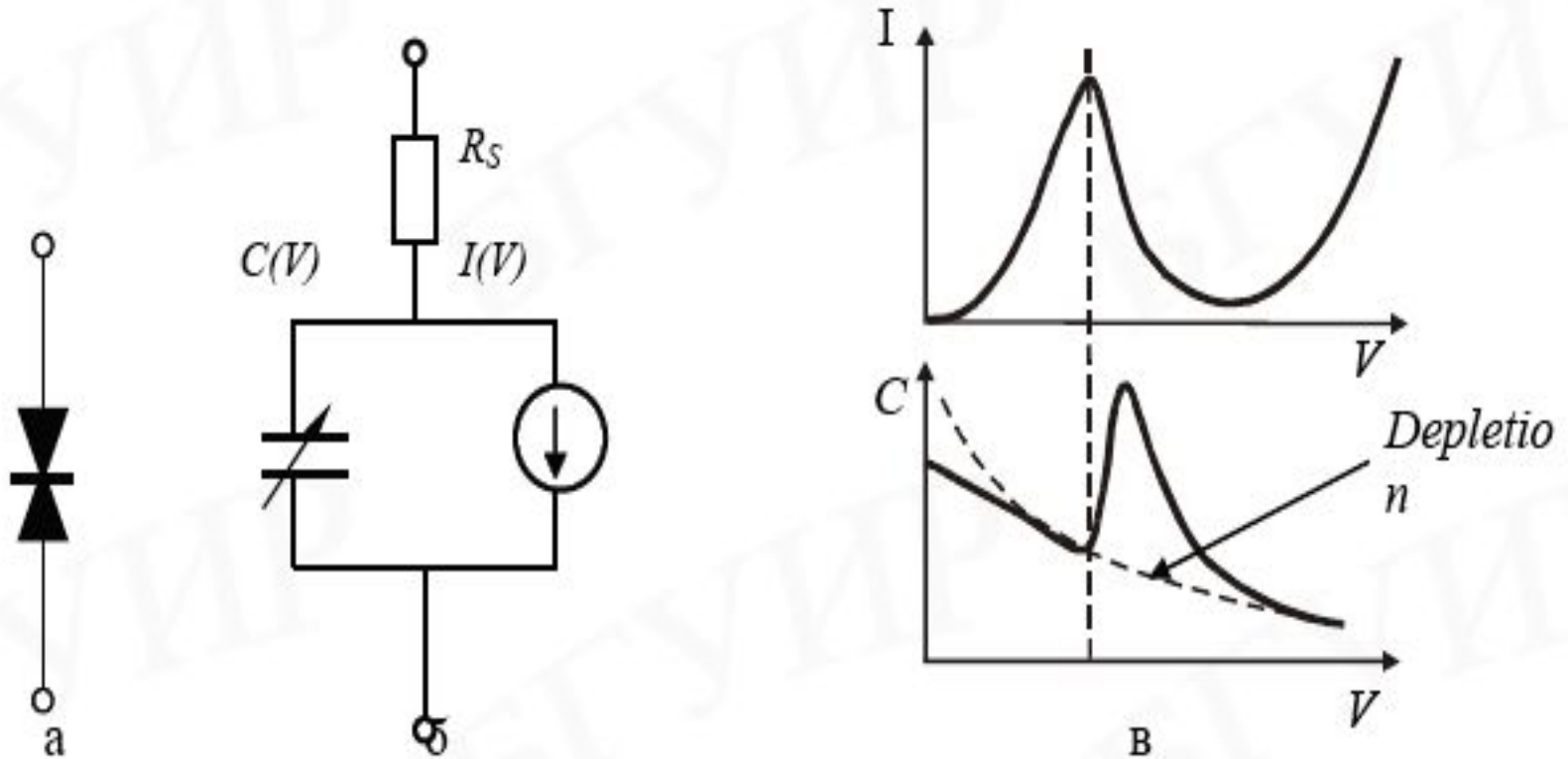
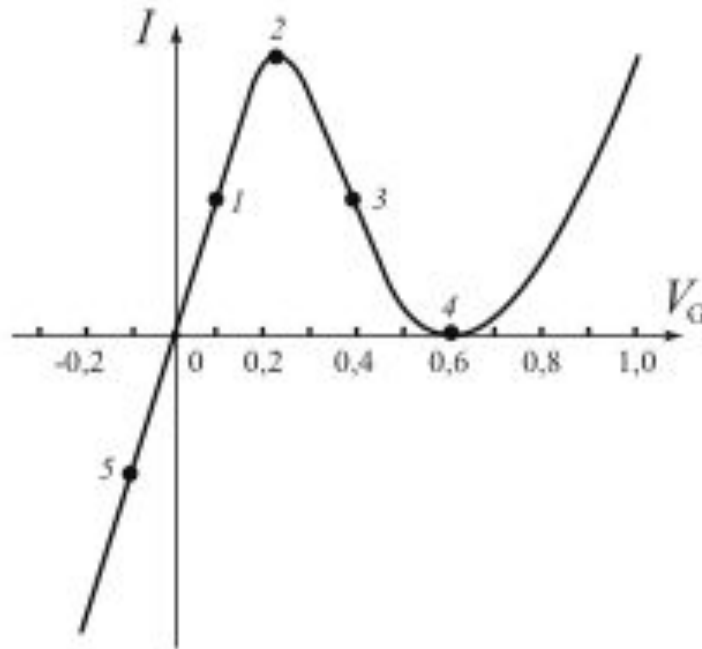
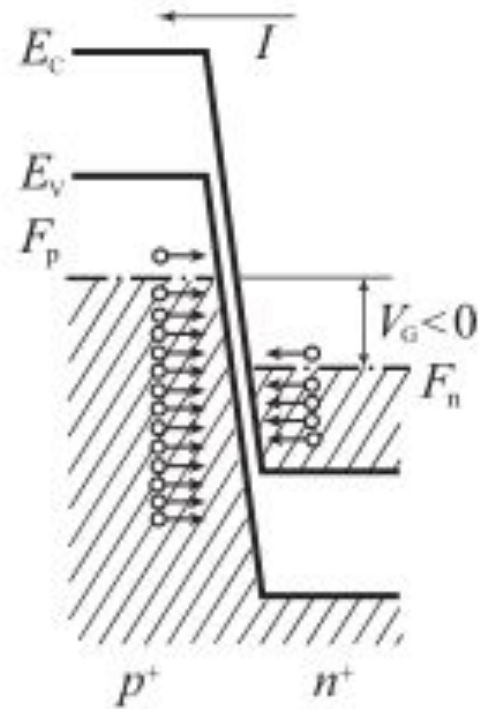


Рис. 2.15. Условное обозначение резонансно-туннельного диода (а), его эквивалентная схема (б), вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики (в)

Тунельний діод (діод Есакі)

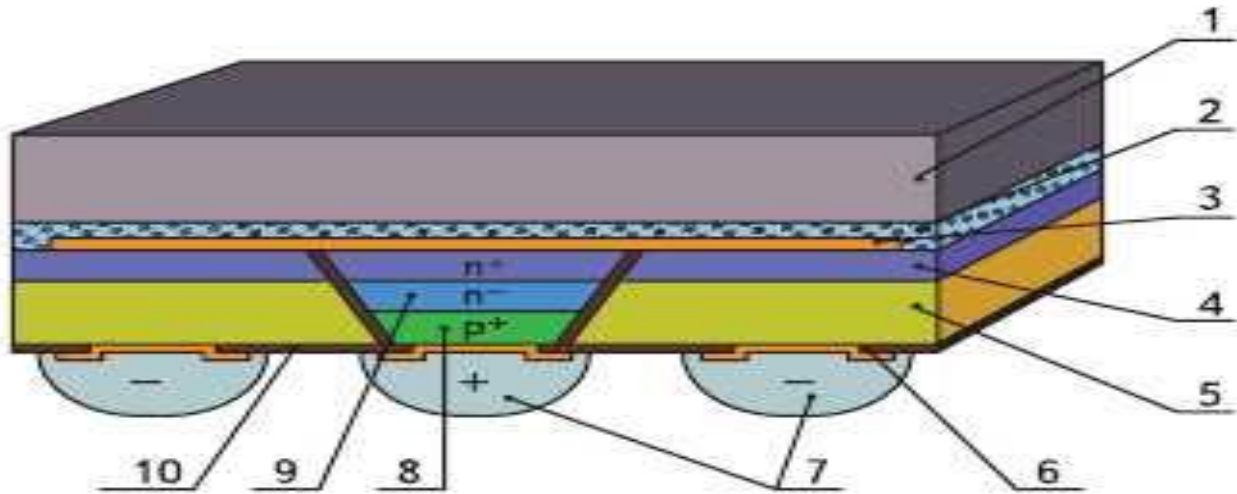


a



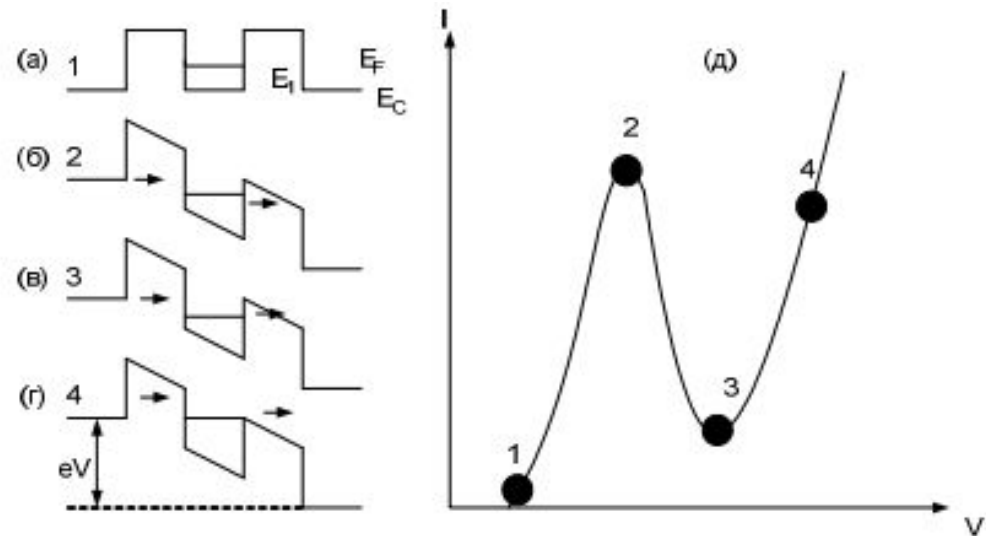
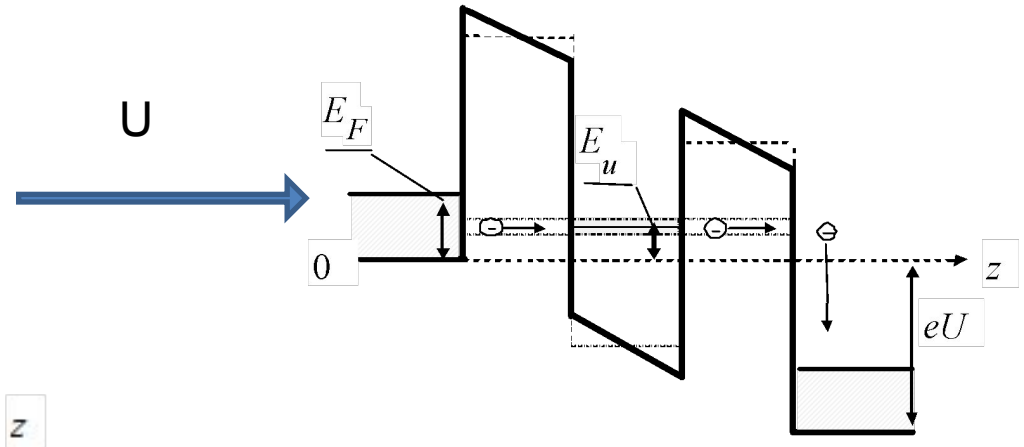
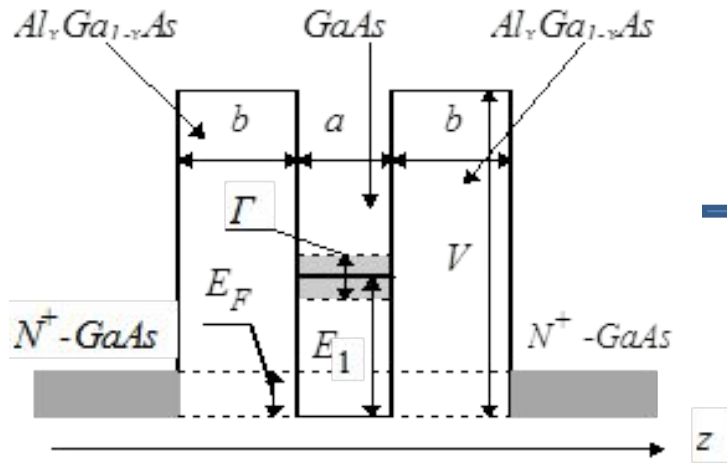
б

Діод



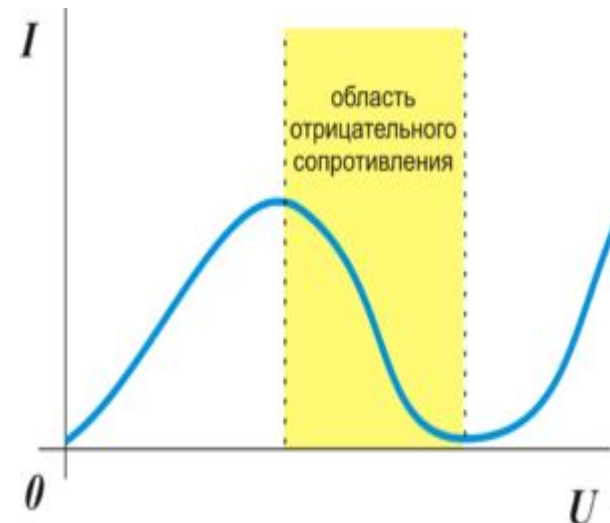
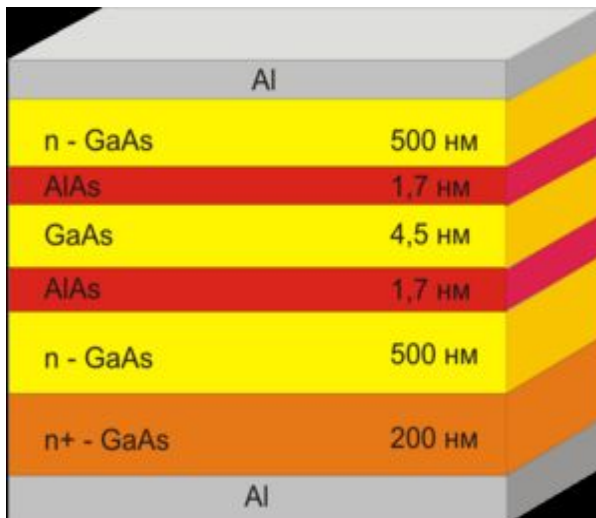
- Схематичний розрез діода в кремнієвому корпусі по розміру кристалла:
- 1 – кришка (Si); 2 – скло; 3 – алюміній (Al);
 - 4 – кремній n^+ ;
 - 5 – високолегірований полікремній;
 - 6 – алюміній (Al); 7 – припойні столбики;
 - 8 – кремній p^+ ; 9 – кремній n^- ;
 - 10 – окис кремнію SiO_2

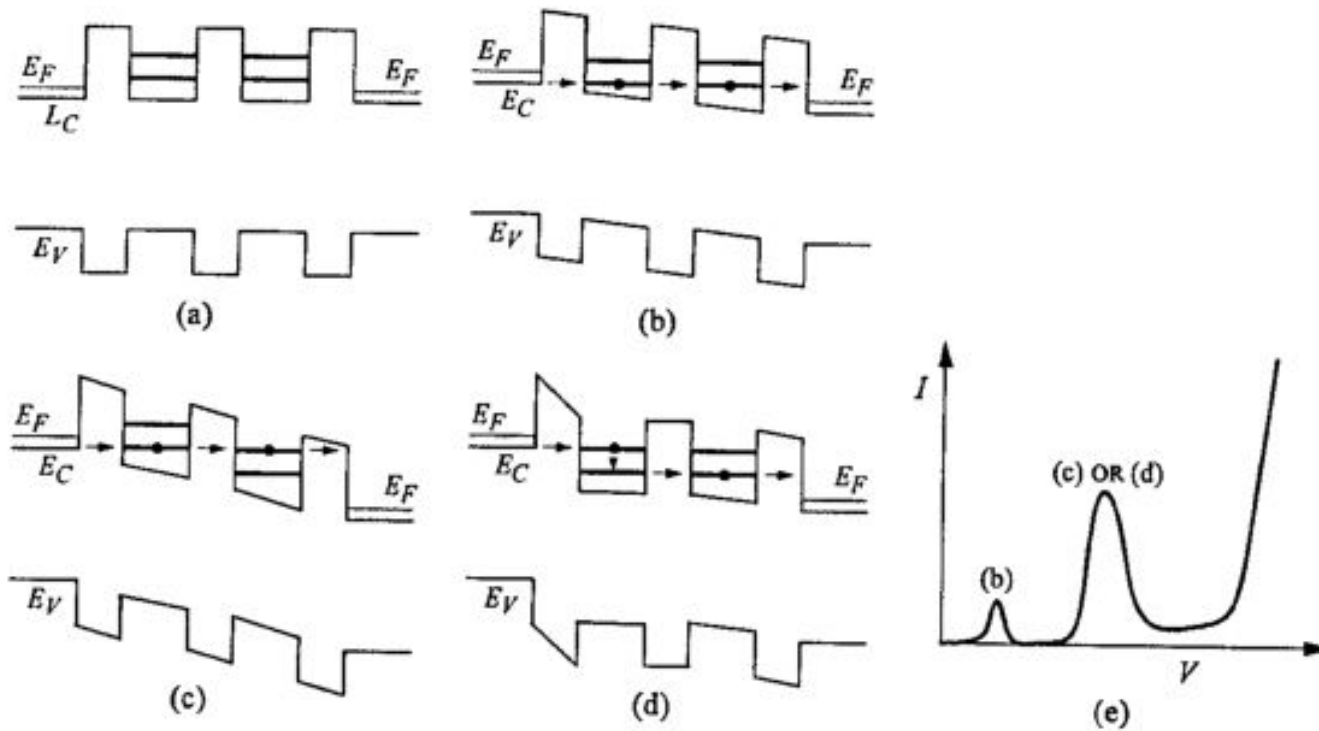
Резонансний тунельний діод



Резонансно - тунельний діод

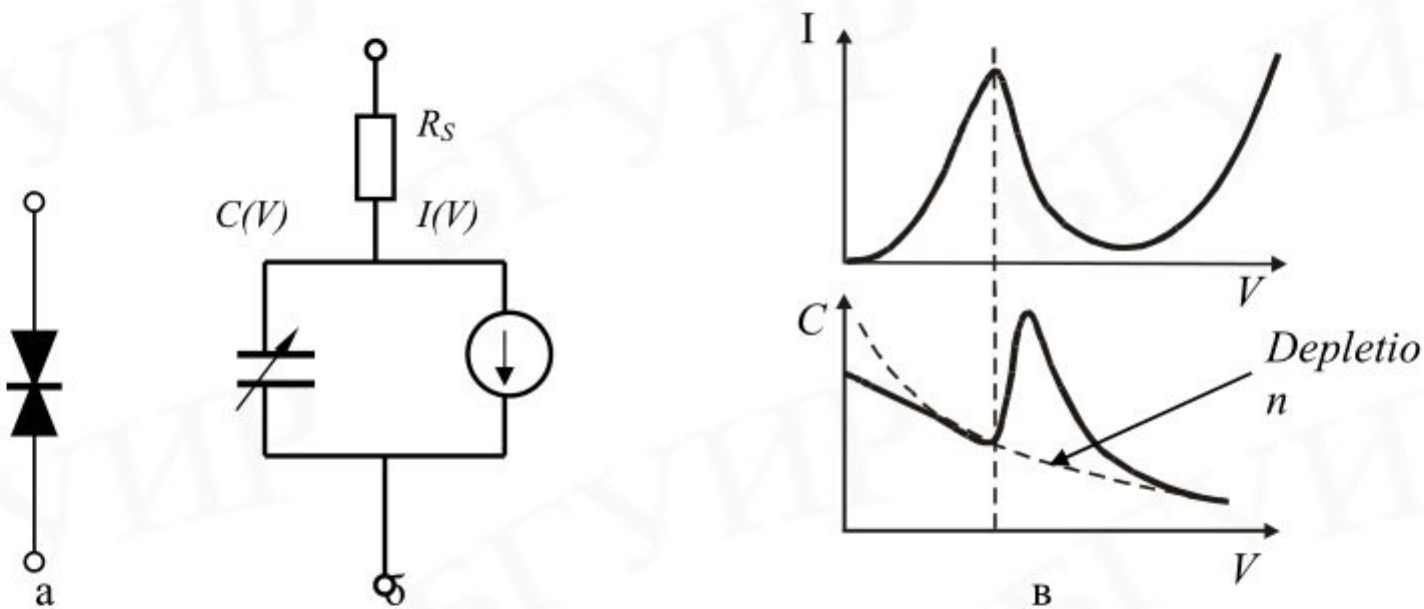
- $I = f(U)$, I – струм, U – прикладена напруга. Якщо прикладена напруга мала, та E електронів, що проходять через потенціальний бар'єр $< E$ дискретного рівня, то прозорість бар'єра і, струм, що протікає - малі. $I \rightarrow \max$ при напругах, коли E електронів = E дискретного рівня. При більш високих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

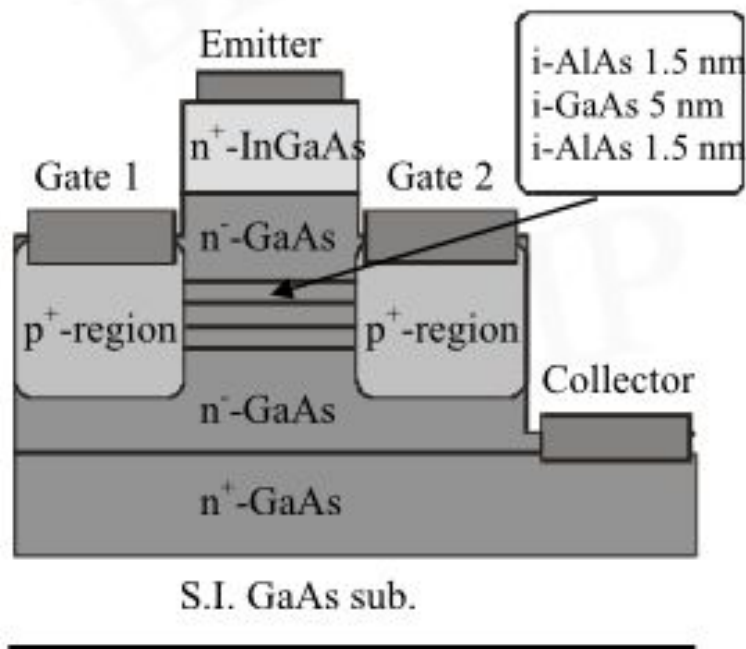


- Характерний час життя стабільного резонансного рівня в ямі $t \approx \frac{h}{\Gamma_0} \rightarrow$
теоретична границя швидкодії РТД $\sim 0,1$ пс

- 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

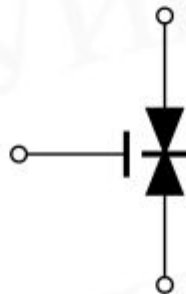
Емітерний струм керується р-п переходом (або Шотткі), що дозволяє регулювати резонансний струм.



Резонансно-тунельні транзистори

Додавши до РТД керуючий затвор отримаємо можливість керувати резонансним рівнем в ямі.

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

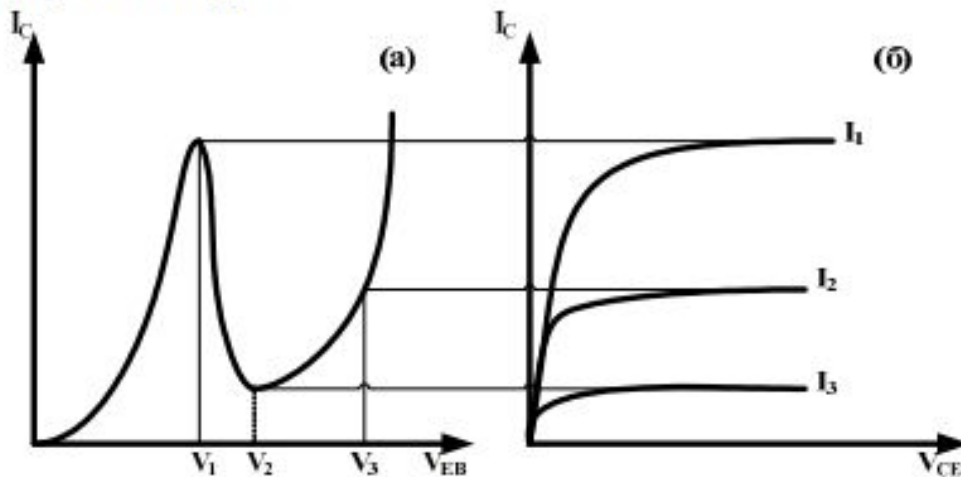
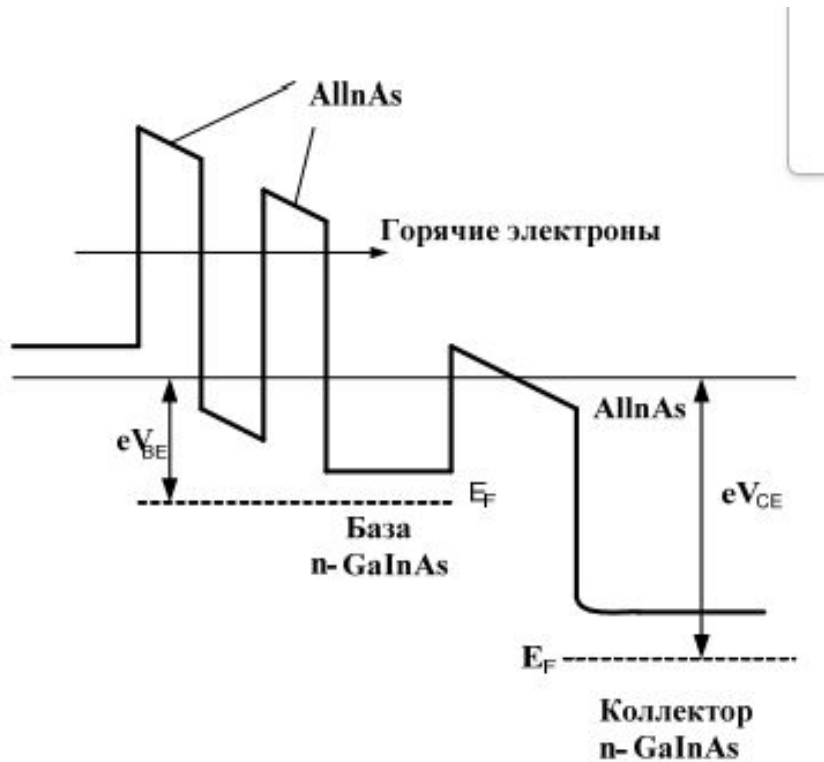


Рис. 8.8.

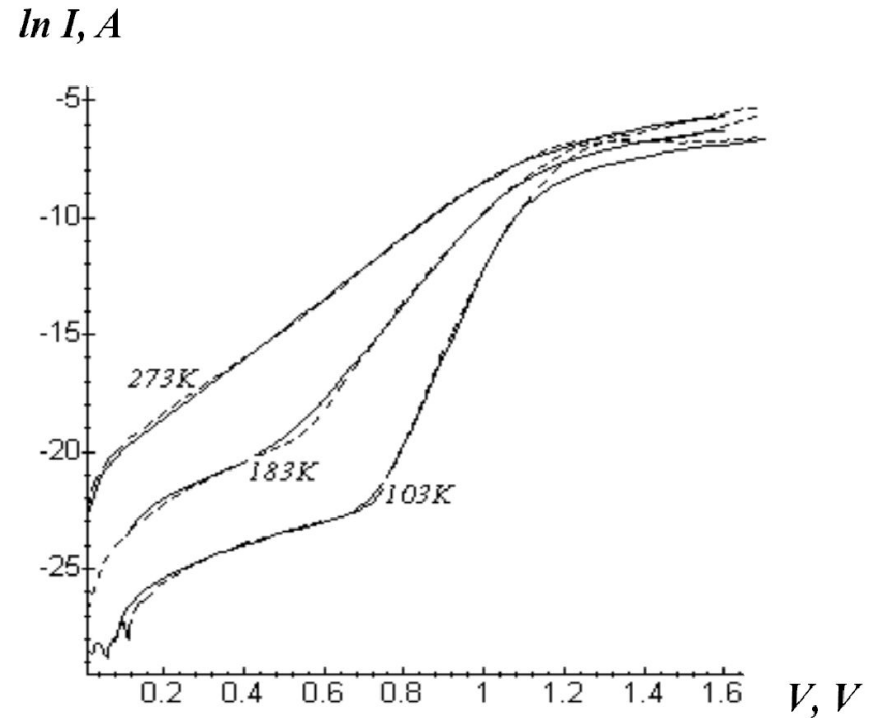
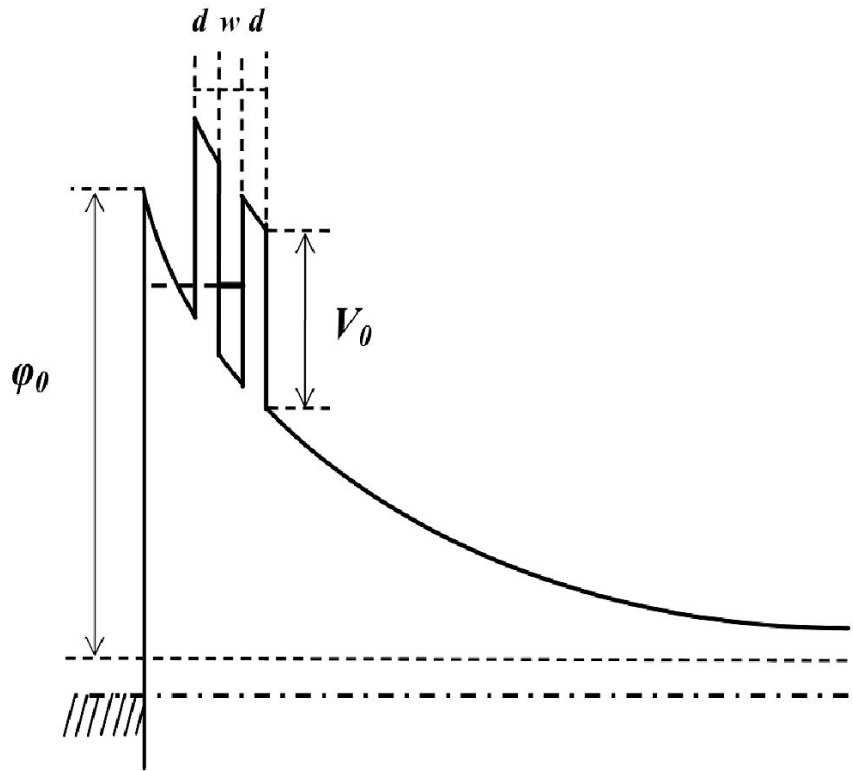
ВАХ Резонансно-тунельного біполярного транзистора

Транзистори на гарячих електронах з резонансним тунелюванням



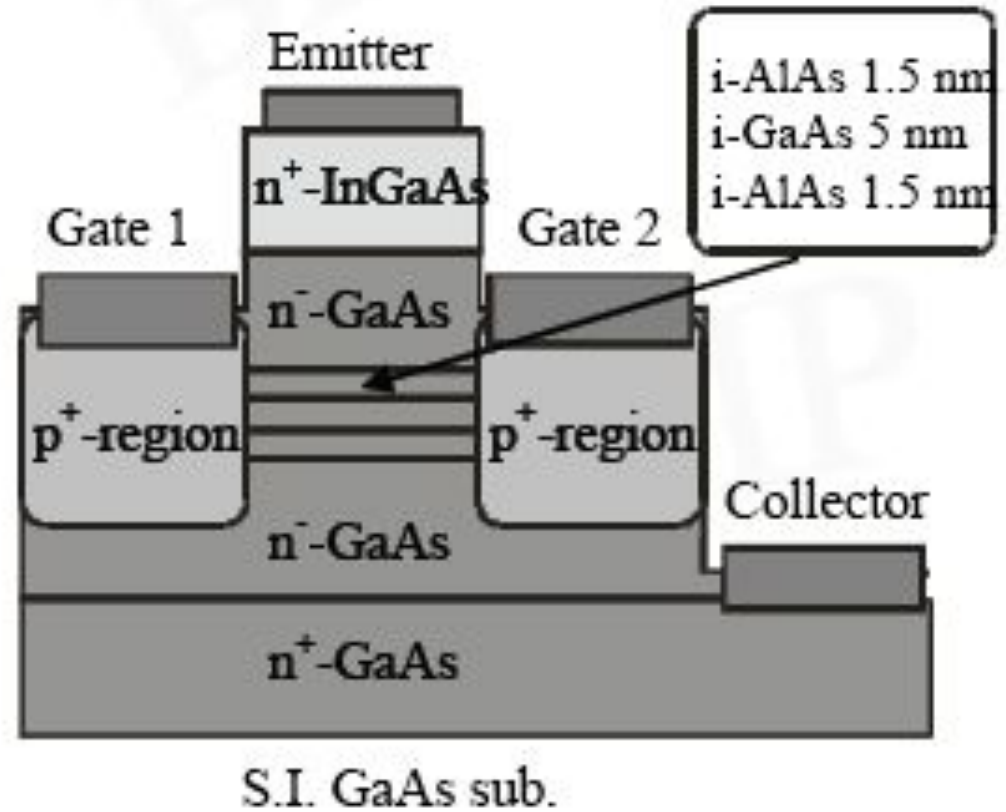
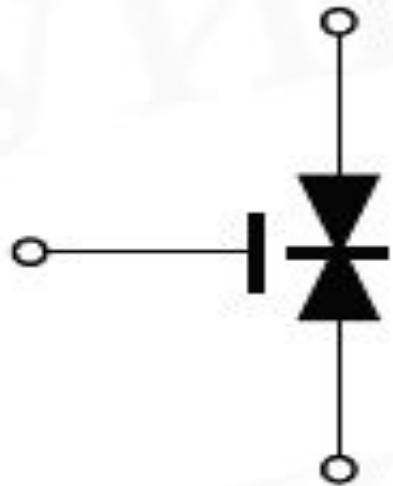
В області емітера розташована гетероструктура, що інжектуює великі струми при виконанні резонансної умови. Положення резонансного рівня регулюється базо-емітерною напругою.

ДБРТ структури з блокуючими бар'єрами та їх характеристики



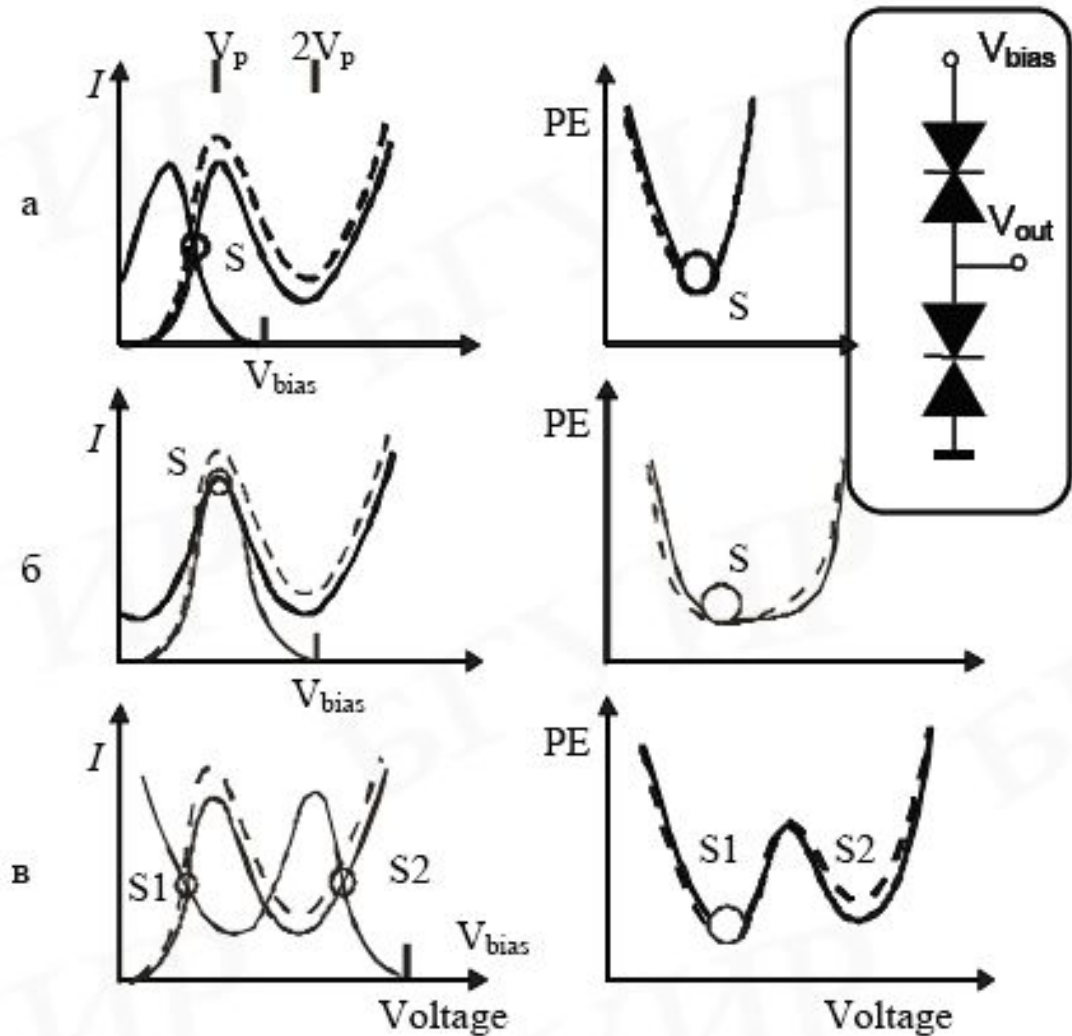
Структура розміщувалась на підкладинці (100) з досить товстим (300 нм) буферним шаром n-GaAs, концентрація домішки в якому була $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Потім інший шар n-GaAs високої якості товщиною 150 нм вирощувався на початку шару Шотткі при досить високій 540° C температурі осадження.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

Керований затвором резонансно-тунельний діод (GRTD)



Логічні елементи на тунельно-резонансних транзисторах

Monostable-bistable transition logic elements (MOBILES)



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 меншшумний ($\delta E \sim 10$ мкВ) потік високоенергетичних $E \sim 0,2 - 0,3$

