

# Наноелектроніка

Нагадування:

В квантовій ямі енергетичний спектр електронів твердого тіла змінюється, і утворюються

**підзони розмірного квантування.**

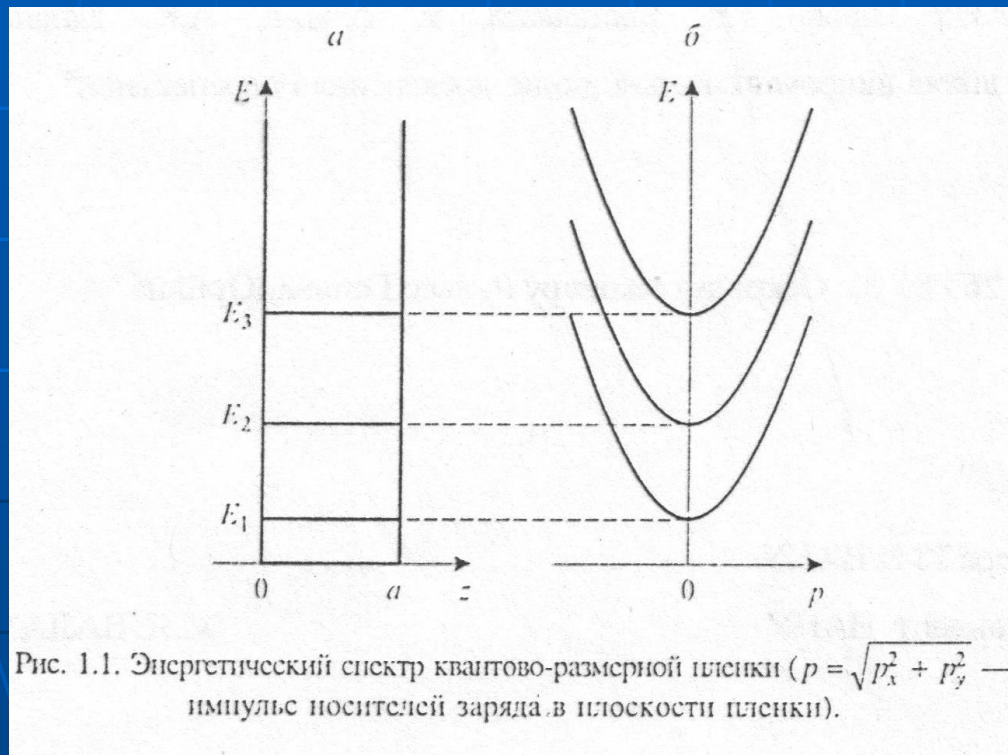


Рис. 1.1. Энергетический спектр квантово-размерной пленки ( $p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$  — импульс носителей заряда в плоскости пленки).

**Двовимірні, одновимірні  
та нуль-вимірні носії –  
класифікація**

# Двовимірні носії

Нехай всі електрони в системі мають  $E < E_2$ . Тоді ніякий пружний процес (напр., розсіяння на домішках, акустичних фононах і електронів один на одному) **не може змінити квантове число  $n$**  (це потребує затрат енергії).

→ Електрони можуть змінювати свій імпульс **лише в площині  $xu$**  → електрони поведуться як суто **двовимірні частинки**.

# Одновимірні носії

Рух носіїв може бути обмежений не в одному, а в двох напрямках.

Приклад - надтонкі дротинки або нитки.

У цьому випадку носії можуть вільно рухатися **лише в одному напрямку** (нехай це вісь  $x$ ).



Тоді в площині  $yz$  енергія квантується і набуває дискретних значень  $E_{mn}$ .

Повний спектр є дискретно-неперервним (лише з одним неперервним ступенем вільності):

$$E = E_{mn} + \frac{p_x^2}{2m}$$

Цей спектр - система одновимірних підзон розмірного квантування.

Носії з таким спектром називаються **одновимірними**, а системи - одновимірними електронними структурами або **квантовими нитками**.

# Нуль-вимірні носії

Системи, в яких рух носіїв обмежений у всієї 3-х напрямках нагадують штучні атоми.

Енергетичний спектр уже не має неперервної компоненти, тобто складається не з підзон, а з дискретних рівнів  $E_{lmn}$ .

Це - нуль-вимірні системи або квантові точки.

# 1. Структури з двовимірним електронним газом

Спостереження двовимірного електронного газу можливе в:

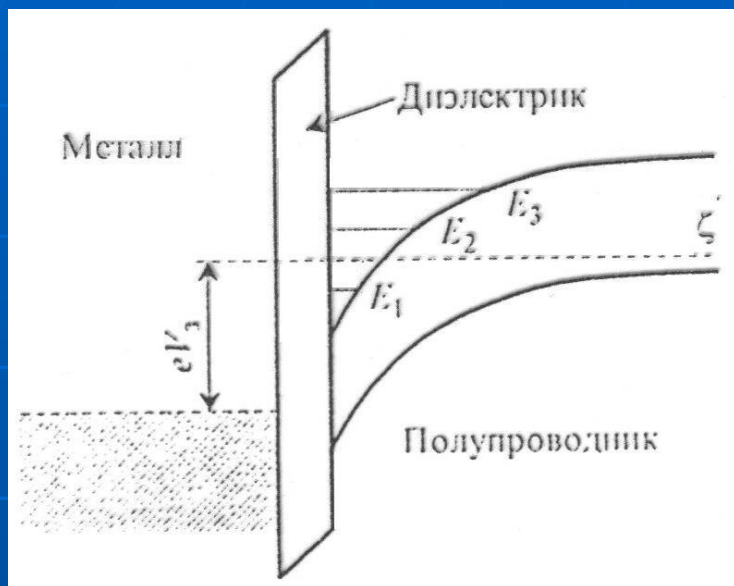
1. тонких плівках,
2. МДН - структурах,
3. квантових гетероструктурах.

Квантові розмірні ефекти були вперше спостережені в плівках Ві - **дуже високоякісних**.

Увага! - з інших матеріалів важко отримати плівки такої якості: висока густина поверхневих станів → сильне розсіяння носіїв → тепер основним об'єктом досліджень є 2) і 3).



# МДН - структури



Енергетична діаграма  
МДН-структури

У напівпровіднику утворюється вигин зон. Біля межі з діелектриком утворюється тонкий інверсійний шар (містить носії протилежного знаку до власних носіїв).

# Контакт метал-напівпровідник.

## Бар'єр Шотткі (нагадування)

Блокуючий контакт метал - напівпровідник (бар'єр Шотткі) утворюється, коли термодинамічна робота виходу з напівпровідника  $\Phi_{\text{н/п}}$  не рівна роботі виходу з металу  $\Phi_{\text{М}}$



Струм термоелектронної емісії з поверхні напівпровідника буде більший (або менший), ніж струм термоелектронної емісії з поверхні металу.



Конкретизуємо: напівпровідник ***n*-типу** → повинно бути

$$\Phi_M > \Phi_{\text{н/п}}$$

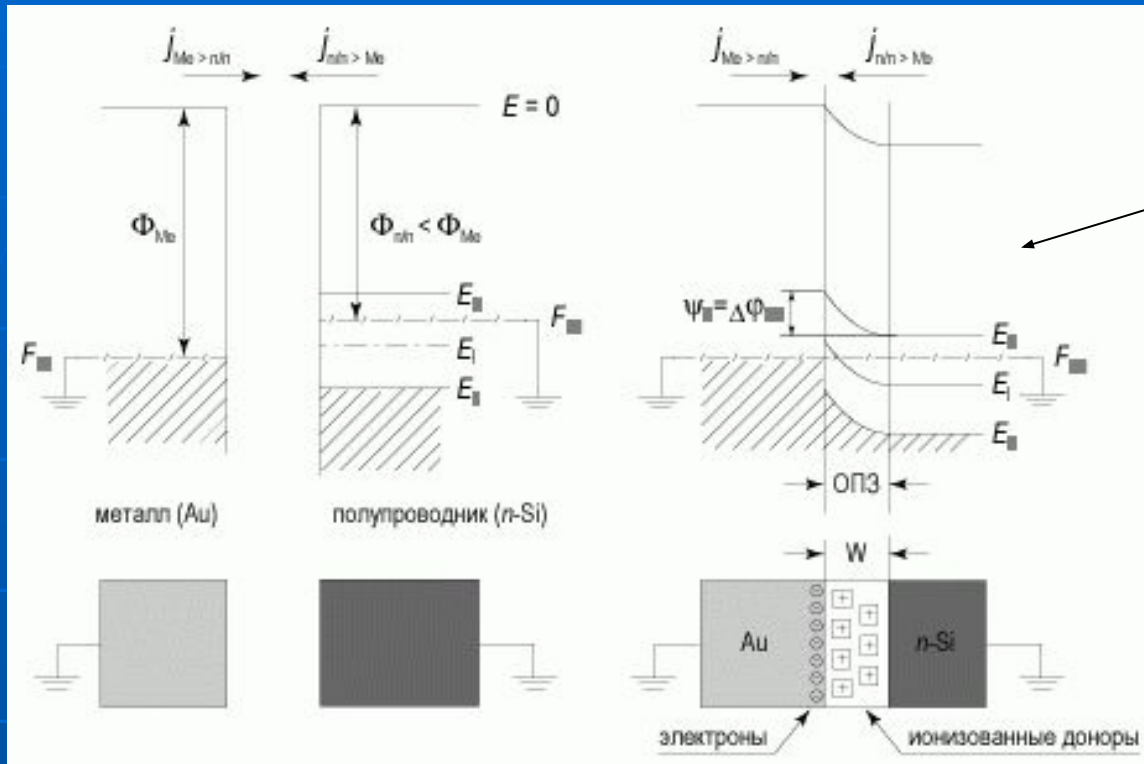
При контакті таких матеріалів у початковий момент **струм із напівпровідника в метал** буде перевищувати зворотній струм із металу в напівпровідник



В приповерхневих областях напівпровідника та металу будуть накопичуватися об'ємні заряди – від'ємні в металі і додатні у напівпровіднику.



В області контакту виникне ел.поле, в результаті чого утвориться вигин енергетичних зон.



*n-тип*

*Зонна діаграма, яка ілюструє утворення бар'єру Шотткі*

*Приповерхнева область напівпровідника збіднена основними носіями → в області контакту зі сторони напівпровідника формується область просторового заряду йонізованих донорів*

# Гетероструктури

Основною перевагою гетероструктур є висока якість гетерограниці:

густина поверхневих станів  $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$  (на кілька порядків менше, ніж в МДН-структурах)  $\Rightarrow$

дуже висока рухливість носіїв, до  $10^7 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  (в МДН-структурах - до  $5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ )  $\Rightarrow$

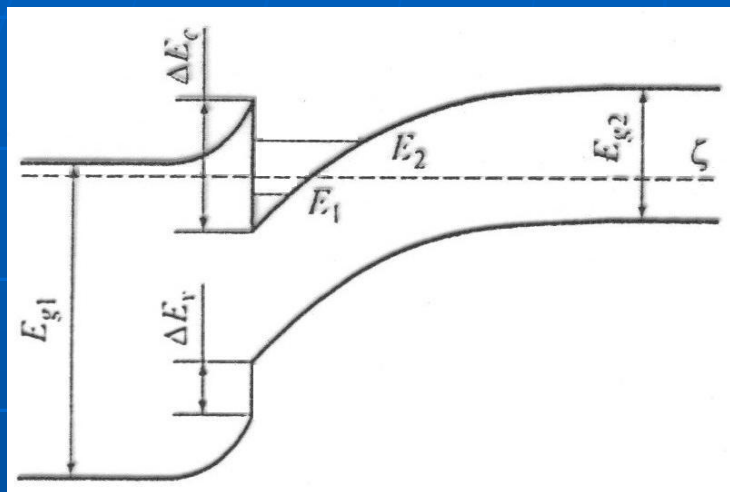
уширення рівнів незначне  $\Rightarrow$

можна спостерігати тонкі ефекти.

Для досягнення такої якості необхідно підбирати речовини з близькими значеннями постійних ґратки.

## Приклад 1:

гетероструктура утворена контактом широкозонного та вузькозонного напівпровідників



Зонна діаграма окремого гетеропереходу

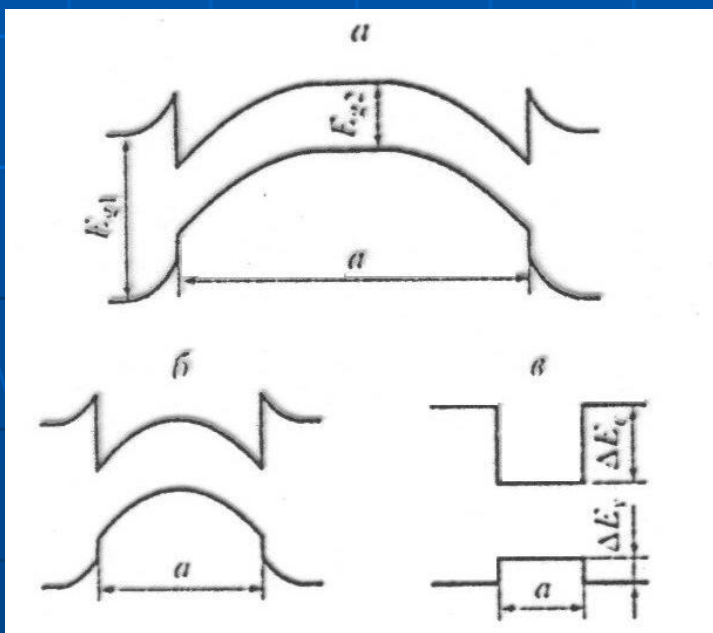
Потенціальна яма утворена розривом зон  $\Delta E_c$  з одного боку та електростатичним полем переходу з іншого боку.

Це - аналог інверсійного шару МДН-структури, оскільки відбувається квантування лише одного типу носіїв.

## Приклад 2.

Гетероструктура являє собою тонкий шар вузькозонного напівпровідника між двома шарами широкозонного.

Якщо ширина вузькозонного шару набагато менша від довжини екранування, то вигини зон за рахунок об'ємного заряду в напівпровідниках незначні  $\rightarrow$



потенціальна яма прямокутна

Зонна діаграма подвійної гетероструктури

Зонна діаграма системи з  
багатократними квантовими ямами  
(Multiple quantum wells)



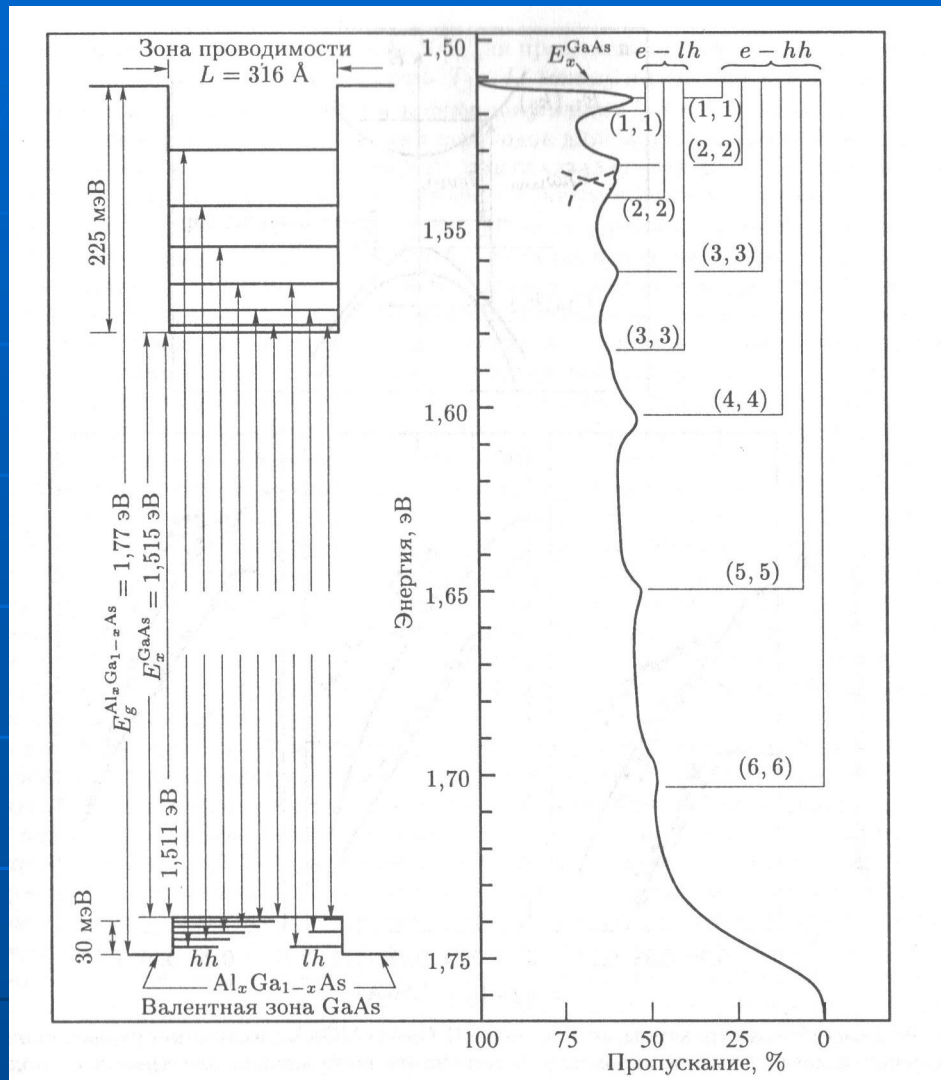


Рис. 9.11. Зависимость спектра пропускания МКЯ  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ ,  $316\text{\AA}$  от энергии фотонов при низкой температуре (справа). Пики, обозначенные  $(n, n)$ , идентифицированы как оптические переходы из подзон тяжелых ( $hh$ ) и легких ( $lh$ ) дырок с номером  $n$  в  $n$ -подзоны проводимости. Они обозначены стрелками на зонной диаграмме (слева) [9.27]. Значение разрыва зон, использованное Динглом для этих расчетов, с тех пор подверглось ревизии [9.28]

# Дельта-шари

Це напівпровідники з сильно неоднорідним профілем легування - домішки розташовані в тонкому шарі шириною в один чи кілька періодів ґратки.

Носії, що утворюються при іонізації домішок, утримуються поблизу площини шару зарядом домішок

⇒

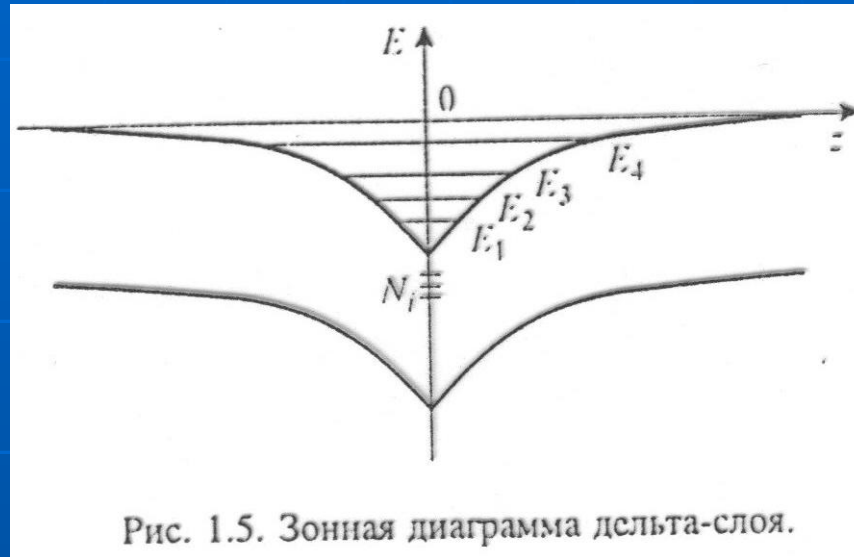
електричне поле шару іонів екранується зарядом носіїв

⇒

результуюча потенціальна яма має вигляд «галочки»

⇒

відбувається квантування енергії в майже «трикутній» ямі.



Характерна риса дельта-шарів - можливість отримати високі концентрації розмірно-квантованих носіїв (до  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ ).

Але! - рухливість відносно мала. Чому? - розсіяння на великій кількості домішкових іонів.

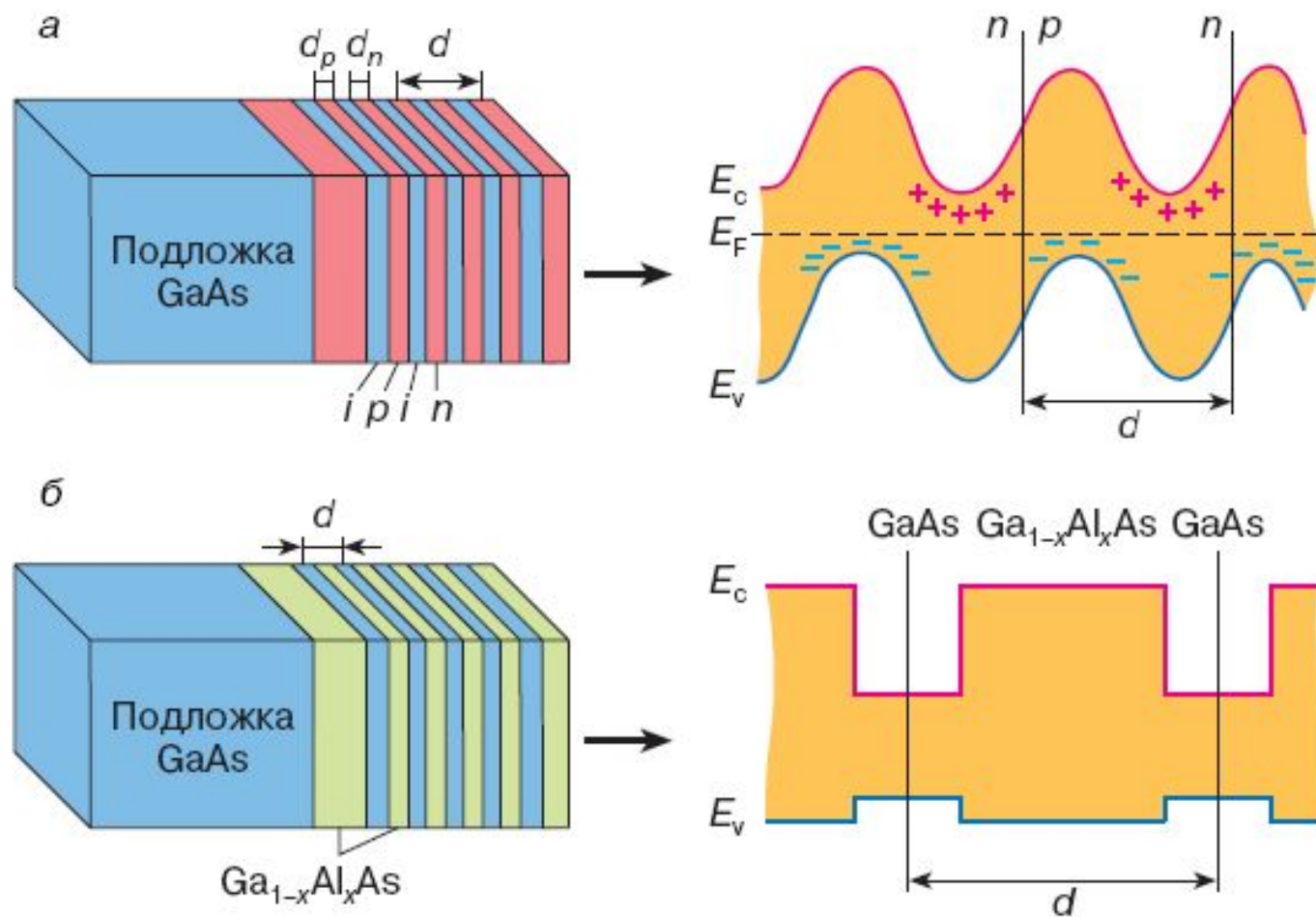
# Структури з вертикальним переносом

Якщо квантово-розмірні структури - напр., шари, нитки або точки - розташовані близько одна до одної, то носії заряду можуть тунелювати між ними.

Система квантових ям з вузькими ( $\sim$  кількох нм) широкозонними шарами.

Ями можуть обмінюватися електронами за рахунок тунелювання.

Якщо ям багато - маємо штучну періодичну структуру, або **надгратку**.



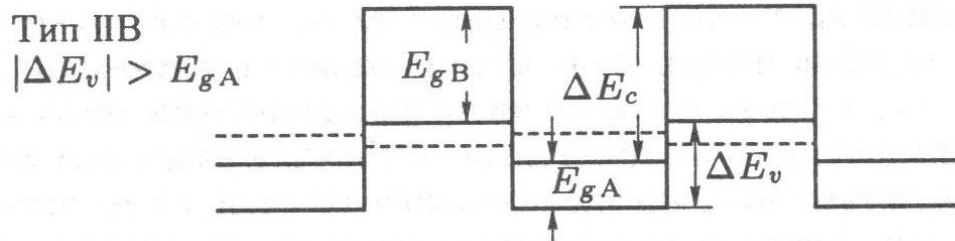
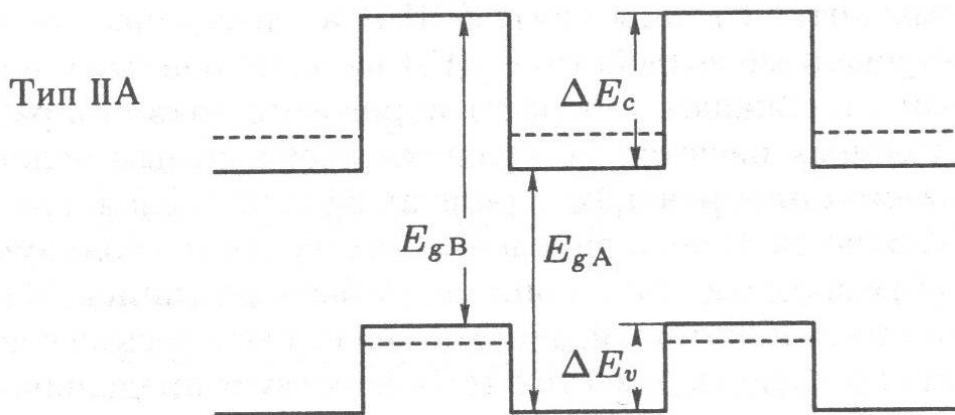
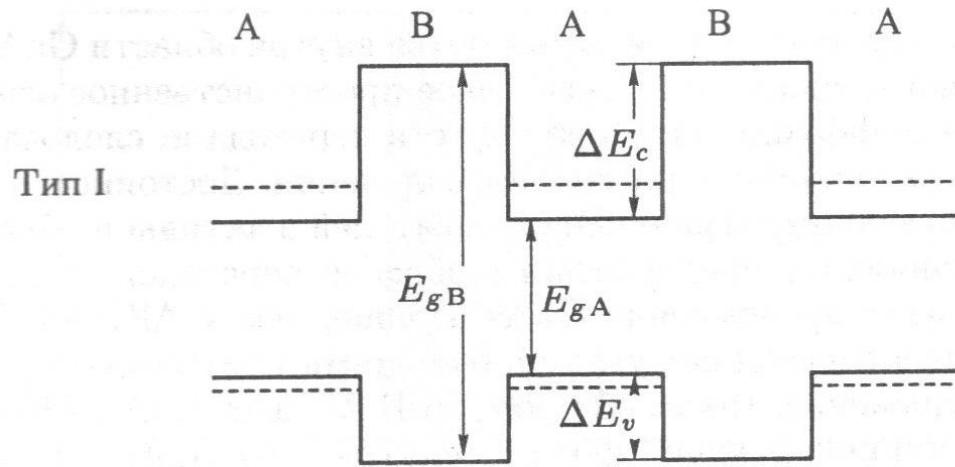
**Рис. 2.** Вид и пространственный ход краев энергетических зон вдоль оси роста (показана стрелкой) сверхрешеток на структуре GaAs– $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  с периодом  $d$ , имеющей толщины слоев  $d_i$ ,  $d_n$ ,  $d_p$ , с концентрациями носителей тока  $n_i$ ,  $n_n$ ,  $n_p$  соответственно: *а* – легированная сверхрешетка, *б* – композиционная сверхрешетка.  $E_v$ ,  $E_c$  – энергетические уровни зон валентной и проводимости соответственно,  $E_F$  – уровень Ферми

На електрони і дірки в надгратці діє додатковий прямокутний **періодичний** потенціал  $\Rightarrow$

як і в кристалічній гратці, рух електрона в надгратці можна охарактеризувати квазіімпульсом  $p(z)$   $\Rightarrow$

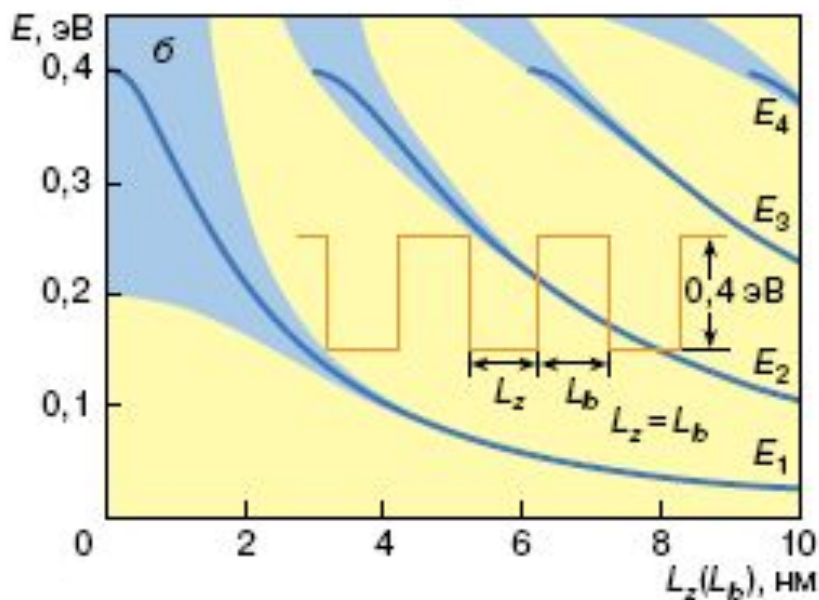
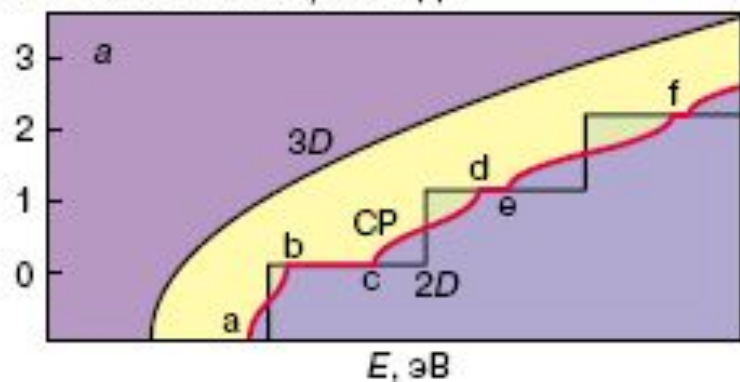
енергія є періодичною функцією  $p(z)$  з періодом  $\Rightarrow$



енергетичний спектр являє собою чергування дозволених і заборонених зон - **мінізон**.





Плотность состояний, отн. ед.



-  Зоны разрешенных состояний сверхрешетки (мини-зоны)
-  Дискретные уровни одиночной квантовой ямы

**Рис. 2.** Изменения плотности состояний (а) и энергетического спектра (б) квази-2D-гетеросистемы при одновременном уменьшении значений ширины ям и барьеров. Обозначения 3D и 2D относятся к трехмерной и двумерной плотностям состояний. Красная кривая – плотность состояний сверхрешетки (CP); ab, cd, ef – нижняя и верхняя границы первой, второй и третьей разрешенных мини-зон соответственно