

Наноелектроніка

Нагадування:

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

підзони розмірного квантування.

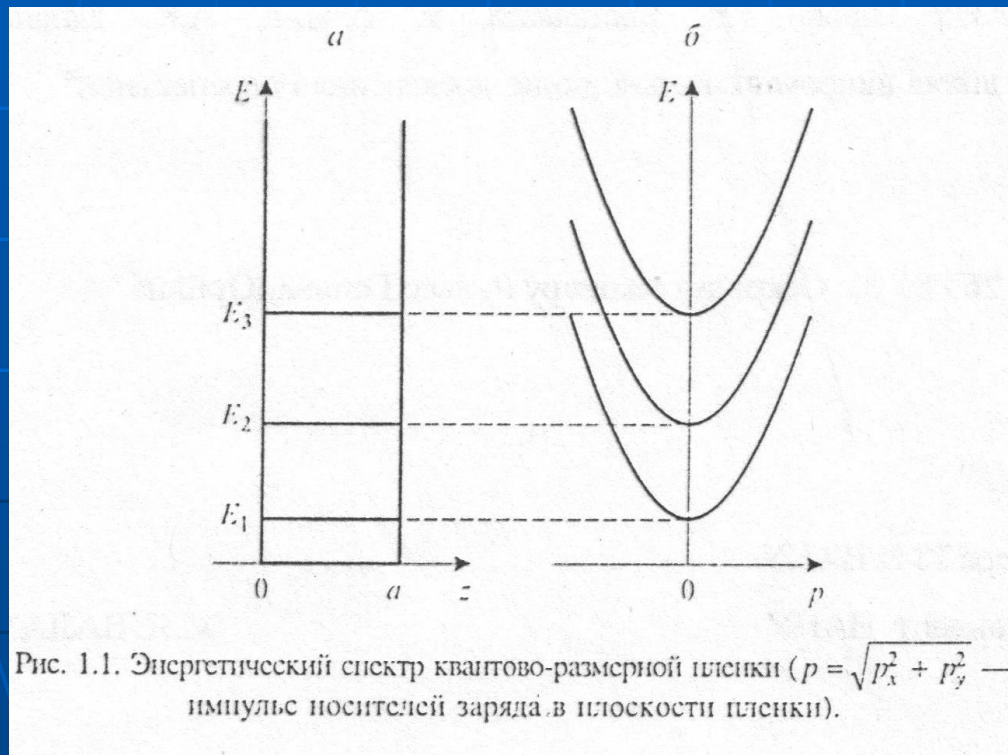


Рис. 1.1. Энергетический спектр квантово-размерной пленки ($p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ — импульс носителей заряда в плоскости пленки).

**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 всії 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

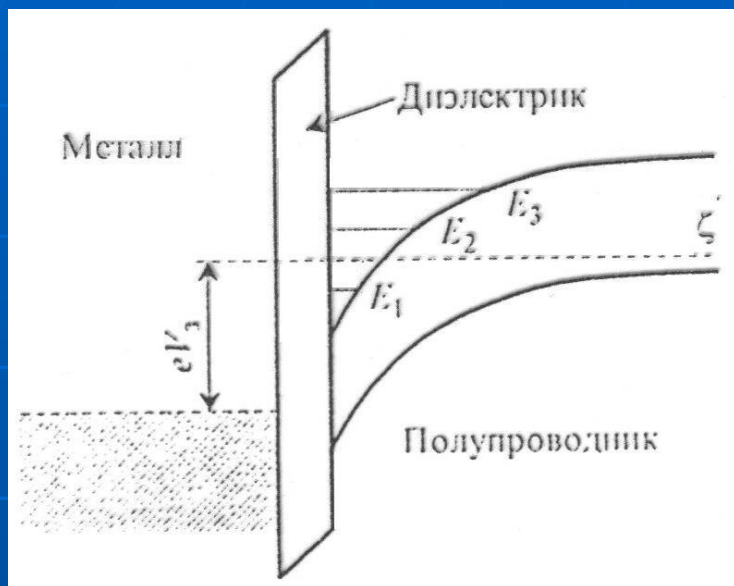
Спостереження двовимірного електронного газу можливе в:

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

$$\Phi_M > \Phi_{\text{н/п}}$$

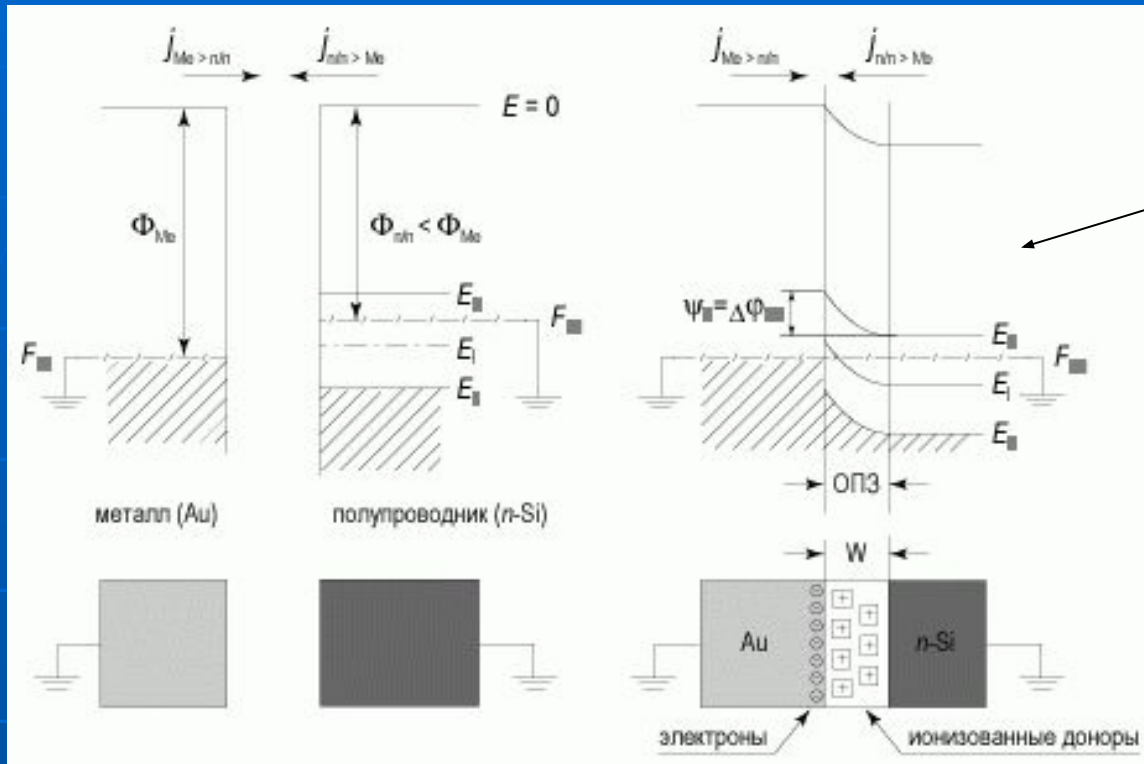
При контакті таких матеріалів у початковий момент **струм із напівпровідника в метал** буде перевищувати зворотній струм із металу в напівпровідник



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.



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

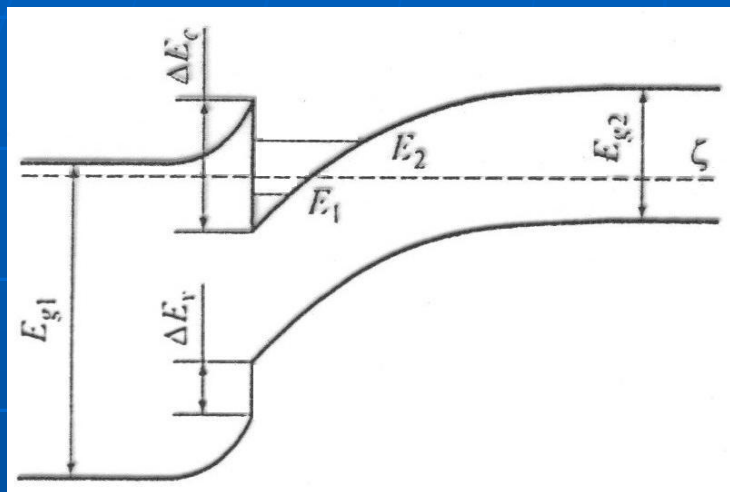
уширення рівнів незначне \Rightarrow

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

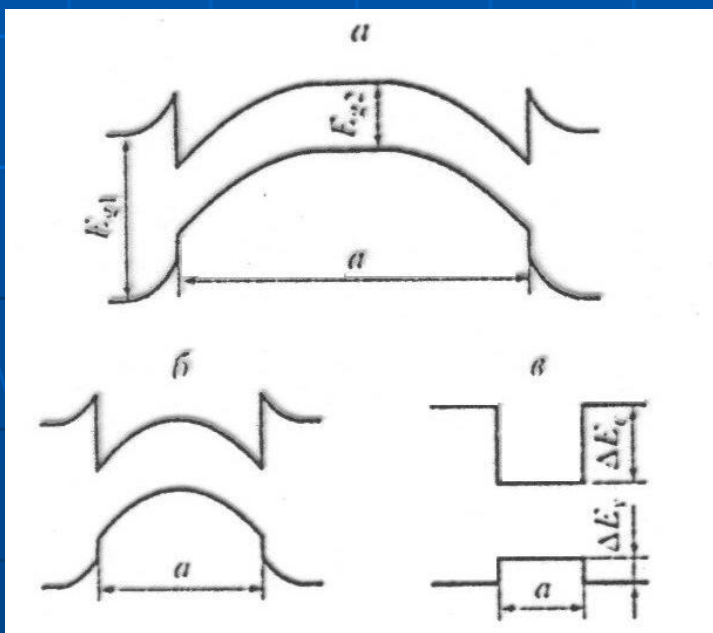
Потенціальна яма утворена розривом зон ΔE_c з одного боку та електростатичним полем переходу з іншого боку.

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)

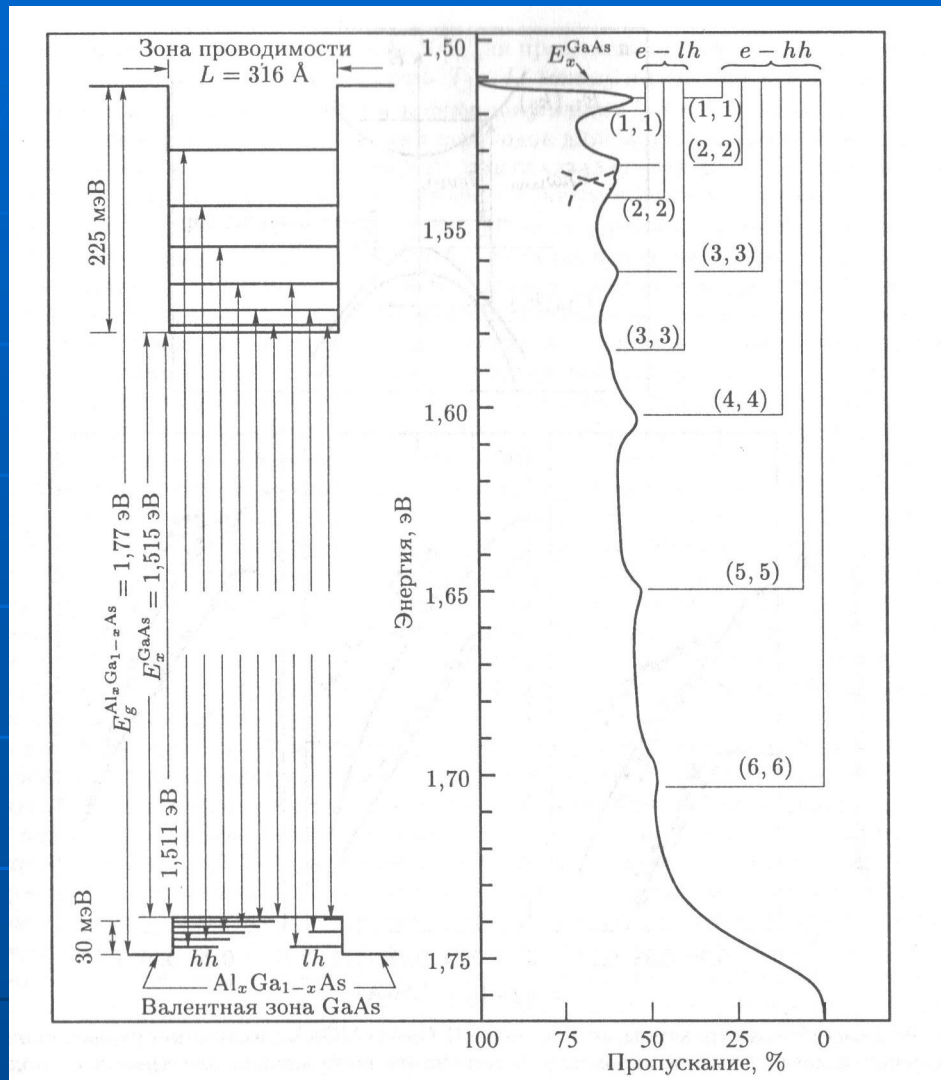


Рис. 9.11. Зависимость спектра пропускания МКЯ GaAs/Al_{0,2}Ga_{0,8}As, 316Å от энергии фотонов при низкой температуре (справа). Пики, обозначенные (n, n), идентифицированы как оптические переходы из подзон тяжелых (hh) и легких (lh) дырок с номером n в n-подзоны проводимости. Они обозначены стрелками 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

⇒

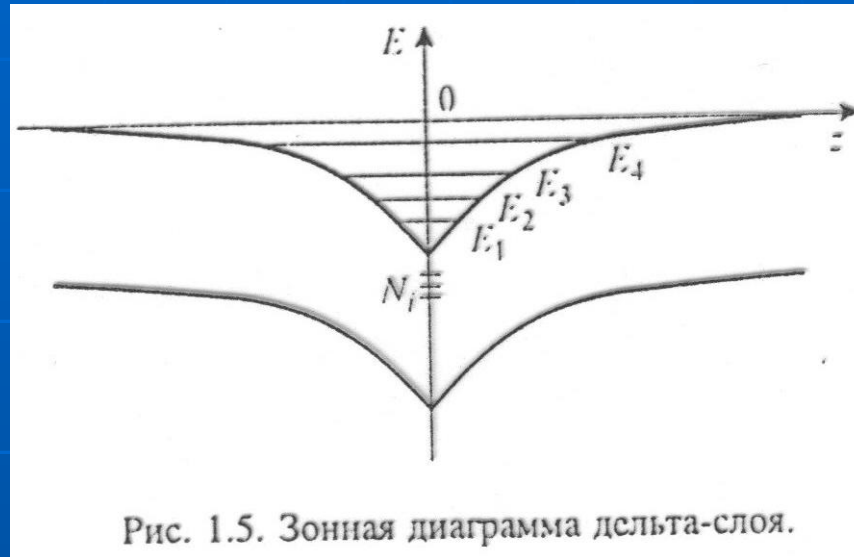
електричне поле шару іонів екранується зарядом носіїв

⇒

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} 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**.

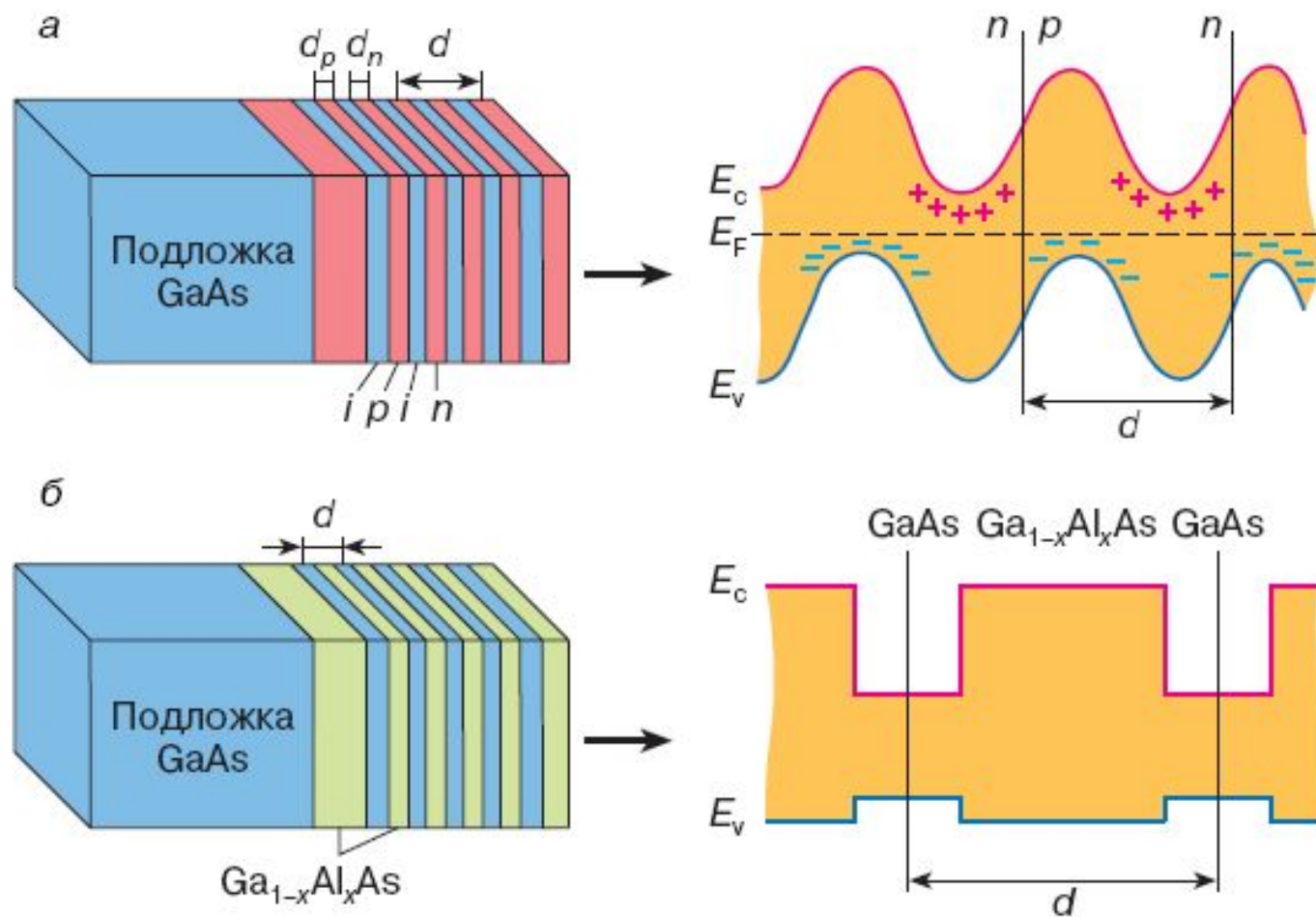


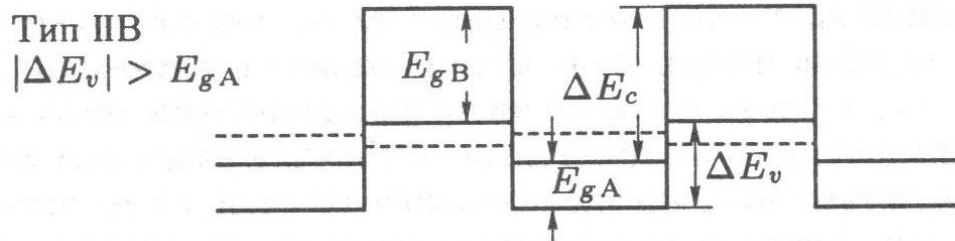
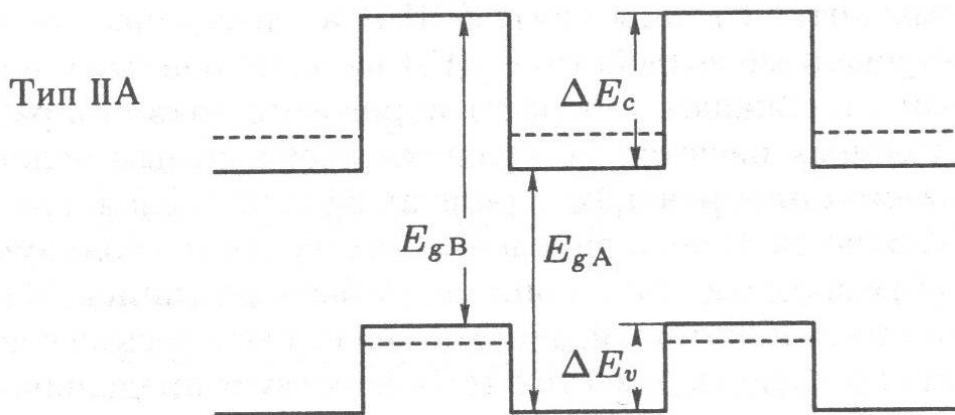
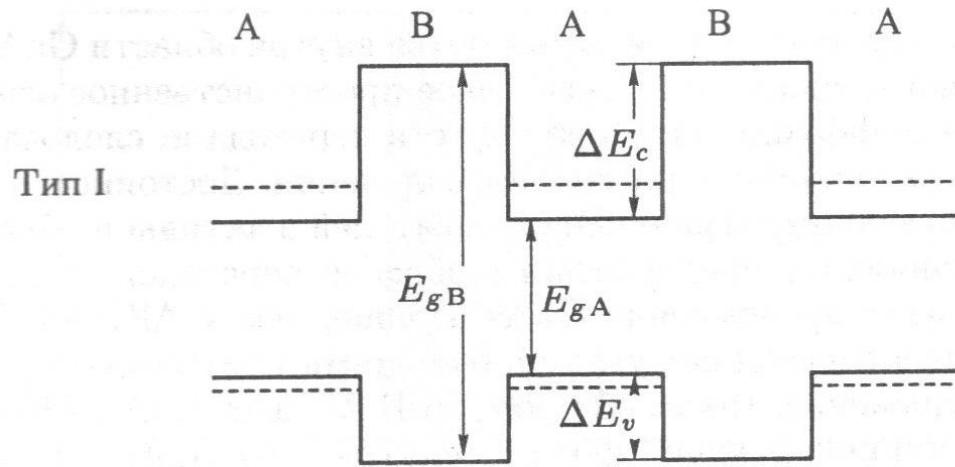
Рис. 2. Вид и пространственный ход краев энергетических зон вдоль оси роста (показана стрелкой) сверхрешеток на структуре GaAs– $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ с периодом d , имеющей толщины слоев d_i , d_n , d_p , с концентрациями носителей тока n_i , n_n , n_p соответственно: *а* – легированная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

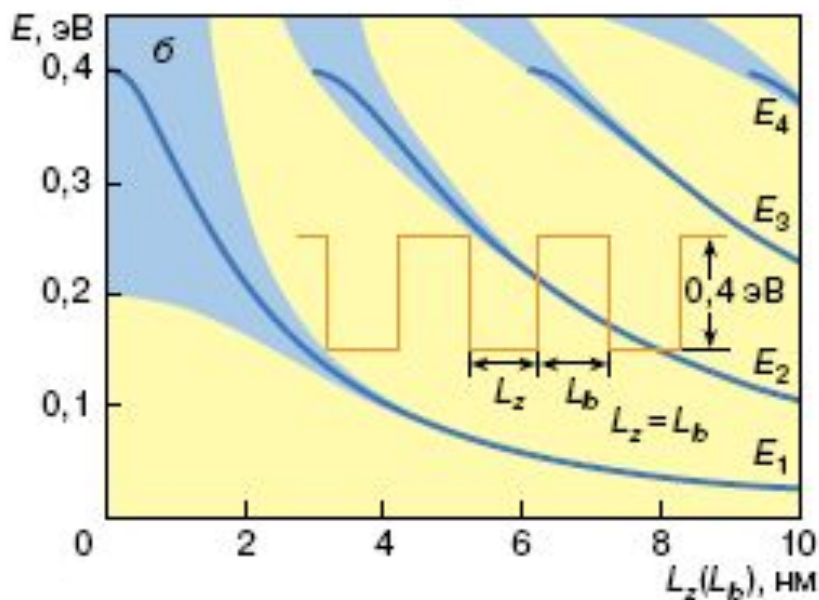
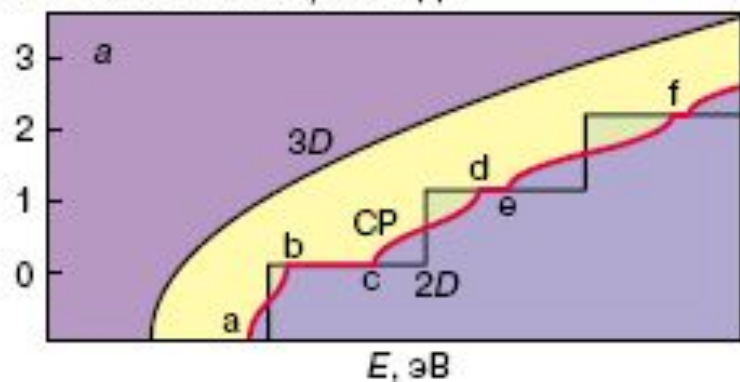
як і в кристалічній гратці, рух електрона в надгратці можна охарактеризувати квазіімпульсом $p(z)$ \Rightarrow

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