

# ОСНОВИ МІКРО- і НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

## Лекція 05

### Гетеропереходи

**Анатолій Євтух**

*Інститут високих технологій  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка*

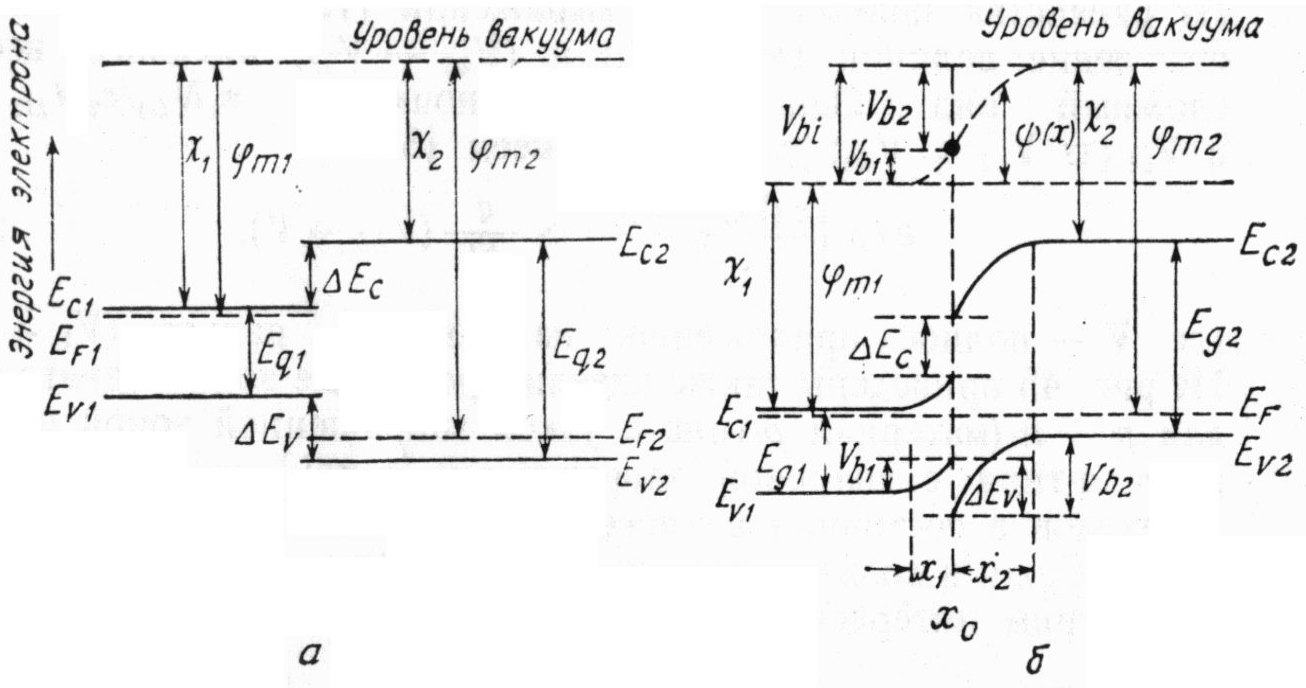
# Гетероперехід

Гетероперехід – перехід утворений між двома різними напівпровідниками.

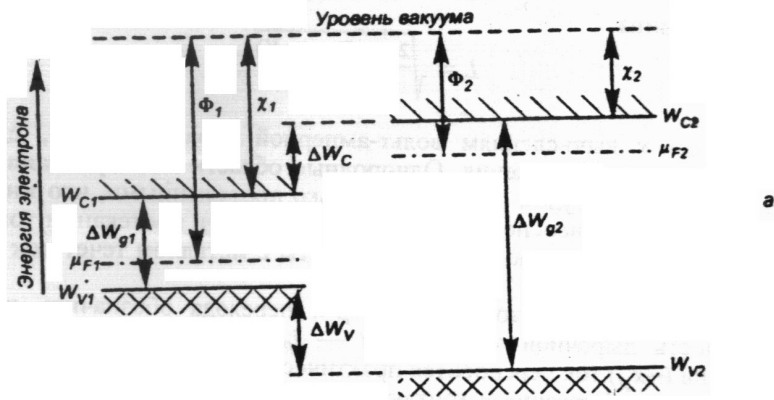
Якщо напівпровідники мають однаковий тип провідності – **ізотипний гетероперехід**.

Якщо напівпровідники мають різний тип провідності – **анізотипний гетероперехід**.

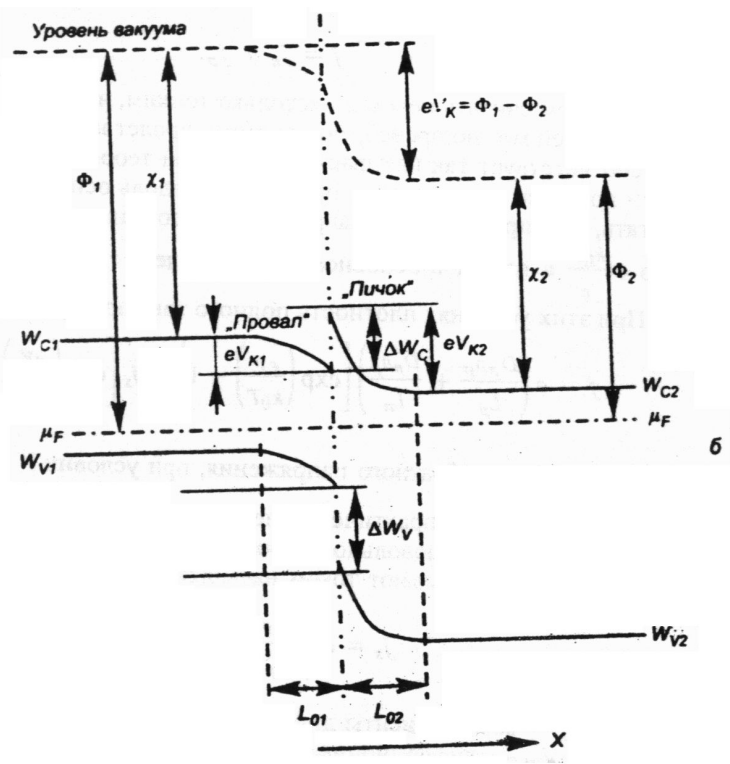
Ідеальний різкий гетероперехід без пасток на границі розділу (Андерсон).



Зонні діаграми двох ізольованих напівпровідників при умові електронейтральності (а) і ідеального анізотипного p-n - гетеропереходу при тепловій рівновазі (б).



а



б

Рівноважні діаграми енергетичних зон до (а) і після (б) утворення різкого р-п гетеропереходу.

Ширина збідненого шару в кожному напівпровіднику і бар'єрна ємність знаходиться з рішення рівняння Пуасона для різкого переходу з кожної сторони границі розділу.

Одна з граничних умов – неперервність електричної індукції на границі розділу

$$\varepsilon_1 \mathbf{E}_1 = \varepsilon_2 \mathbf{E}_2$$

Повний контактний потенціал  $V_{bi} = V_{b1} + V_{b2}$ .

$$x_1 = \left[ \frac{2N_{A2} \varepsilon_1 \varepsilon_2 (V_{bi} - V)}{qN_{D1} (\varepsilon_1 N_{D1} + \varepsilon_2 N_{A2})} \right]^{1/2}.$$

$$x_2 = \left[ \frac{2N_{D1} \varepsilon_1 \varepsilon_2 (V_{bi} - V)}{qN_{A2} (\varepsilon_1 N_{D1} + \varepsilon_2 N_{A2})} \right]^{1/2}.$$

$$C = \left[ \frac{qN_{D1} N_{A2} \varepsilon_1 \varepsilon_2}{2(\varepsilon_1 N_{D1} + \varepsilon_2 N_{A2})(V_{bi} - V)} \right]^{1/2}.$$

Відношення напруг на кожному напівпровіднику

$$\frac{V_{b1} - V_1}{V_{b2} - V_2} = \frac{N_{A2} \varepsilon_2}{N_{D1} \varepsilon_1}.$$

$$V = V_1 + V_2.$$

# ВАХ гетеропереходів

## Дифузійна модель Андерсона

Струм термоелектронної емісії.

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{qV_2}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_1}{kT}\right) \right].$$

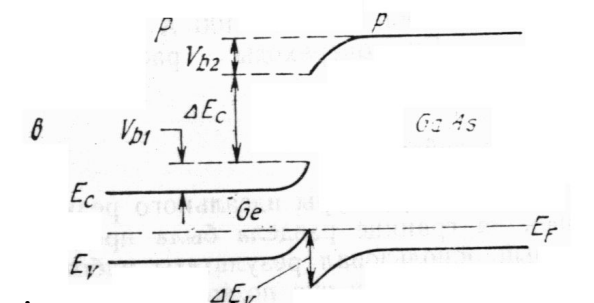
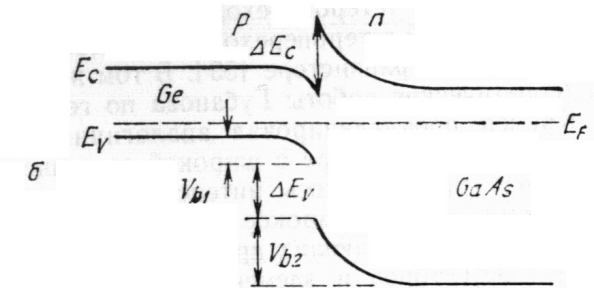
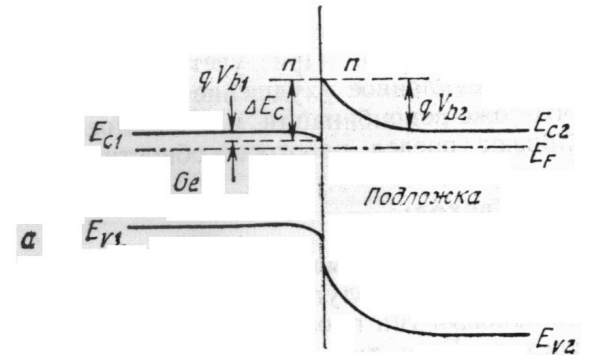
$$J = J_0 \left(1 - \frac{V}{V_{bi}}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right].$$

$$J_0 \equiv \frac{qA^* T V_{bi}}{k} \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{kT}\right).$$

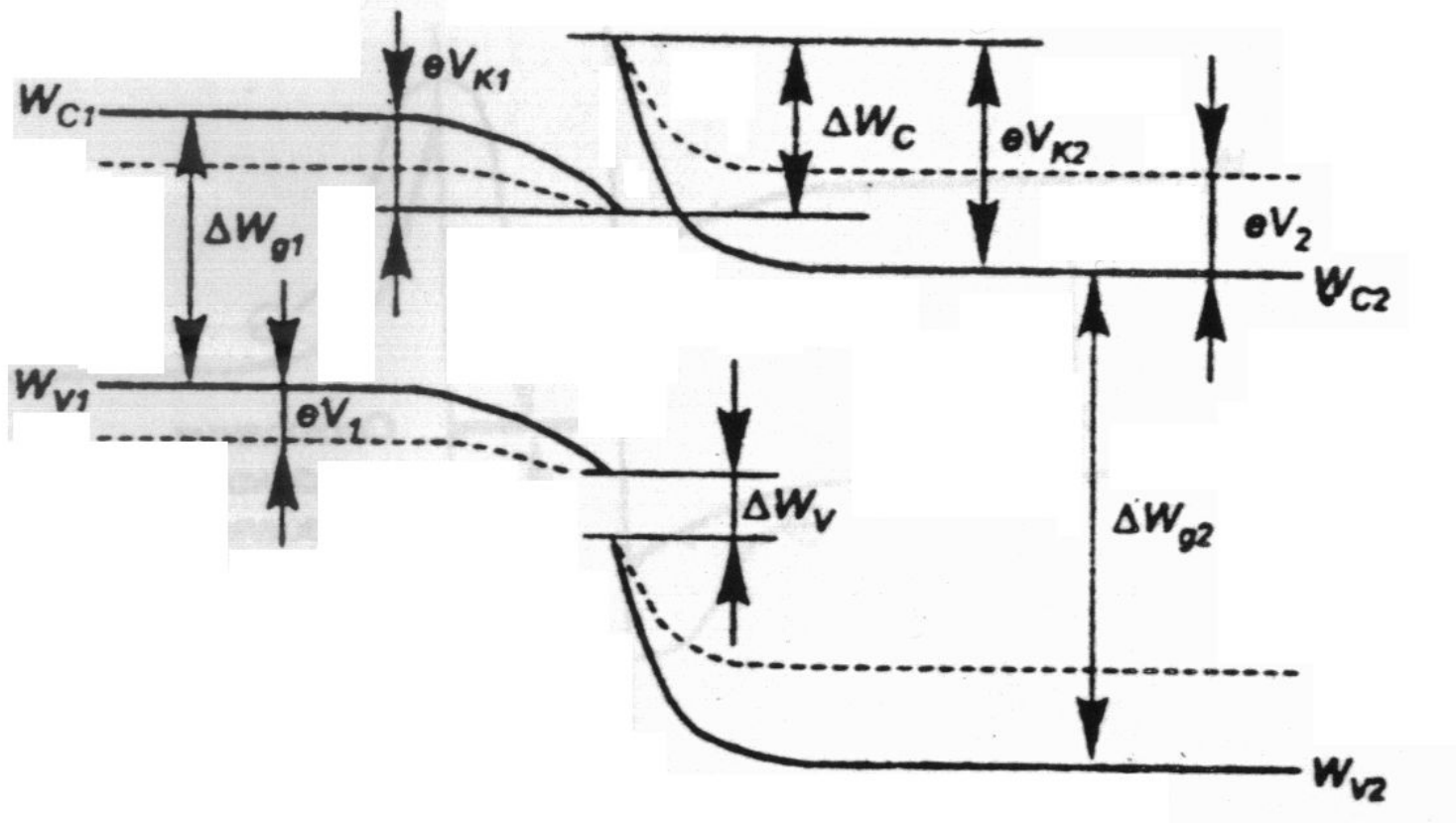
Обернений струм не має насичення, а при великих значеннях  $V$  лінійно зростає з напругою.

В прямому напрямі залежність  $J$  від  $qV/kT$  можна апроксимувати експоненційною функцією

$$J \propto \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right).$$



Зонні діаграми ідеального ізотопного n-n - гетеропереходу (а), а також ідеальних p-n (б) і p-p - гетеропереходів (в).



Діаграма енергетичних зон різкого р-n гетеропереходу при прямому зміщенні (пунктирні лінії); неперервні лінії відповідають нульовому зміщенню.

# Емісійна модель різкого p-n гетеропереходу

Переніс заряду здійснюється в основному електронами, при розрахунку ВАХ враховуються накоплення неосновних носіїв заряду на краях збідненої області і вплив потенціального бар'єру (у виді “пічка” на n- стороні гетеропереходу ) на проходження струму.

$$I = \frac{I_s I_d}{I_s + I_d} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]. \quad I_s = qSN_{d1} \sqrt{\frac{D_{n1}}{\tau_{n1}}}.$$

Якщо  $I_s \ll I_d$ , то повний струм дорівнює величині струму в моделі Шоклі для гомопереходу.

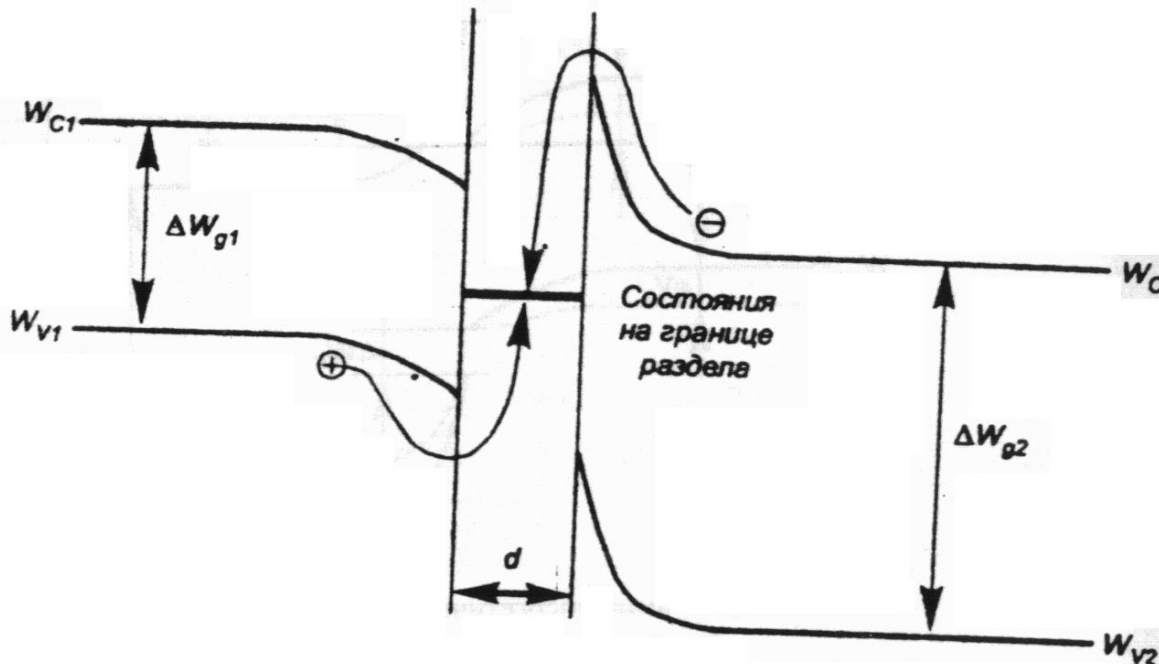
$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right].$$

Якщо  $I_s \gg I_d$ , то повний струм співпадає зі струмом розрахованим в діод ній емісійній моделі Шоткі.

$$I = I_d \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

# Емісійно-рекомбінаційна модель р-п гетеропереходу

Допускається, що на границі розділу знаходиться тонкий шар дефектної кристалічної ґратки з великою швидкістю рекомбінації, а носії заряду досягають границі розділу за допомогою термічної емісії через відповідні бар'єри.



$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{\beta kT}\right) - 1 \right].$$

$$I_0 = B \exp\left(-\frac{qV_K}{\beta kT}\right).$$

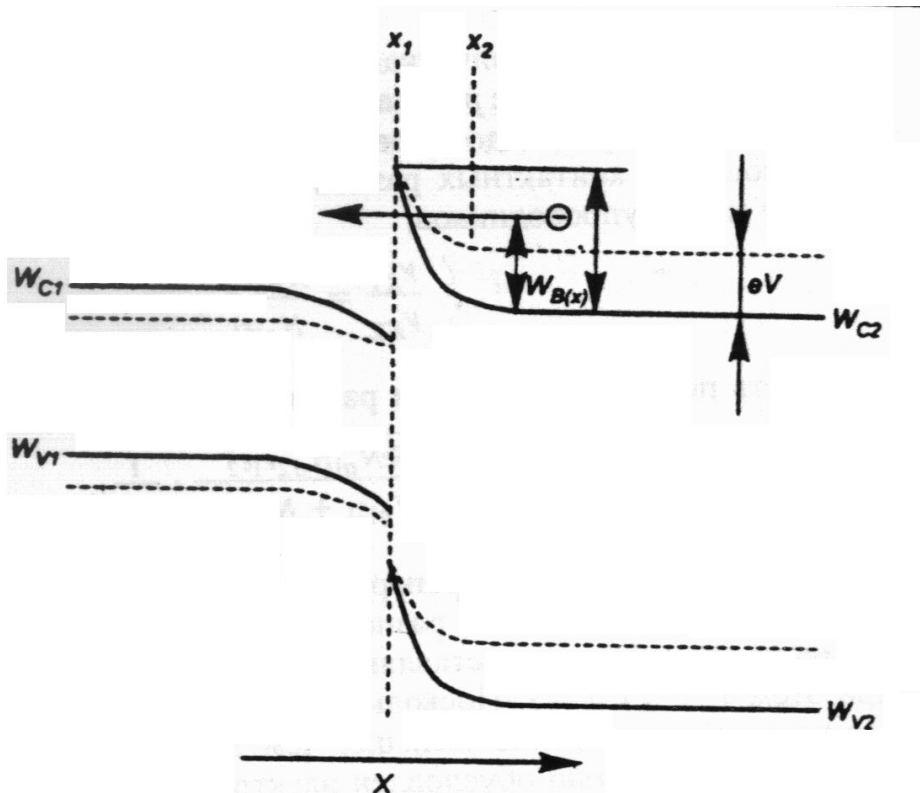
$$\beta \approx 1 - 2.$$

Схема емісійно-рекомбінаційної моделі р-п гетеропереходу.



# Тунельна модель різкого р-п гетеропереходу

Потенціальний бар'єр у виді пічка в широкозонному напівпровіднику n типу електрони можуть подолати або термічною емісією через бар'єр, або тунелюванням крізь нього.



$$T = \exp\left\{-2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m_n^* [W_b(x) - qaV]} dx\right\}.$$

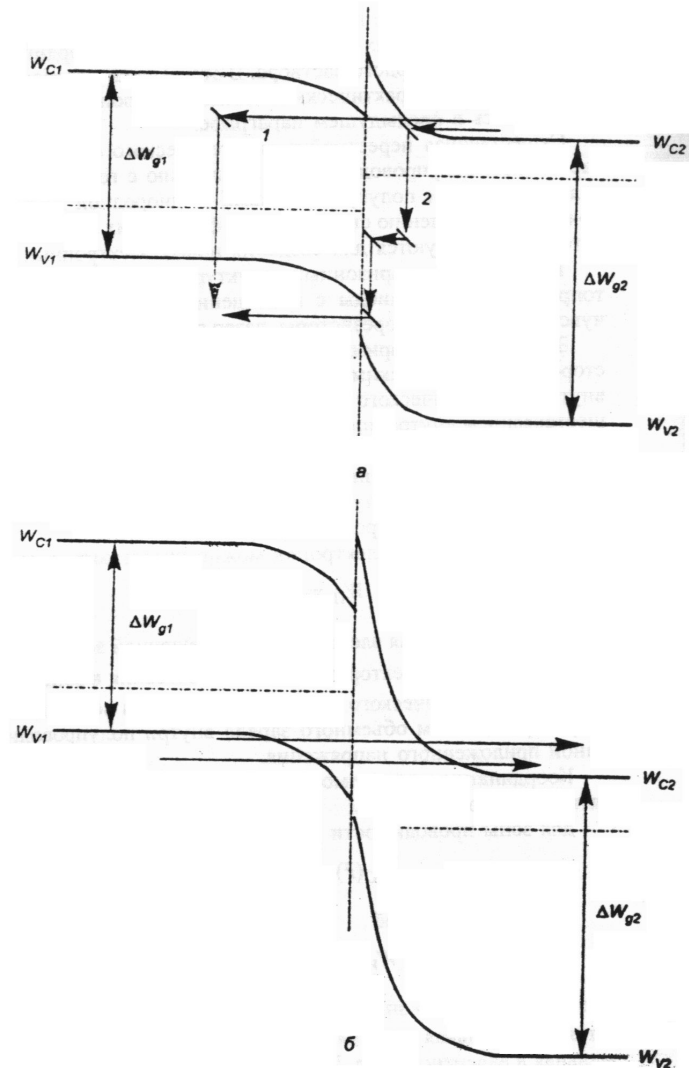
Якщо тунелювання через бар'єр є домінуючим механізмом протікання струму, то загальний вираз ВАХ при прямому зміщенні має вид

$$I = I_s(T) \exp\left(\frac{V}{V_0}\right).$$

# Тунельно-рекомбінаційна модель різкого р-п гетеропереходу

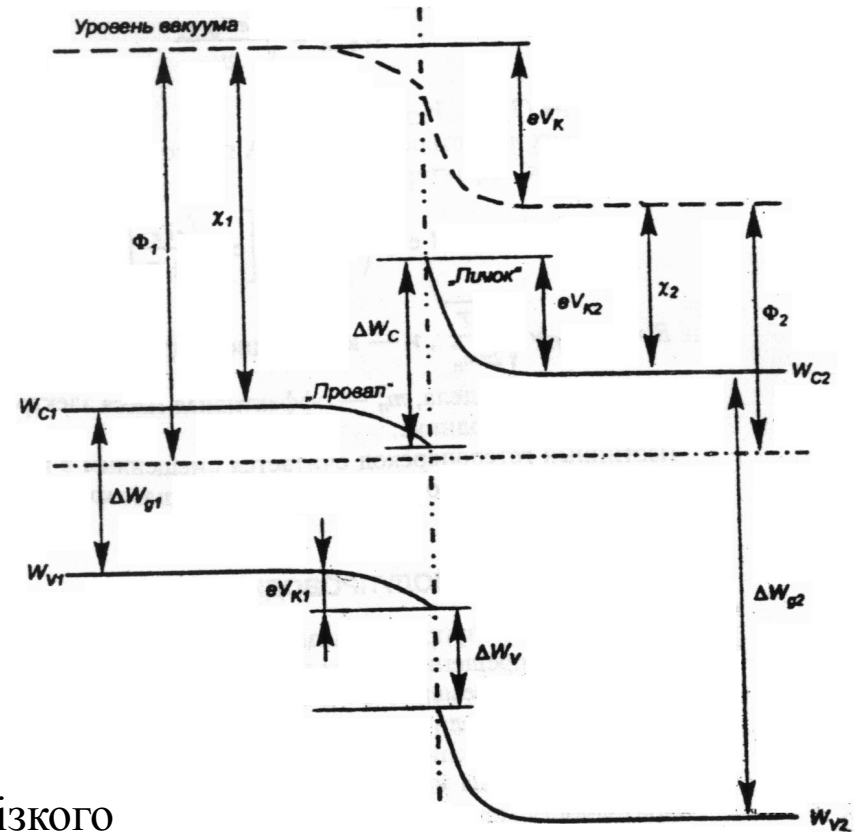
Допускається, що відбувається тунелювання електронів із зони провідності широкозонного напівпровідника на незайняті локальні центри в забороненій зоні вузькозонного матеріалу р-типу з наступною рекомбінацією з діркою. Можливі і ступінчаті тунельно-рекомбінаційні процеси.

Діаграма енергетичних зон різкого р-п гетеропереходу при прямому (а) і оберненому (б) зміщенні, яка ілюструє тунелювання електронів.



# Різкі ізотипні гетеропереходи

В ізотипних гетеропереходах типу n-n і p-p вклад неосновних носіїв заряду в електричний струм знехтувано малий. Ізотипні гетеропереходи відносяться до пристроїв з основними носіями заряду.



Рівноважна діаграма енергетичних зон різкого n-n гетеропереходу.

«Пічок» і «провал» обумовлені вибраними параметрами напівпровідників, які контактують:  $\chi_1 > \chi_2$  і  $E_{g1} < E_{g2}$  ( $\Delta W_{g1} < \Delta W_{g2}$ ).

На відміну від анізотропних гетеропереходів, збіднений шар утворюється лише з боку широкозонного напівпровідника, а з боку вузькозонного напівпровідника збагачений шар, товщина якого менша шару збіднення. В зв'язку з цим прикладена напруга падає в основному на широкозонному напівпровіднику

$$V_{k2} = \frac{\varepsilon_1 N_{d1}}{\varepsilon_2 N_{d2}} \left\{ \frac{kT}{q} \left[ \exp\left(\frac{qV_{k1}}{kT}\right) - 1 \right] - V_{k1} \right\}.$$

Ємність перехідної області

$$C_{n-n} = \sqrt{\frac{qSN_{d2}\varepsilon_2}{2V_k}}. \quad V_{k2} \gg V_{k1}$$

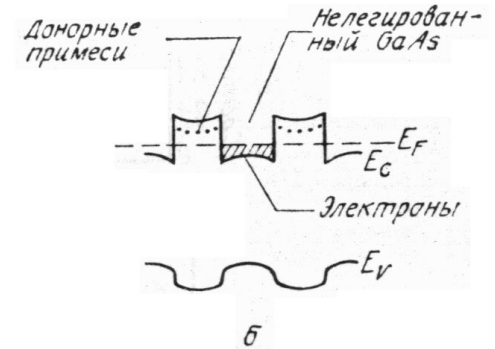
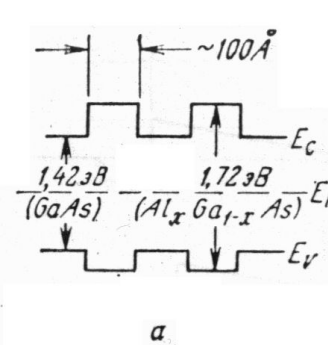
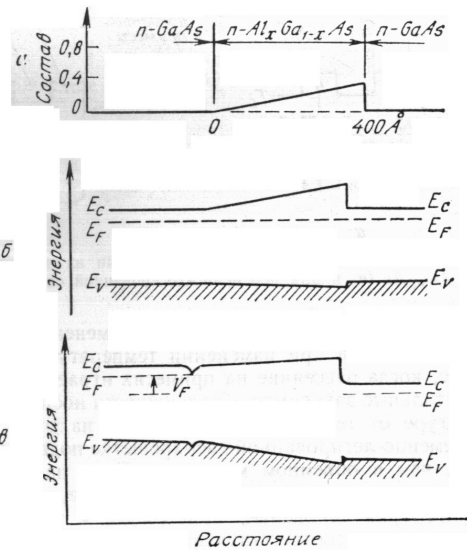
Для різких n-n переходів Андерсон отримав наступний вид ВАХ:

$$I = B \exp\left(-\frac{qV_{k2}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_{k1}}{kT}\right) - 1 \right]. \quad B = qSN_{d2}v \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_n^*}}.$$

$v$ - коефіцієнт пропускання електронів через поверхню розділу;  $m_n^*$ -ефективна маса електронів в широкозонному напівпровіднику.

Ізотипний гетероперехід вважається зміщеним в прямому напрямку, якщо прикладена напруга зменшує контактну різницю потенціалів.

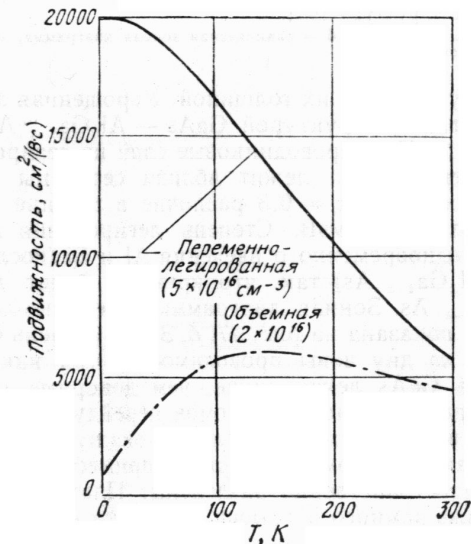
# Прилади на гетеропереходах



Зонні діаграми для надградок з шарами GaAs і  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , що чергуються і для почергово легованої надградки.

Варізонна структура. а- зміна складу вздовж структури; б- рівноважна зонна діаграма; в- зонна діаграма при прямому зміщенні.

Температурна залежність рухливості в GaAs і в почергово легованій надградці.



**Дякую за увагу!**