



Detekcja światła

Sebastian Maćkowski

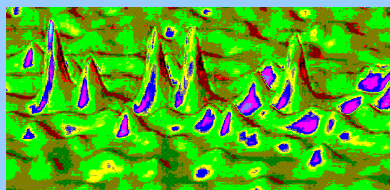
Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: czwartek 13-16



Repeta z wykładu nr 5

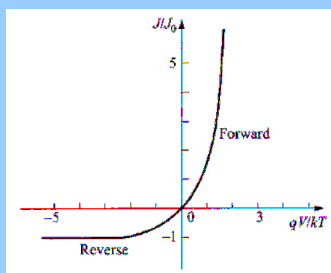
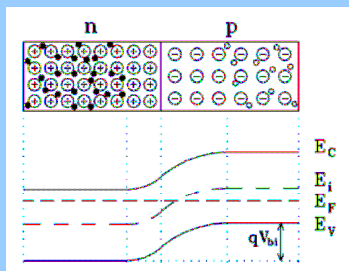
Diagram illustrating light absorption in a semiconductor. It shows incident light with energy $h\nu$ hitting a semiconductor labeled "Półprzewodnik". Below, a graph shows power P_i decaying as $P_i(1-\rho)e^{-1/\alpha}$. To the right, a 2-D carrier density $N(E)$ is shown as a step function. At the bottom, an energy band diagram shows E_i , E_F , and E_v levels, with a built-in potential qV_{bi} indicated.

- wzbudzenia w kryształach
- absorpcja
- czas życia nośników
- struktury półprzewodnikowe
- złącze p-n – część 1

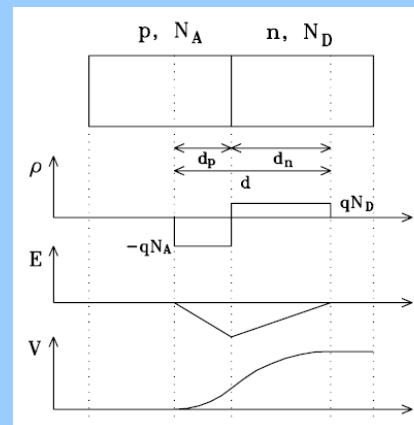


Plan na dzisiaj

złącze p-n



Złącze p-n



równowaga termodynamiczna: w wyniku dyfuzji i dryftu nośników dochodzi do wyrównania poziomu Fermiego w poprzek złącza



Złącze p-n

przykład: obliczenie, w przybliżeniu ostrego złącza, szerokości warstwy zubożonej i pola elektrycznego w złączu p-n silnie domieszkowanego na typ p (10^{17} cm^{-3}). Koncentracja donorów - 10^{12} cm^{-3} .

z warunku istnienia zerowego pola elektrycznego na krawędzi:

$$N_D d_n = N_A d_p$$

pole elektryczne na granicy złącza:

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} q N_D d_n = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} q N_A d_p$$

WS 2008/2009

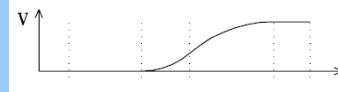


Złącze p-n

zmiana potencjału dla części n i p złącza, która jest równa napięciu wbudowanemu:

$$V_n = \frac{\mathcal{E}_{\max} d_n}{2} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{q N_D d_n^2}{2} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{q N_A d_p d_n}{2}$$

$$V_p = \frac{\mathcal{E}_{\max} d_p}{2} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{q N_A d_p^2}{2} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{q N_D d_p d_n}{2}$$



$$\begin{aligned} V = V_n + V_p &= \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} (N_A + N_D) d_n d_p \\ &= \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{(N_A + N_D) N_D}{N_A} d_n^2 = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{(N_A + N_D) N_A}{N_D} d_p^2 \end{aligned}$$

$$d_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} V_{bi}}$$

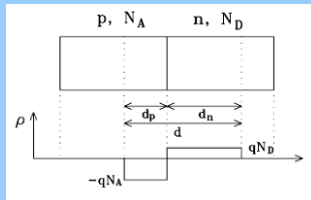
$$d_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} V_{bi}}$$

WS 2008/2009



Złącze p-n

wtedy szerokość warstwy zubożonej dla złącza:



$$\begin{aligned} d = d_n + d_p &= \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 V_{bi}}{q(N_A + N_D)}} \left[\sqrt{\frac{N_A}{N_D}} + \sqrt{\frac{N_D}{N_A}} \right] \\ &= \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 (N_A + N_D)}{q N_A N_D}} V_{bi} \end{aligned}$$

dla silnie asymetrycznego domieszkowania złącza, gdy $N_A \gg N_D$:

$$d \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q N_D} V_{bi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11.9 \cdot 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}} \times 0.485 \text{ V}} = 25.3 \mu\text{m}$$

WS 2008/2009

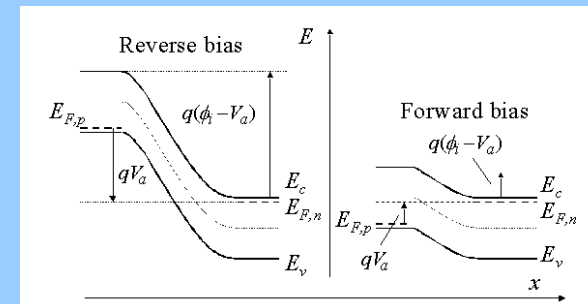


Złącze p-n

złącze p-n w warunkach zewnętrznej różnicy potencjałów

kierunek zaporowy

kierunek przewodzenia



WS 2008/2009



Złącze p-n

dla różnicy potencjałów w kierunku przewodzenia napięcie wbudowane ulega zmniejszeniu, ulega też redukcji szerokość warstwy zubożonej

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(N_A + N_D)}{qN_A N_D}}(V_{bi} - V)$$

dla półprzewodnika w równowadze termodynamicznej (było ☺)

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \quad p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$$

$$np = n_i^2$$

WS 2008/2009



Złącze p-n

złącze pod wpływem przyłożonego napięcia nie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej i $np \neq n_i^2$

opis przy pomocy kwazi poziomu Fermiego

elektrony $n \equiv n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right)$

dziury $p \equiv n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right)$

wtedy

$$E_{Fn} \equiv E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$$

$$E_{Fp} \equiv E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$$

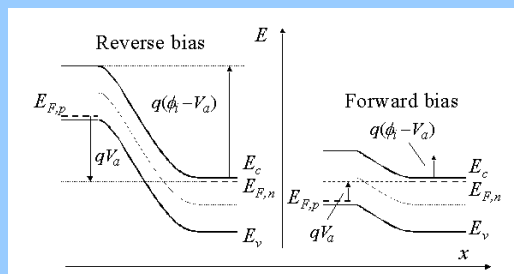
a prawo działania mas

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right)$$

WS 2008/2009



Złącze p-n



kierunek zaporowy

$$(E_{Fn} - E_{Fp}) < 0$$

$$pn < n_i^2$$

kierunek przewodzenia

$$(E_{Fn} - E_{Fp}) > 0$$

$$pn > n_i^2$$

WS 2008/2009



Prąd w złączu p-n

całkowity prąd płynący przez złącze jest sumą prądu elektronowego i dziurowego, które związane są z dryftem i dyfuzją nośników

$$J_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \nabla n$$

$$J_p = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \nabla p$$

$$J_{\text{cond}} = J_n + J_p$$

dla przypadku jednowymiarowego (było ☺)

$$J_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} = q\mu_n \left(n \mathcal{E} + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right)$$

$$J_p = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} = q\mu_p \left(p \mathcal{E} - \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx} \right)$$

WS 2008/2009



Prąd w złączu p-n

$$\mathbf{J}_n = q\mu_n \left(n\mathcal{E} + \frac{kT}{q} \nabla n \right) = \mu_n n \nabla E_i + \mu_n kT \left[\frac{n}{kT} (\nabla E_{Fn} - \nabla E_i) \right]$$

elektrony

$$\mathbf{J}_n = \mu_n n \nabla E_{Fn}$$

dziury

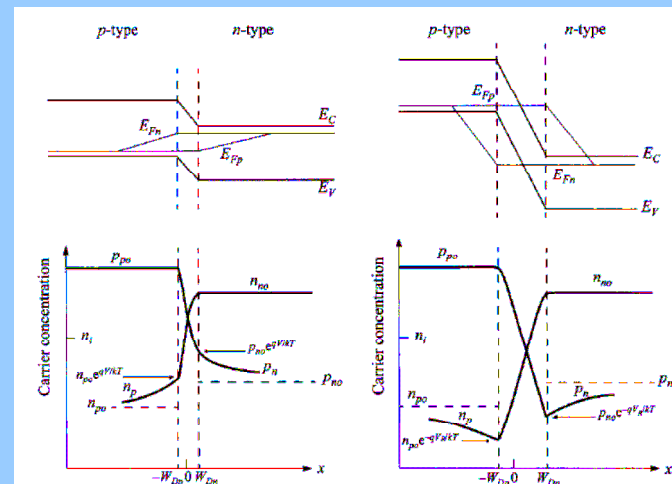
$$\mathbf{J}_p = \mu_p p \nabla E_{Fp}$$

ponieważ gęstość prądu elektronów i dziur płynącego przez złącze jest proporcjonalna do gradientu kwazi-poziomu Fermiego dla elektronów i dziur, które w warunkach równowagi wynoszą zero, to w stanie ustalonym (równowaga termodynamiczna) prąd nie płynie

WS 2008/2009



Prąd w złączu p-n



WS 2008/2009



Prąd w złączu p-n

obserwacje:

w obszarze warstwy zubożonej zmiana kwazi-poziomów Fermiego jest niewielka, wynika to ze stosunkowo wysokiej koncentracji nośników w warstwie zubożonej i stałości płynącego prądu
szerokość warstwy zubożonej jest ponadto mniejsza niż typowe długości dyfuzji nośników

dlatego w warstwie zubożonej:

$$qV = E_{Fn} - E_{Fp}$$

z powyższych rozważań można wyliczyć koncentrację elektronów na krawędzi warstwy zubożonej w obszarze domieszkowanym na typ p, czyli dla $x = -W_{Dp}$

WS 2008/2009



Prąd w złączu p-n

$$n_p(-W_{Dp}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

n_{po} – równowagowa koncentracja elektronów w obszarze domieszkowanym na typ p

$$p_p \approx p_{po}$$

dla niewielkich natężeń

analogicznie, koncentracja dziur na krawędzi warstwy zubożonej w obszarze domieszkowanym na typ n, czyli dla $x = -W_{Dn}$

$$p_n(W_{Dn}) = p_{no} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

WS 2008/2009



Równanie ciągłości

zmiana koncentracji nośników w danym obszarze półprzewodnika jest wynikiem efektów generacji i rekombinacji nośników oraz przepływu prądu z obszaru i do obszaru

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n$$

G – szybkość generacji

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p$$

U – szybkość rekombinacji ($U = \Delta n / \tau$)

dla przypadku jednowymiarowego (nie było ☺)

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + n_p \mu_n \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + \mu_n \mathcal{E} \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial p_p}{\partial t} = G_p - \frac{p_p - p_{p0}}{\tau_p} - p_p \mu_p \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} - \mu_p \mathcal{E} \frac{\partial p_p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_p}{\partial x^2}$$

WS 2008/2009



Równanie ciągłości

dla obszaru domieszkowanego na typ n równanie ciągłości ma postać

$$-U + \mu_n \mathcal{E} \frac{dn_n}{dx} + \mu_n n_n \frac{d\mathcal{E}}{dx} + D_n \frac{d^2 n_n}{dx^2} = 0$$

$$-U - \mu_p \mathcal{E} \frac{dp_n}{dx} - \mu_p p_n \frac{d\mathcal{E}}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0$$

z zasady zachowania ładunku

$$(n_n - n_{n0}) = (p_n - p_{n0})$$

$$dn_n/dx = dp_n/dx$$

bipolarna stała dyfuzji

mnożąc równanie górne przez $\mu_p p_n$, a dolne przez $\mu_n n_n$

$$-\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{n_n - p_n}{(n_n/\mu_p) + (p_n/\mu_n)} \frac{d p_n}{dx} + D_a \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0$$

WS 2008/2009



Równanie ciągłości

przy założeniu małych prądów i potencjałów, gdy czyli dla obszaru domieszkowanego na typ n mamy $p_n \ll (n_n \approx n_{n0})$

to równanie ciągłości upraszcza się do

$$-\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \mu_p \mathcal{E} \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0$$

w obszarze neutralnym, gdzie jest zerowe pole elektryczne

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{D_p \tau_p} = 0$$

WS 2008/2009



Równanie ciągłości

dla warunków brzegowych

$$p_n(W_{Dn}) = p_{n0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

$$p_n(x = \infty) = p_{n0}$$

rozwiązanie jest postaci

$$p_n(x) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right)$$

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$$

WS 2008/2009



Równanie złącza p-n

dziurowy prąd dyfuzyjny w obszarze domieszkowanym na typ n

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{w_{Dn}} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

elektronowy prąd dyfuzyjny w obszarze domieszkowanym na typ p

$$J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx} \Big|_{-w_{Dp}} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

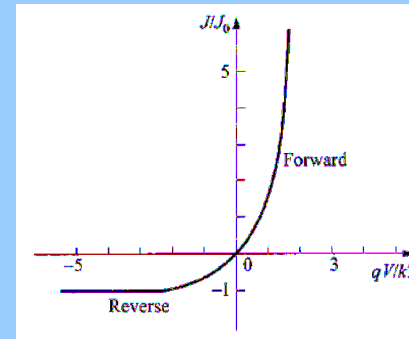
całkowity prąd w złączu (równanie Shockleya)

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad J_0 \equiv \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \equiv \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A}$$

WS 2008/2009



Charakterystyka IV



równanie Shockleya opisuje przypadek idealnie ostrego złącza w sposób zadowalający przewiduje zachowanie w germanowych złączach p-n dla przypadku niskich gęstości prądu

dla złącz opartych o krzem (Si) czy arsenek galu (GaAs) – opis jedynie jakościowy

WS 2008/2009



Charakterystyka IV

podstawowe procesy odpowiedzialne za odstępstwa od ideału

generacja i rekombinacja nośników w warstwie zubożonej

możliwość wystąpienia dużych gęstości prądu nawet dla względnie niewielkich napięć w kierunku przewodzenia

tunelowanie nośników pomiędzy stanami znajdującymi się w przerwie energetycznej

spadek napięcia związany z układem połączonych szeregowo oporników

efekty związane z rekombinacją powierzchniową

WS 2008/2009



Przebiecie złącza p-n

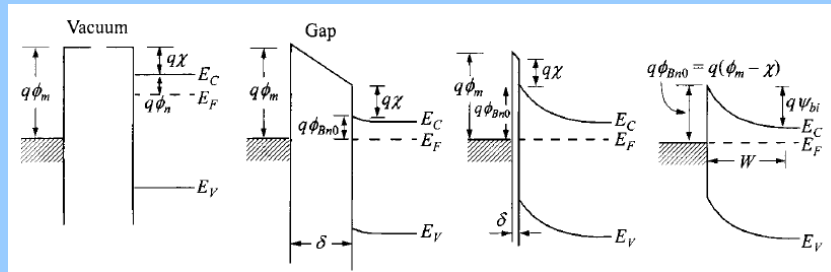
przebiecie - gwałtowny wzrost prądu przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym napięciem większym niż pewna charakterystyczna dla danego złącza wartość – napięcie przebiecia

przebiecie występuje zawsze przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym

WS 2008/2009



Metal-półprzewodnik



elektrony – z półprzewodnika do metalu, δ maleje – rośnie ładunek ujemny dla δ porównywalnych z odległościami międzyatomowymi zanika bariera

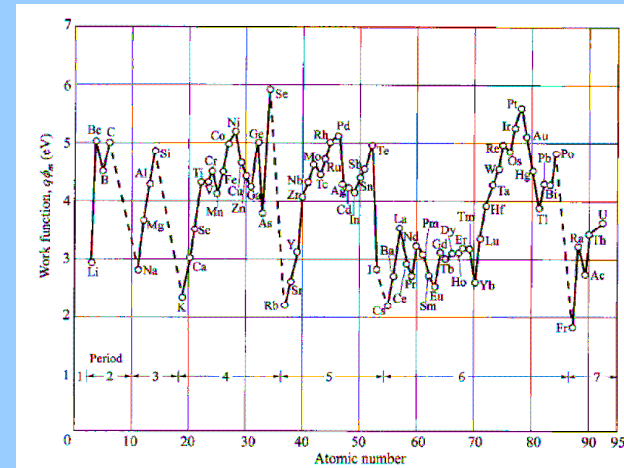
$$q\phi_{Bn0} = q(\phi_m - \chi)$$

$$q\phi_{Bp0} = E_g - q(\phi_m - \chi)$$

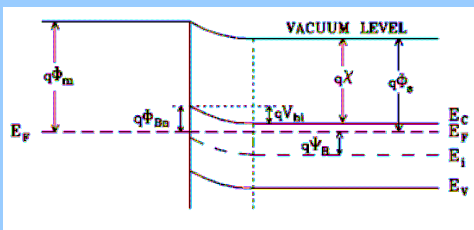
sytuacja idealna – stany powierzchniowe i jakość międzypowierzchni



Metal-półprzewodnik



Metal-półprzewodnik



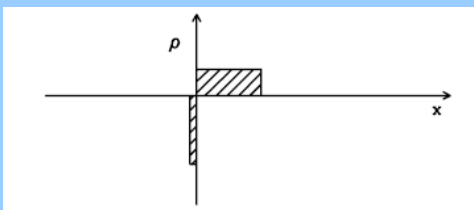
zrównanie poziomu Fermiego

$$V_{bi} = \Phi_m - \Phi_s$$

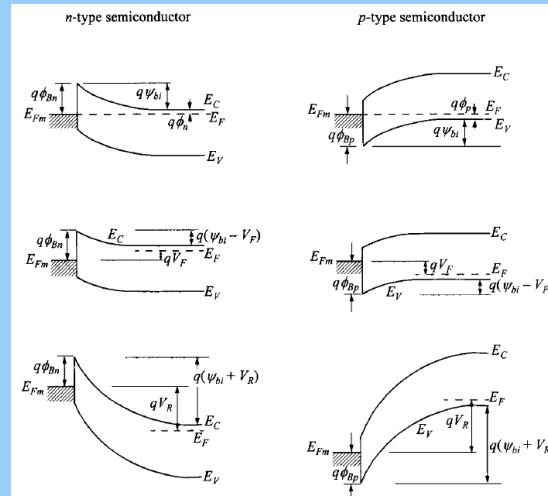
wygięcie pasm

energia potrzebna na przejście elektronu z metalu do półprzewodnika

$$q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi)$$



Metal-półprzewodnik



równowaga termodynamiczna

napięcie w kierunku przewodzenia

napięcie w kierunku zaporowym

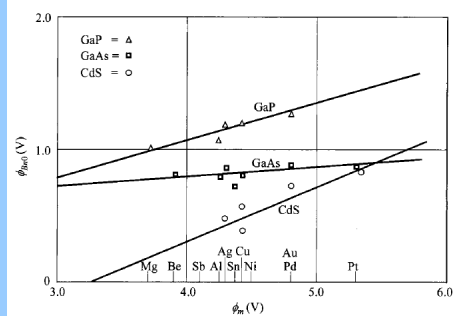
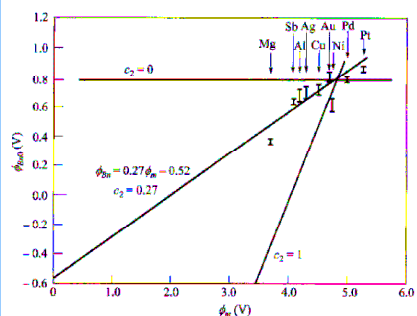


Metal-półprzewodnik

doświadczalnie zmierzone wysokości barier w złączach metal-półprzewodnik dla różnych par materiałów

krzem

związki półprzewodnikowe



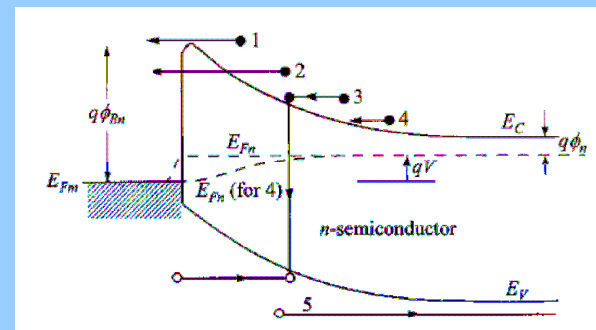
WS 2008/2009



Metal-półprzewodnik

w przeciwieństwie do złącza p-n, gdzie o transporcie decydują nośniki mniejszościowe, dla złącza metal-półprzewodnik decydujące znaczenie mają nośniki większościowe

napięcie w kierunku przewodzenia

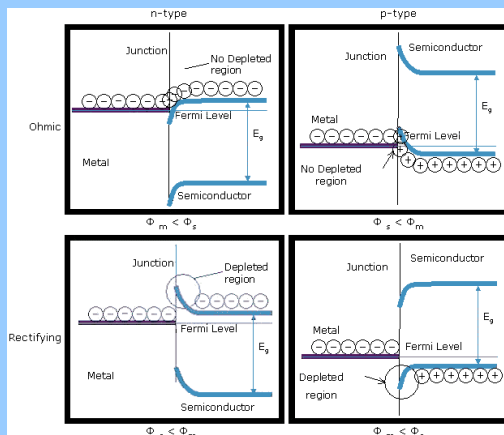


- 1-thermoemissja
- 2-tunelowanie
- 3-rekombinacja,
- 4-dyfuzja elektronów
- 5-dyfuzja dziur

WS 2008/2009



Metal-półprzewodnik



bariera energetyczna w złączu jest niewielka – nie rośnie oporność – złącze omowe
brak warstwy zubożonej

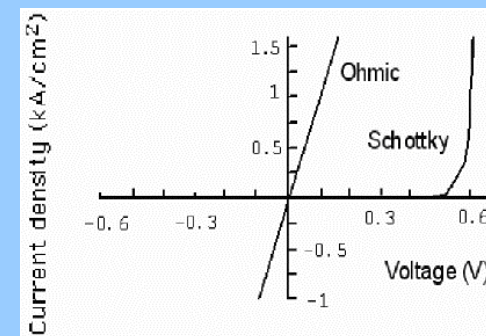
bariera energetyczna w złączu jest duża –rośnie oporność – złącze Schottky'ego
warstwa zubożona

WS 2008/2009



Metal-półprzewodnik

charakterystyka prądowo-napięciowa



WS 2008/2009