

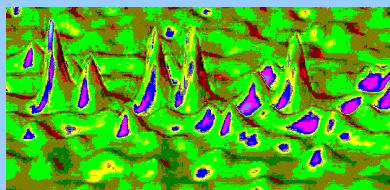


Detekcja światła

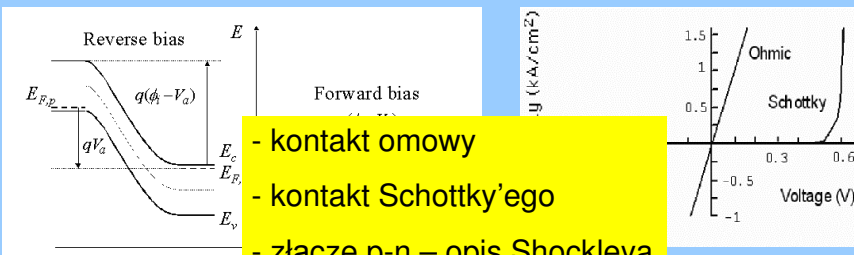
Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl
Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: czwartek 13-16

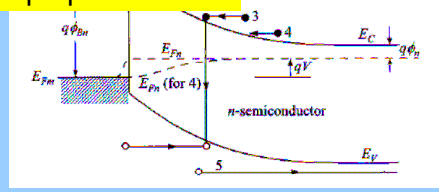


Repeta z wykładu nr 6

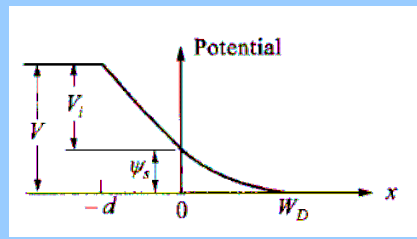
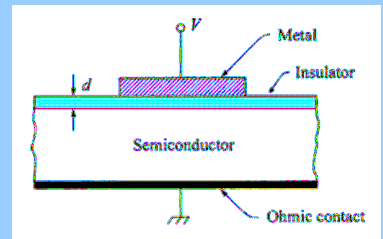
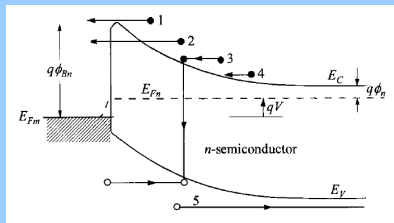


- kontakt omowy
- kontakt Schottky'ego
- złącze p-n – opis Shockleya
- złącze metal-półprzewodnik

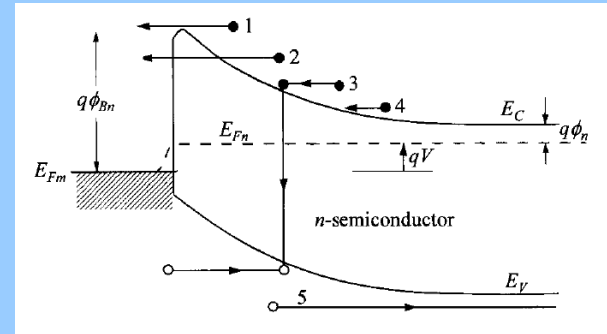
$$J = J_p + J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$



Plan na dzisiaj



Metal-półprzewodnik

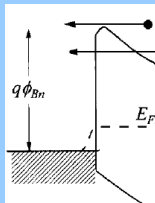


- 1-termoemisja
- 2-tunelowanie
- 3-rekombinacja,
- 4-dyfuzja elektronów
- 5-dyfuzja dziur



Termoemisja

emisja elektronów z półprzewodnika do metalu ponad barierą potencjału dominujący proces dla złącz Schottky'ego pracujących w temperaturze pokojowej i zbudowanych na półprzewodnikach o średnich wartościach koncentracji nośników (dla krzemu $N_D \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)



teoria termoemisji – Bethe, lata 40-te dwudziestego wieku
założenia modelu:

- (1) $q\phi_{Bn} \gg kT$ – bariera potencjału dużo wyższa niż energia termiczna
- (2) równowaga termodynamiczna w obszarze, w którym zachodzi emisja
- (3) kształt bariery potencjału nie ma znaczenia



Termoemisja

prąd związany z elektronami płynącymi z półprzewodnika do metalu zależy jedynie od koncentracji elektronów o odpowiednio dużej energii

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{E_{Fn} + q\phi_{Bn}}^{\infty} qv_x dn$$

$E_{Fn} + q\phi_{Bn}$ minimalna energia dla termoemisji

v_x prędkość elektronów w kierunku transportu nośników

gęstość elektronowa jest iloczynem gęstości stanów i funkcji rozkładu

$$dn = N(E)F(E)dE$$



Termoemisja

w przybliżeniu:

$$dn \approx \frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_C} \exp\left(-\frac{E - E_C + q\phi_n}{kT}\right) dE$$

zakładamy, że energia elektronu w paśmie walencyjnym to jedynie energia kinetyczna

$$E - E_C = \frac{1}{2}m^*v^2 \quad \rightarrow \quad \sqrt{E - E_C} = v\sqrt{\frac{m^*}{2}} \quad dE = m^*v dv$$

wtedy:

$$dn \approx 2\left(\frac{m^*}{h}\right)^3 \exp\left(-\frac{q\phi_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^*v^2}{2kT}\right) (4\pi v^2 dv)$$



Termoemisja

wyrażenie to określa liczbę wszystkich elektronów, które mają prędkości w przedziale $v, v+\Delta v$ rozłożone we wszystkich kierunkach przestrzeni

$$dn \approx 2\left(\frac{m^*}{h}\right)^3 \exp\left(-\frac{q\phi_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^*v^2}{2kT}\right) (4\pi v^2 dv)$$

uwzględniając, że:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad 4\pi v^2 dv = dv_x dv_y dv_z$$

$$J_{s \rightarrow m} = 2q\left(\frac{m^*}{h}\right)^3 \exp\left(-\frac{q\phi_n}{kT}\right) \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp\left(-\frac{m^*v_x^2}{2kT}\right) dv_x$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{m^*v_y^2}{2kT}\right) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{m^*v_z^2}{2kT}\right) dv_z$$

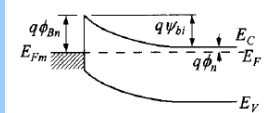


Termoemisja

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^* v_{0x}^2}{2kT}\right)$$

v_{0x} – minimalna prędkość niezbędna do pokonania bariery

$$\frac{1}{2} m^* v_{0x}^2 = q(\psi_{bi} - V)$$



$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$$

efektywna stała Richardsona dla termoemisji, $A=1.2 \cdot 10^6$ A/(m²K²)

WS 2008/2009



Termoemisja

prąd płynący w przeciwnym kierunku nie zależy od potencjału V, gdyż wysokość bariery nie zależy od tego potencjału

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right)$$

zatem całkowity prąd płynący w złączu

$$J_n = \left[A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = J_{TE} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_{TE} \equiv A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right)$$

WS 2008/2009



Metal-półprzewodnik

model termoemisji stosuje się do średnio domieszkowanych półprzewodników charakteryzujących się wysoką mobilnością nośników dla materiałów o niskich wartościach mobilności – prąd płynący w złączu jest głównie wynikiem dyfuzji

$$J_n \approx \frac{q^2 D_n N_C}{kT} \sqrt{\frac{2q N_D (\psi_{bi} - V)}{\epsilon_s}} \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$
$$\approx q \mu_n N_C \mathcal{E}_m \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = J_D \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

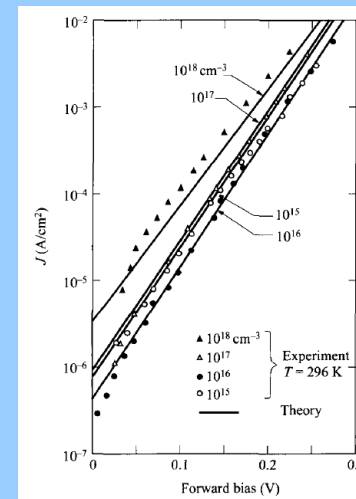
J_{TE} zależy silniej od temperatury, J_D zależy od przyłożonego napięcia

tunelowanie - w niskich temperaturach i wysokim domieszkowaniu

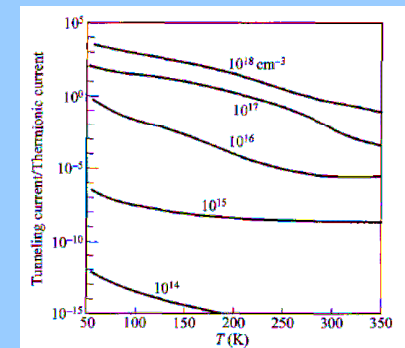
WS 2008/2009



Metal-półprzewodnik



złącze Au-Si



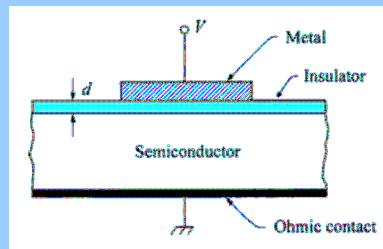
WS 2008/2009



MIS

MIS – metal-insulator-semiconductor
 propozycja teoretyczna - J. L. Moll, W. G. Pfann, C. G. B. Garrett – 1959 r.
 wytworzenie - J. R. Ligenza and W. G. Spitzer – 1960 r.

MOS – metal-oxide-semiconductor
 najpowszechniejszy – Si-SiO₂ – podstawowy element wykorzystywany
 w detektorach CCD

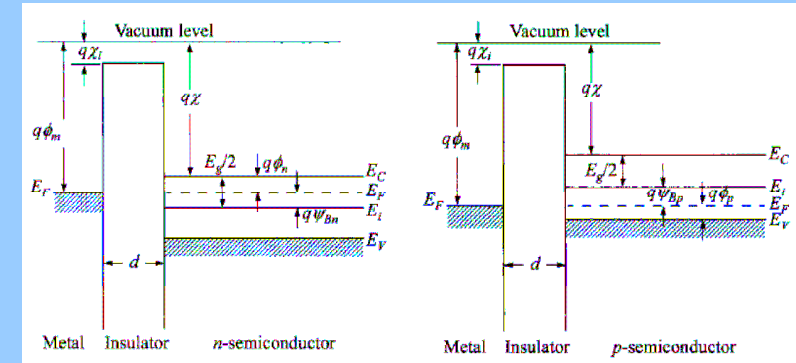


WS 2008/2009



Idealny MIS – układ pasm

stan równowagi termodynamicznej – stały poziom Fermiego
 przez warstwę izolatora nie płynie prąd
 ładunki znajdują się jedynie w półprzewodniku i metalu



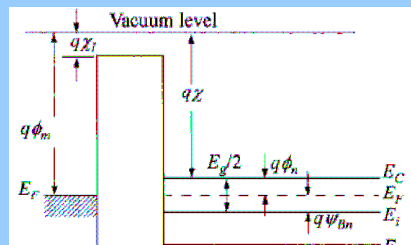
WS 2008/2009



Idealny MIS – układ pasm

zakładając dla uproszczenia, że różnica między pracą
 wyjścia dla metalu i półprzewodnika wynosi zero:

$$\phi_{ms} \equiv \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0$$



dla typu n

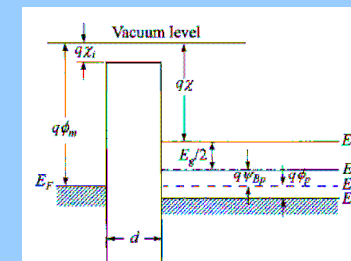
WS 2008/2009



Idealny MIS – układ pasm

zakładając dla uproszczenia, że różnica między pracą
 wyjścia dla metalu i półprzewodnika wynosi zero:

$$\phi_{ms} \equiv \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0$$



dla typu p

WS 2008/2009



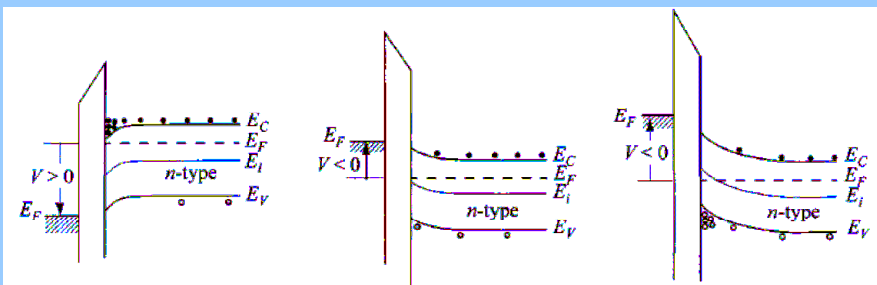
Idealny MIS – układ pasm

półprzewodnik typu n

akumulacja

zubożenie

inwersja



WS 2008/2009



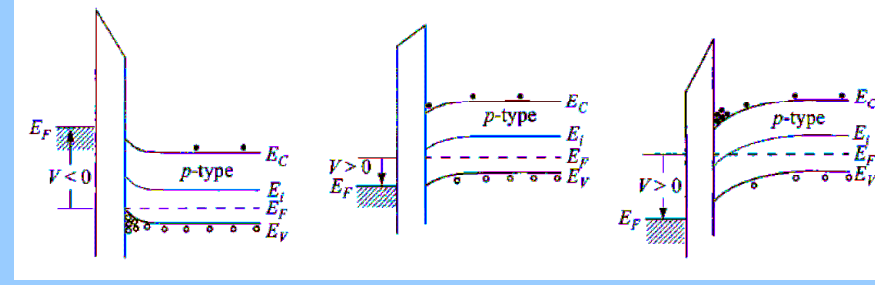
Idealny MIS – układ pasm

półprzewodnik typu p

akumulacja

zubożenie

inwersja



WS 2008/2009



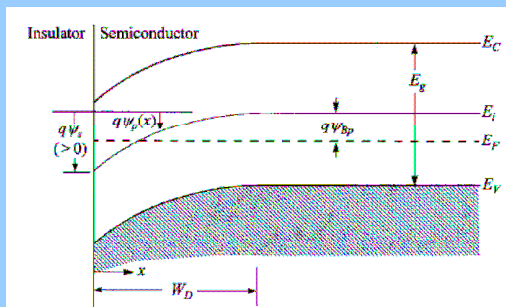
MIS dokładnie

półprzewodnik typu p

$\psi_s < 0$ akumulacja

$\psi_{Bp} > \psi_s > 0$ zubożenie

$\psi_s > \psi_{Bp}$ inwersja



potencjał

$$\psi_p(x) = -\frac{[E_i(x) - E_i(\infty)]}{q}$$

potencjał powierzchniowy

$$\psi_p(0) \equiv \psi_s$$

WS 2008/2009



MIS dokładnie

koncentracja nośników

$$n_p(x) = n_{po} \exp\left(\frac{q\psi_p}{kT}\right) = n_{po} \exp(\beta\psi_p)$$

n_{po} p_{po}

koncentracja elektronów i dziur w równowadze termodynamicznej (tj. w objętości półprzewodnika)

$$p_p(x) = p_{po} \exp\left(\frac{-q\psi_p}{kT}\right) = p_{po} \exp(-\beta\psi_p)$$

rozwiązanie równania Poissona

$$\frac{d^2 \psi_p}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p)$$

zjonizowane domieszki

WS 2008/2009



MIS dokładnie

warunek brzegowy: neutralność ładunku daleko od powierzchni

$$\psi_p(\infty) = 0 \quad \rho(x) = 0 \quad N_D^+ - N_A^- = n_{po} - p_{po}$$

równanie Poissona w obszarze zubożonym

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \psi_p}{dx^2} &= -\frac{q}{\epsilon_s} (n_{po} - p_{po} + p_p - n_p) \\ &= -\frac{q}{\epsilon_s} \{ p_{po} [\exp(-\beta\psi_p) - 1] - n_{po} [\exp(\beta\psi_p) - 1] \} \end{aligned}$$

rozwiązanie daje zależność między polem elektrycznym a potencjałem

WS 2008/2009



MIS dokładnie

zależność pola elektrycznego od potencjału $\mathcal{E} \equiv -d\psi_p/dx$

$$\mathcal{E}^2 = \left(\frac{2kT}{q}\right)^2 \left(\frac{qP_{po}\beta}{2\epsilon_s}\right) \left\{ [\exp(-\beta\psi_p) + \beta\psi_p - 1] + \frac{n_{po}}{p_{po}} [\exp(\beta\psi_p) - \beta\psi_p - 1] \right\}$$

wprowadzając oznaczenia

długość Debye'a $L_D \equiv \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{qP_{po}}} \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qP_{po}\beta}}$

$$F\left(\beta\psi_p, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \equiv \sqrt{[\exp(-\beta\psi_p) + \beta\psi_p - 1] + \frac{n_{po}}{p_{po}} [\exp(\beta\psi_p) - \beta\psi_p - 1]} \geq 0$$

otrzymujemy $\mathcal{E}(x) = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\beta\psi_p, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$

WS 2008/2009



MIS dokładnie

pole elektryczne na powierzchni $\mathcal{E}_s = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$

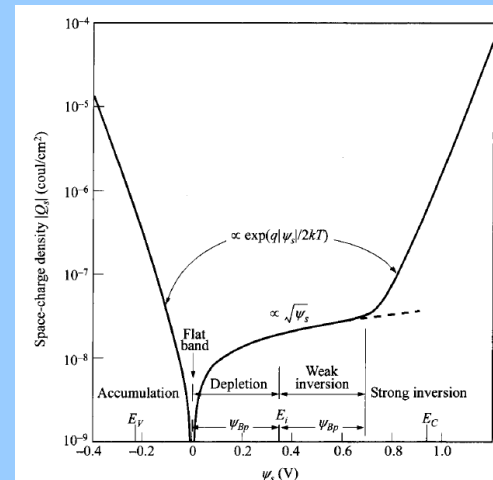
ładunek powierzchniowy $Q_s = -\epsilon_s \mathcal{E}_s = \mp \frac{\sqrt{2\epsilon_s kT}}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$

jak to wygląda?

WS 2008/2009



MIS dokładnie



krzem, p-typ
 $N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$
 $T = 300 \text{K}$

- $\psi_s < 0$ Accumulation of holes
- $\psi_s = 0$ Flat-band condition
- $\psi_{Bp} > \psi_s > 0$ Depletion of holes
- $\psi_s = \psi_{Bp}$ Fermi-level at midgap
- $2\psi_{Bp} > \psi_s > \psi_{Bp}$ Weak inversion
- $\psi_s > 2\psi_{Bp}$ Strong inversion

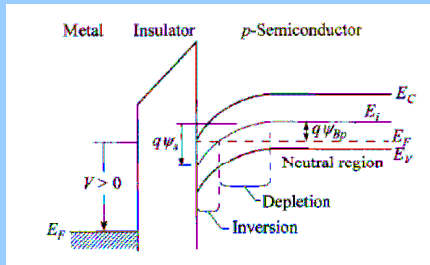
warunek silnej inwersji

$$\psi_s(\text{strong inversion}) \approx 2\psi_{Bp} \approx \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

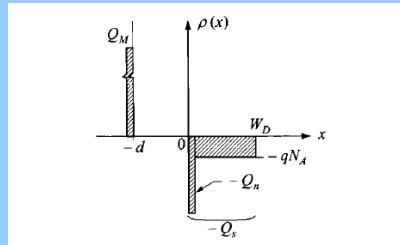
WS 2008/2009



MIS - silna inwersja



rozkład ładunku



$$Q_M = -(Q_n + qN_A W_D) = -Q_s$$

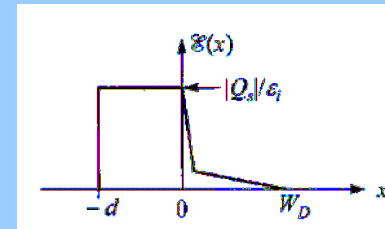
zachowanie ładunku



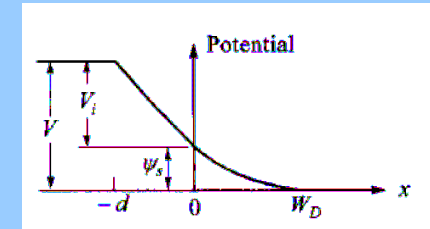
MIS - silna inwersja

całkując równanie Poissona

1 raz – pole elektryczne



2 razy – potencjał



$$V = V_i + \psi_s$$



Pojemność złącza

potencjał w izolatorze

$$V_i = \mathcal{E}_i d = \frac{|Q_s| d}{\epsilon_i} = \frac{|Q_s|}{C_i} \leftarrow \text{pojemność}$$

całkowita pojemność złącza:

pojemność dwóch połączonych szeregowo kondensatorów

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D}$$

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d} \quad \text{pojemność izolatora}$$

C_D pojemność warstwy zubożonej półprzewodnika, zależy od napięcia ψ_s oraz od częstotliwości



Pojemność złącza

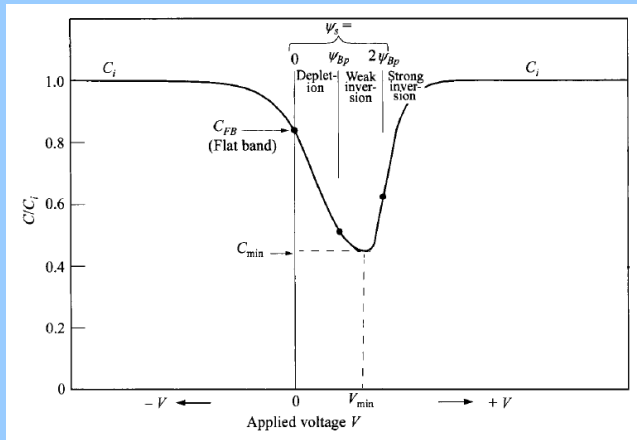
dla niskich częstotliwości – sytuacja kwazi-statyczna, pojemność jest zmianą ładunku przy zmianie napięcia z zachowaniem równowagi termodynamicznej

$$C_D \equiv \frac{dQ_s}{d\psi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{1 - \exp(-\beta\psi_s) + (n_{po}/p_{po})[\exp(\beta\psi_s) - 1]}{F(\beta\psi_s, n_{po}/p_{po})}$$

jak to wygląda?



Pojemność złącza



WS 2008/2009



Pojemność złącza

dla $\psi_s=0$ – rozwinięcie członów eksponentjalnych $C_D(\text{flat-band}) = \frac{\epsilon_s}{L_D}$

całkowita pojemność dla zerowego napięcia

$$C_{FB}(\psi_s = 0) = \frac{\epsilon_i \epsilon_s}{\epsilon_s d + \epsilon_i L_D} = \frac{\epsilon_i \epsilon_s}{\epsilon_s d + \epsilon_i \sqrt{kT \epsilon_s / N_A q^2}}$$

dla reżimu zubożonego

$$2\psi_{BP} > \psi_s > kT/q$$

$$F \approx \sqrt{\beta \psi_s} \quad Q_s = \sqrt{2 \epsilon_s q p_{p0} \psi_s} = q W_D N_A$$

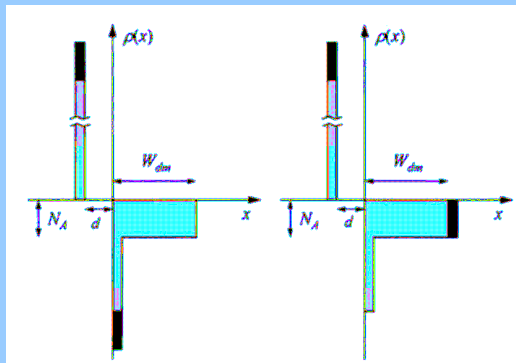
$$C_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s q p_{p0}}{2 \psi_s}}$$

WS 2008/2009



Pojemność MIS

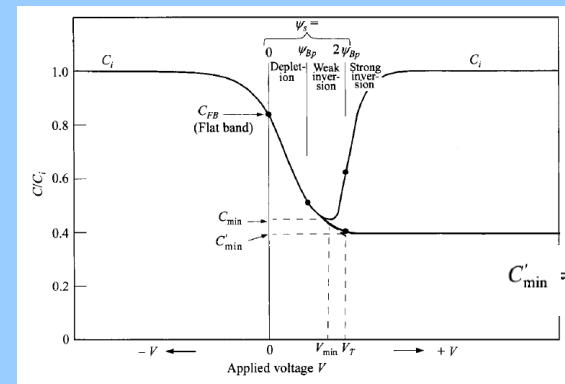
dla wysokich częstotliwości – sytuacja daleka od równowagi termodynamicznej, zmiana gęstości ładunku związana jest z akceptorami



WS 2008/2009



Pojemność MIS



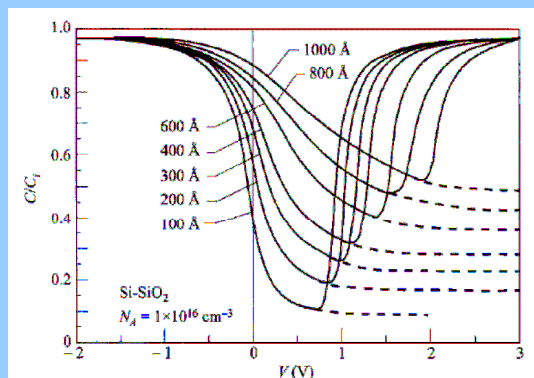
$$C'_{\min} = \frac{\epsilon_i \epsilon_s}{\epsilon_s d + \epsilon_i W_{Dm}}$$

WS 2008/2009



Pojemność MIS

zależność od grubości warstwy izolatora



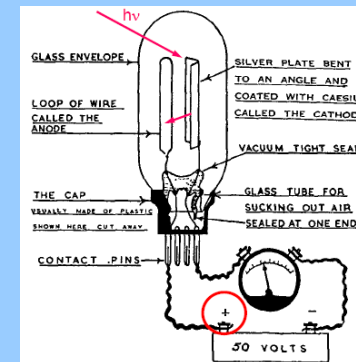
WS 2008/2009



Detektory fotonowe

fototuba

- efekt fotoelektryczny zewnętrzny
- elektron jest wybijany z fotokatody przez foton
- jeden foton – jeden elektron

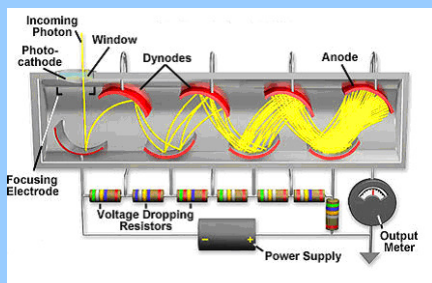


WS 2008/2009



Detektory fotonowe

- fotopowielacz
- efekt fotoelektryczny zewnętrzny
 - elektron jest wybijany z fotokatody przez foton
 - efekt powielenia dzięki dynodom
 - duża czułość, pojedyncze fotony



typowe fotokatody to metale o niskiej pracy wyjścia (Sb-Cs, Na-K-Sb)

wzmocnienie ~ 10¹²

QE ~ 30%

fotopowielacz zostanie omówiony dokładniej ☺

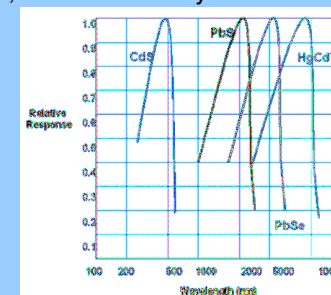
WS 2008/2009



Detektory fotonowe

fotokomórka/fotorezystor

- zmiana oporności półprzewodnika pod wpływem padającego promieniowania
- zakres widmowy zależy od półprzewodnika
- niska cena
- długi czas odpowiedzi, ułamek sekundy



WS 2008/2009



Detektory fotonowe

fotodioda

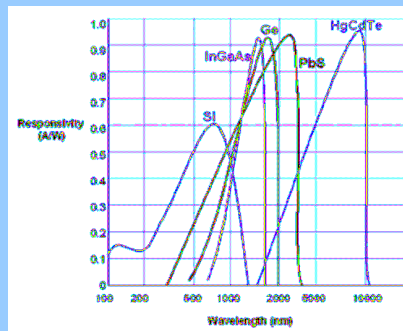
– generacja nośników w warstwie zubożonej i transport pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego zmiana

mod fotowoltaiczny

– brak przyłożonego napięcia, napięcie generowane światłem

mod fotoprzewodzący

- napięcie przyłożone w kierunku zaporowym, poszerzenie warstwy zubożonej, obszaru aktywnego detektora



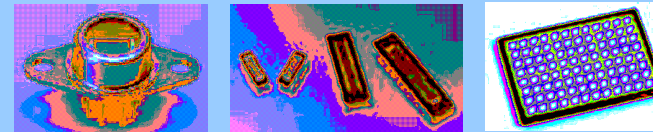
WS 2008/2009



Detektory fotonowe

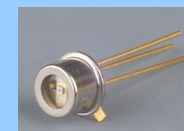
fotodioda

– generacja nośników w warstwie zubożonej i transport pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego zmiana



typy:

fotodioda pn
fotodioda pin
fotodioda Schottky'ego
fotodioda lawinowa



dokładne omówienie działania i zastosowań fotodiody wkrótce ☺

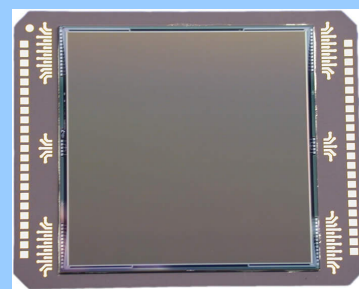
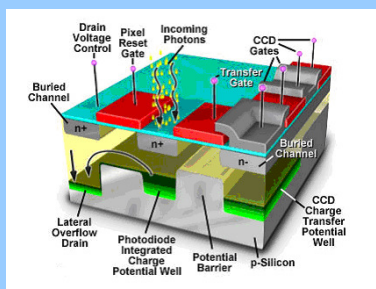
WS 2008/2009



Detektory fotonowe

kamera CCD

– urządzenie z przeniesieniem ładunku
– działanie oparte o kondensator MOS
– dwuwymiarowe matryce - obrazowanie



dokładne omówienie działania i zastosowań CCD wkrótce ☺

WS 2008/2009