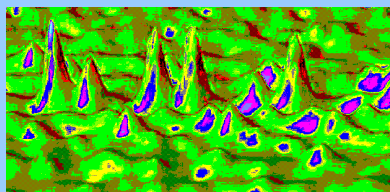




Detekcja światła



Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: czwartek 13-16

WS 2008/2009



Repeta z wykładu nr 4

$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$
 $\frac{T}{q} \mu_n$
 $p = n_i$

- struktura krystalograficzna, sieć odwrotna
- struktura pasmowa
- statystyka elektronów i dziur
- domieszkowanie
- transport w półprzewodnikach

WS 2008/2009



Plan na dzisiaj

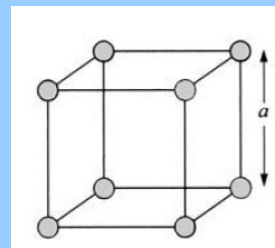
CONDUCTION BAND
 VALENCE BAND
 E_G
 E_C
 E_V
 E_t
 band-to-band recombination
 trap-assisted recombination
 Auger recombination
 n
 p
 E_C
 E_t
 E_F
 E_V
 qV_{bi}

WS 2008/2009



Dygresja

cubic (Po)



polon to jedyny pierwiastek, którego struktura krystaliczna jest prostym sześcianem

wynika to prawdopodobnie ze współzawodnictwa między efektem relatywistycznego zwiększenia masy elektronu a oddziaływaniem spin-orbita (więcej: Physics Today z sierpnia 2007 i w Physical Review Letters 99 (2007) 016402)

WS 2008/2009



Transport w półprzewodnikach

dryft – efekt przyłożenia zewnętrznego pola elektrycznego

$$\nu_n = -\frac{q \cdot \tau_c}{m_n} \mathcal{E} = -\mu_n \mathcal{E}$$

$$\nu_p = \frac{q \cdot \tau_c}{m_p} \mathcal{E} = \mu_p \mathcal{E}$$

μ – ruchliwość
parametr zależny od temperatury,
koncentracji, mechanizmów rozpraszania

dyfuzja – spontaniczne niwelowanie niejednorodności w gazie swobodnych elektronów lub dziur w zerowym polu elektrycznym

$$\mathbf{F}_n = -D_n \nabla n$$

F_n – strumień elektronów
 D_n – stała dyfuzji
 ∇n – gradient rozkładu elektronów

całkowita gęstość prądu

$$\mathbf{J}_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \nabla n$$

WS 2008/2009



Równanie Einsteina

zależność pomiędzy stałą dyfuzji a ruchliwością nośników

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n$$

przykład: wyprowadzenie relacji Einsteina dla przypadku złącza dwóch półprzewodników n – typu znajdujących się w równowadze termodynamicznej ($J_n=0$)

n_1, V_1

n_2, V_2

w równowadze termodynamicznej energia Fermiego jest stała

WS 2008/2009



Równanie Einsteina

$$\mathbf{J}_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \nabla n$$

$$\mu_n n \frac{\partial V}{\partial x} = -D_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} = -\frac{\mu_n}{D_n} \frac{\partial V}{\partial x}$$

wykonywając całkę od x_1 do x_2

$$\ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = -\frac{\mu_n}{D_n} (V_2 - V_1)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{\mu_n}{D_n} (V_2 - V_1)}$$

WS 2008/2009



Równanie Einsteina

z kolei ze statystyki Boltzmannna

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{e^{\frac{E_F - E_{i,2}}{kT}}}{e^{\frac{E_F - E_{i,1}}{kT}}} = e^{-\frac{E_{i,2} - E_{i,1}}{kT}} = e^{-q \frac{V_2 - V_1}{kT}}$$

porównanie obydwu wyrażeń prowadzi do równania Einsteina

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{q}{kT}$$

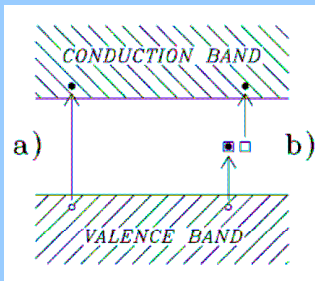
WS 2008/2009



Wzbudzenia w kryształach

zaburzenie równowagi termodynamicznej kryształu ($n_p \neq n_i^2$)

generacja termiczna bezpośrednia gdy $E_G \sim kT$, np. Ge
generacja termiczna pośrednia gdy $E_G > kT$, np. GaAs, Si



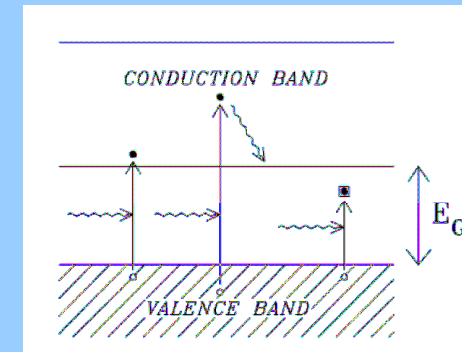
stany w przerwie energetycznej –
skutek występowania defektów
i domieszek w kryształe

WS 2008/2009



Wzbudzenia w kryształach

absorpcja promieniowania



WS 2008/2009



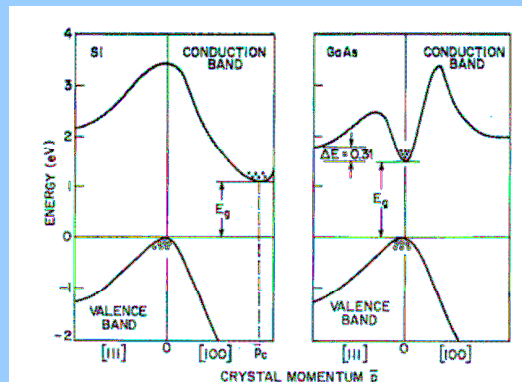
Wzbudzenia w kryształach

absorpcja promieniowania

przerwa skośna

przerwa prosta

konieczność dostarczenia
dodatkowego pędu
związanego z różnicą
wektorów falowych



WS 2008/2009



Pochłanianie

część energii promieniowania ulega odbiciu, typowo ~30%
redukcja tego efektu – pokrycie antyrefleksyjne (anti-reflective
coating) – zmniejszenie o ponad rząd wielkości



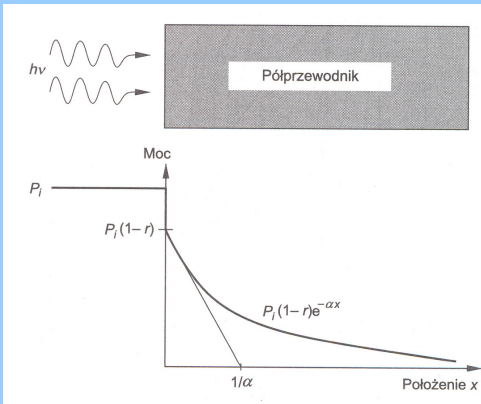
moc pochłaniana w półprzewodniku $P_a(x) = P_i(1-r)(1-e^{-\alpha x})$

P_i - moc padająca na powierzchnię kryształu
 α - współczynnik absorpcji
 $1/\alpha$ - głębokość wnikania promieniowania
 r - współczynnik odbicia

WS 2008/2009



Pochłanianie



liczba absorbowanych fotonów:
 $P/E=h\nu$

wydajność kwantowa η

liczba generowanych nośników
 przypadająca na liczbę
 padających fotonów

$$\eta(x) = (1 - r)(1 - e^{-\alpha x})$$

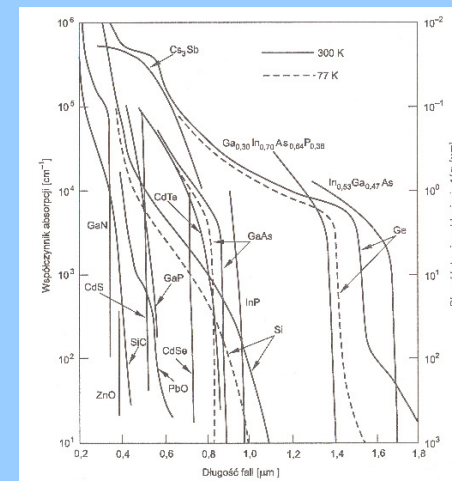
$$0 \leq \eta(x) \leq 1$$

WS 2008/2009



Pochłanianie

zakres widzialny
 i bliska podczerwień

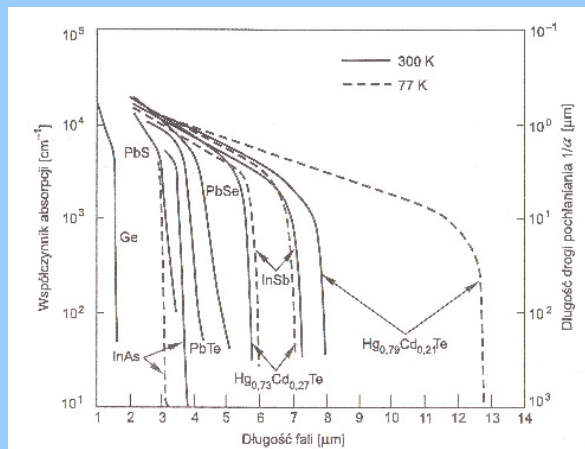


WS 2008/2009



Pochłanianie

podczerwień

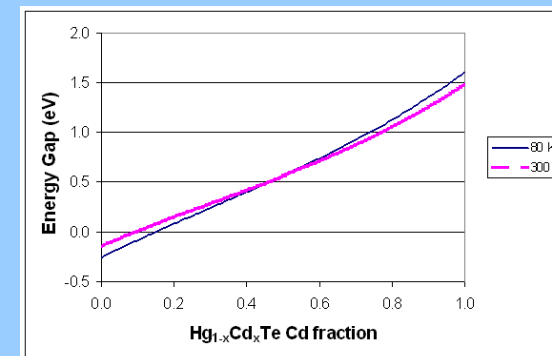


WS 2008/2009



Dygresja

HgCdTe – jeden z podstawowych materiałów do
 wytwarzania detektorów podczerwień

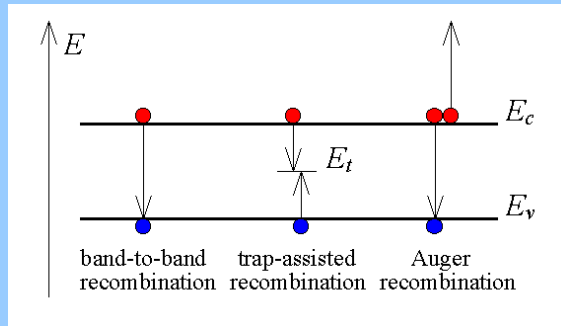


WS 2008/2009



Rekombinacja

zaburzenie równowagi termodynamicznej kryształu ($np \neq n_i^2$) prowadzi do wystąpienia procesów zmierzających do przywrócenia stanu równowagi



WS 2008/2009



Czas życia nośników

czas życia nośników (charge – carrier lifetime) – czas opisujący powrót do równowagi termodynamicznej

w równowadze termodynamicznej (domieszkowanie na typ p):
termiczna generacja par elektron-dziura G_{th} = rekombinacja R_{th}
koncentracja nośników (n, p) nie ulega zmianie

$$R = \beta np$$

$$R_{th} = G_{th} = \beta n_0 p_0 = \beta n_i^2$$

wtedy nadwyżkowa rekombinacja opisana jest współczynnikiem

$$U = R - R_{th} = \beta(np - n_i^2)$$

WS 2008/2009



Czas życia nośników

pod wpływem oświetlenia rośnie koncentracja elektronów i dziur (o Δn)

wtedy
$$R = \beta(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta n)$$

nadwyżkowa generacja par e-h

$$G_L = U = R - R_{th} = \beta \Delta n_L (p_0 + n_0 + \Delta n_L)$$

dla niewielkich natężeń promieniowania, czyli gdy ($\Delta n \ll p_0$)

$$G_L = \frac{\Delta n_L}{\tau_r}$$

$$\tau_r = \frac{1}{\beta p_0}$$

WS 2008/2009



Czas życia nośników

interpretacja czasu rekombinacji τ_r :

zamknięcie dodatkowego mechanizmu generacji powoduje że nadwyżkowa rekombinacja będzie związana z nadwyżką nośników mniejszościowych, w tym wypadku, elektronów

$$U = \frac{n - n_0}{\tau_r}$$

nadwyżka elektronów będzie zanikała zgodnie z zależnością

$$n_0 + \Delta n_L = n_0 + G_L \tau_r$$

innymi słowy, τ_r jest charakterystycznym czasem powrotu układu do stanu równowagi termodynamicznej

WS 2008/2009



Czas życia nośników

analogicznie można przeprowadzić analizę powrotu do równowagi dla przypadku przyłożonego pola elektrycznego

$$\tau_g = \frac{n_i}{G_{th}} = \frac{1}{\beta n_i}$$

przykład: obliczenie koncentracji nośników generowanych przez światło o energii 1.8 eV i mocy 10 mW/cm² dla płytki krzemowej domieszkowanej na typ n, koncentracja N_D 10¹⁷ cm⁻³. Współczynnik absorpcji: 10⁻³, czas życia nośników mniejszościowych 10 μs

generacja optyczna elektronów i dziur:

$$G_n = G_p = \alpha \frac{P_{opt}}{E_{ph} q} = 10^{-3} \frac{10^{-2}}{1.8 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} = 3.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

ostatecznie

$$\Delta n = \tau_p G_p = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 3.5 \cdot 10^{13} = 3.5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$



Typy rekombinacji

rekombinacja pasmo-pasmo

$$U_{b-b} = b(np - n_i^2)$$

rekombinacja na defektach i pułapkach

$$U_{SHR} = \frac{pn - n_i^2}{p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right)} N_t v_{th} \sigma$$

p >> n

$$U_n = R_n - G_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

rekombinacja powierzchniowa

$$U_{s,SHR} = \frac{pn - n_i^2}{p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_i - E_{st}}{kT}\right)} N_{st} v_{th} \sigma_s$$

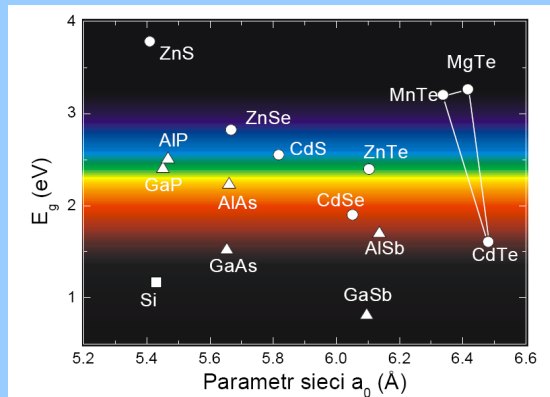
rekombinacja Auger

$$U_{Auger} = \Gamma_n n(np - n_i^2) + \Gamma_p p(np - n_i^2)$$



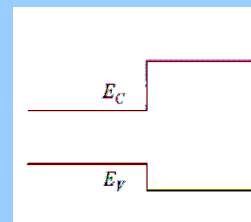
Heterozłącze

układ złożony z dwóch półprzewodników

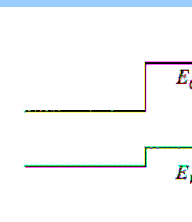


Heterozłącze

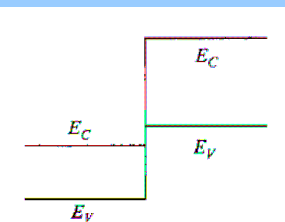
typ I



typ II

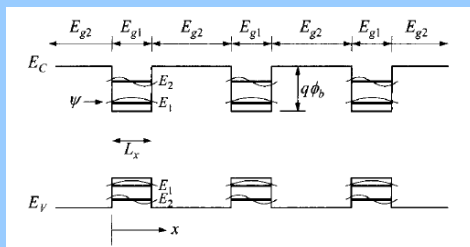


typ III

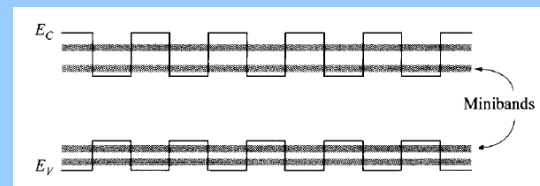




Studnia kwantowa



(wielo)studnia kwantowa
(multiple) quantum well



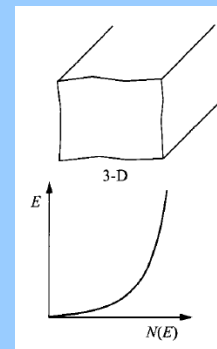
supersieć
superlattice

WS 2008/2009



Materiał objętościowy

materiał objętościowy
spektrum ciągłe



$$E - E_C = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

$$N(E) = \frac{m^* \sqrt{2m^* E}}{\pi^2 \hbar^3}$$

WS 2008/2009



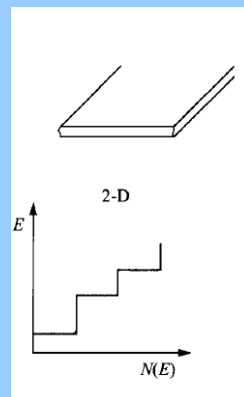
Studnia kwantowa

studnia kwantowa

kwantowanie energii w kierunku
prostopadłym do płaszczyzny studni

$$E_i = \frac{\hbar^2 \pi^2 i^2}{2m^* L_x^2}$$

$$N(E) = \frac{m^* i}{\pi \hbar^2 L_x}$$



WS 2008/2009



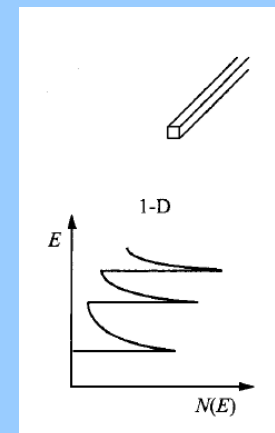
Drut kwantowy

drut kwantowy

kwantowanie energii w dwóch
kierunkach przestrzennych

$$E_{i,j} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left(\frac{i^2}{L_x^2} + \frac{j^2}{L_y^2} \right)$$

$$N(E) = \frac{\sqrt{2m^*}}{\pi \hbar L_x L_y} \sum_{i,j} (E - E_{i,j})^{-1/2}$$



WS 2008/2009



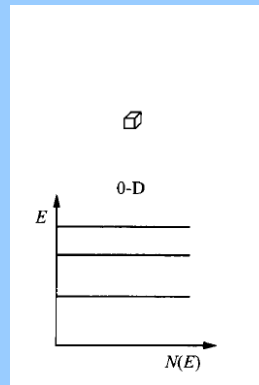
Kropka kwantowa

kropka kwantowa

kwantowanie energii we wszystkich trzech kierunkach przestrzennych: dyskretne poziomy energetyczne

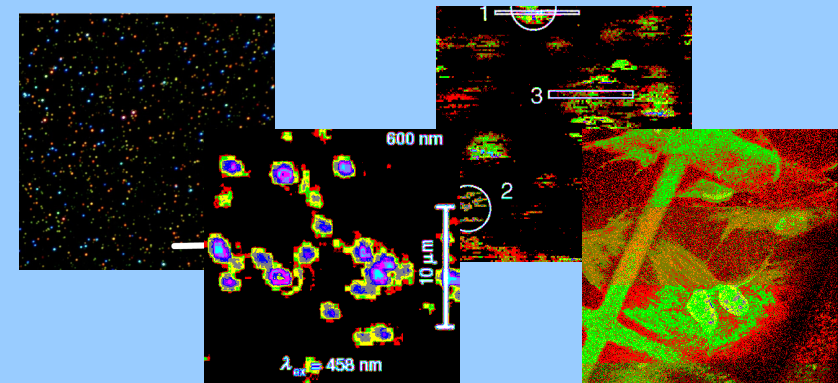
$$E_{i,j,k} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left(\frac{i^2}{L_x^2} + \frac{j^2}{L_y^2} + \frac{k^2}{L_z^2} \right)$$

$$N(E) = \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{i,j,k} \delta(E - E_{i,j,k})$$



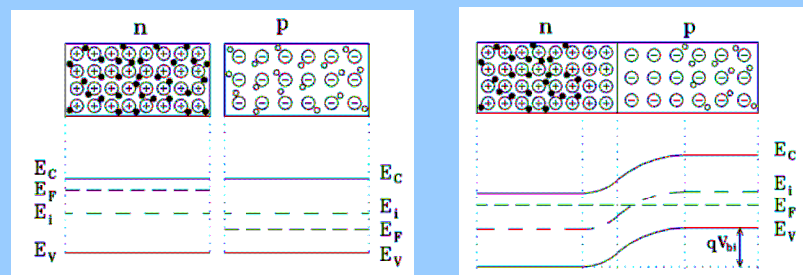
Reklama ☺

o strukturach kwantowych, ich otrzymywaniu, własnościach i zastosowaniach będzie można usłyszeć więcej na wykładzie monograficznym w semestrze letnim pt. Spektroskopia nanostruktur



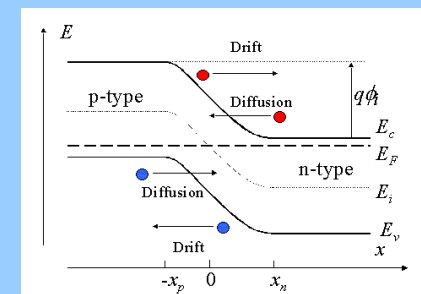
Złącze p-n

złącze p-n powstaje przez połączenie dwóch półprzewodników, z których jeden jest domieszkowany na typ p a drugi na typ n domieszki mają charakter płytkich donorów i akceptorów co zapewnia podobną koncentrację elektronów i dziur przy granicy



Złącze p-n

równowaga termodynamiczna osiągnięta jest poprzez dyfuzję nośników – następuje jonizacja domieszek, donorów i akceptorów zjonizowane domieszki powodują drijf nośników w przeciwnym kierunku aż do ustalenia się równowagi



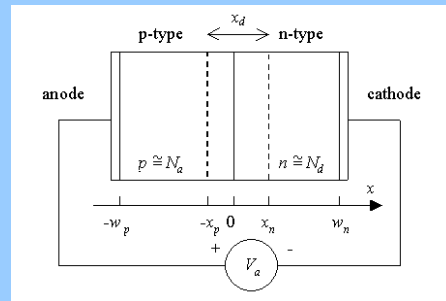
poziom Fermiego jest stały dla całego złącza

ϕ_i – potencjał wbudowany

$x_p - x_n$ – warstwa zubożona, na skutek jonizacji pozbawiona mobilnych ładunków



Złącze p-n



V_a - napięcie

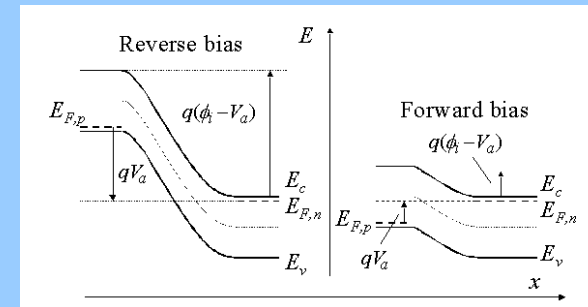
kierunek przewodzenia (forward) – napięcie dodatnie na anodzie
 kierunek zaporowy (reverse) – napięcie ujemne na anodzie



Złącze p-n

kierunek zaporowy

kierunek przewodzenia



Złącze p-n

przykład: obliczenie wbudowanego napięcia w złączu p-n w temperaturze pokojowej. Koncentracja donorów N_D 10^{12} cm^{-3} , koncentracja akceptorów N_A 10^{16} cm^{-3} .

napięcie wbudowane jest różnicą poziomów samoistnych w obu domieszkowanych fragmentach złącza

$$n_n = N_D = n_i e^{\frac{E_F - E_i^n}{kT}}$$

$$p_p = N_A = n_i e^{\frac{E_i^p - E_F}{kT}}$$

$$N_A \cdot N_D = n_i^2 e^{\frac{E_i^p - E_i^n}{kT}}$$

wtedy
$$V_{bi} = \frac{1}{q}(E_i^p - E_i^n) = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.458 \text{ V}$$