



Detekcja światła

Sebastian Maćkowski

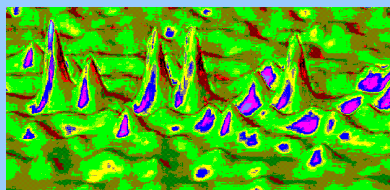
Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: czwartek 13-16


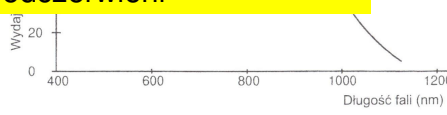


WS 2008/2009



Repeta z wykładu nr 3

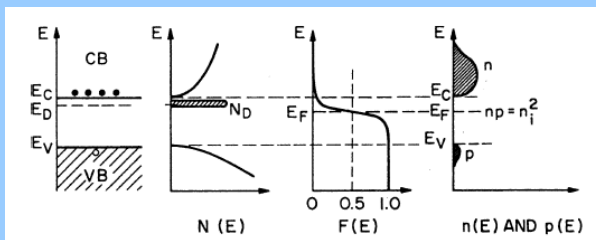
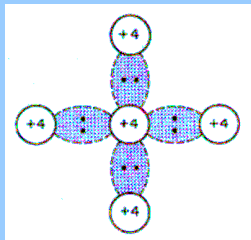
- definicja i parametry detektorów
- charakterystyka widmowa
- detektory termiczne: termopara, bolometr
- detektor piroelektryczny
- galeria obrazów w podczerwieni

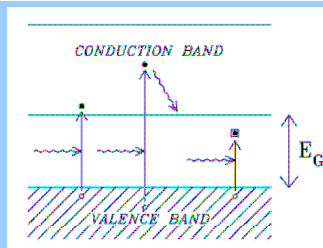
WS 2008/2009



Plan na dzisiaj



$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}}$$



WS 2008/2009



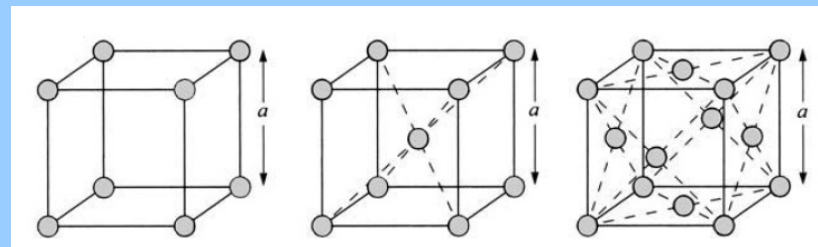
Struktura krystaliczna

proste komórki elementarne – sieci proste

cubic (Po)

bcc (Na, W)

fcc (Al, Au)

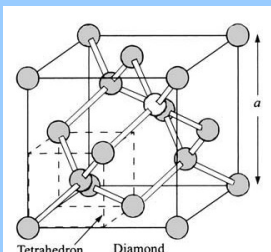


WS 2008/2009

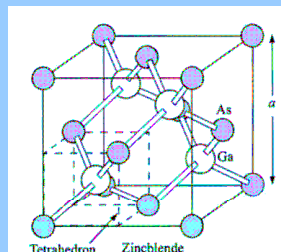


Struktura krystaliczna

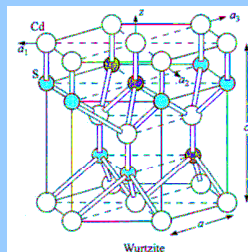
struktura diamentu
Si, Ge, C



struktura blendy cynkowej
GaAs, CdTe, ...



struktura wurcytu
GaN, CdS, ...

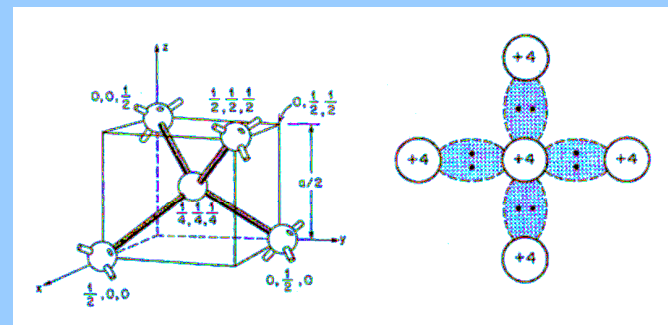


dwie sieci kubiczne powierzchniowo
centrowane przesunięte wobec siebie
o 1/4 długości przekątnej sześcianu

WS 2008/2009



Struktura krystaliczna

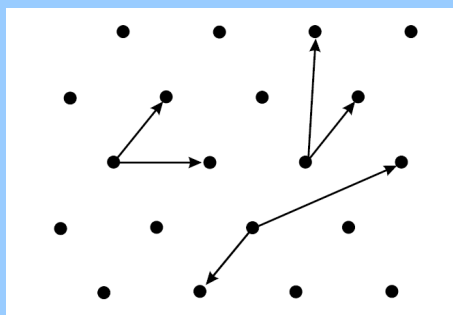


wiązania kowalencyjne z czterema najbliższymi sąsiedami
wiązanie uwspólnia dwa elektrony o przeciwnych spinach

WS 2008/2009



Sieć punktowa



trójwymiarowa sieć Bravais

$$R = ma + nb + pc$$

a, b, c – wektory jednostkowe
m, n, p – liczby całkowite

WS 2008/2009



Sieć odwrotna

wektory bazowe sieci odwrotnej **a***, **b***, **c***

$$a^* \equiv 2\pi \frac{b \times c}{a \cdot b \times c}$$

$$b^* \equiv 2\pi \frac{c \times a}{a \cdot b \times c}$$

$$c^* \equiv 2\pi \frac{a \times b}{a \cdot b \times c}$$

$$a \cdot a^* = 2\pi, a \cdot b^* = 0$$

$$a \cdot b \times c = b \cdot c \times a = c \cdot a \times b$$

objętość komórki elementarnej

trójwymiarowa sieć odwrotna

$$G = ha^* + kb^* + lc^*$$

h, k, l – wskaźniki Millera

WS 2008/2009



Sieć odwrotna

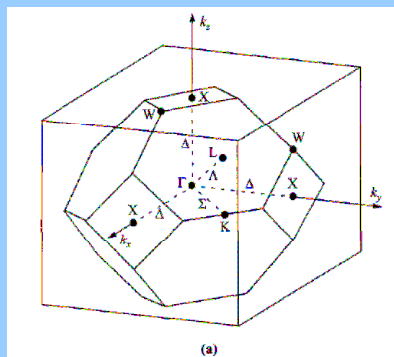
konsekwencje:

wektor sieci odwrotnej (hkl)* jest prostopadły do płaszczyzny sieciowej (hkl) sieci punktowej

objętość komórki elementarnej sieci odwrotnej jest odwrotnie proporcjonalna do objętości komórki elementarnej sieci prostej

$$V_c^* = (2\pi)^3 / V_c$$

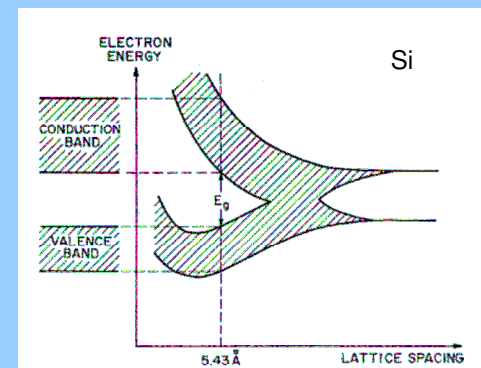
$$V_c \equiv \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}$$



strefa Brillouina dla sieci fcc, diamentu i blendy cynkowej



Pasma energetyczne



minimum całkowitej energii elektronów

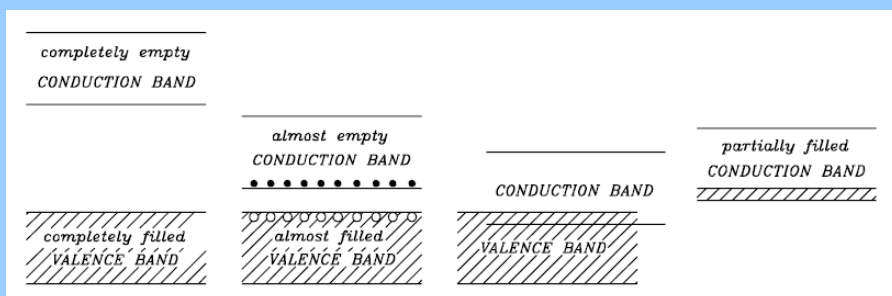


Pasma energetyczne

izolator

półprzewodnik

przewodnik/metal



Struktura pasmowa

równanie Schrödingera dla elektronu w potencjale $V=V(r)$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = E(\mathbf{k}) \psi(\mathbf{r}, \mathbf{k})$$

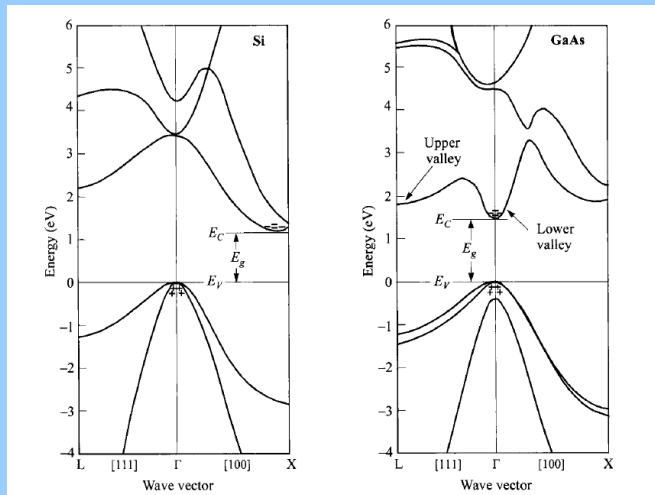
dla potencjału $V=V(r)$ periodycznego z okresem sieci Blocha

$$\psi(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) U_b(\mathbf{r}, \mathbf{k})$$

$\exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ – fala płaska, wolnozmienna w skali całej sieci
 $\psi(\mathbf{r}, \mathbf{k})$ i $U_b(\mathbf{r}, \mathbf{k})$ – funkcje periodyczne z okresem sieci



Struktura pasmowa



$$E = E(k)$$

pasmo przewodnictwa

pasmo walencyjne

WS 2008/2009



Struktura pasmowa

w pobliżu centrum strefy Brillouina (punkt Γ , $k=0$)

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad \text{zależność paraboliczna}$$

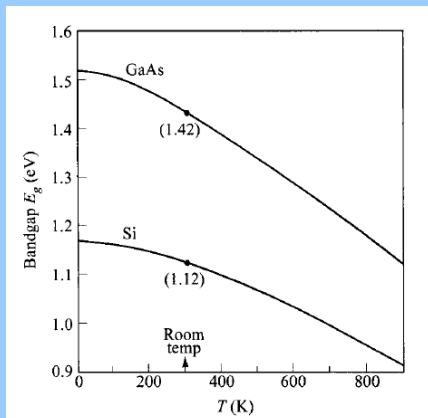
m^* - masa efektywna, w ogólności wielkość tensorowa

$$\frac{1}{m_{ij}^*} \equiv \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k_i \partial k_j}$$

WS 2008/2009



Zależność przerwy od T



	$E_g(0)$ (eV)	α (eV/K)	β (K)
GaAs	1.519	5.4×10^{-4}	204
Si	1.169	4.9×10^{-4}	655

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

wzrost temperatury skutkuje zmniejszeniem przerwy energetycznej

WS 2008/2009



Własności półprzewodników

Semiconductor	Crystal Struct.	Lattice Const. at 300 K (Å)	Bandgap (eV)		Band	Mobility at 300 K (cm ² /V·s)		Effective Mass		ϵ_s/ϵ_0
			300 K	0 K		μ_n	μ_p	m_n^*/m_0	m_p^*/m_0	
C Carbon (diamond)	D	3.56683	5.47	5.48	I	1,800	1,200	0.2	0.25	5.7
Ge Germanium	D	5.64613	0.66	0.74	I	3,900	1,900	$1.64^l, 0.082^t$	$0.04^{lh}, 0.28^{hh}$	16.0
Si Silicon	D	5.43102	1.12	1.17	I	1,450	500	$0.98^l, 0.19^t$	$0.16^{lh}, 0.49^{hh}$	11.9
IV-IV SiC Silicon carbide	W	$a=3.086, c=15.117$	2.996	3.03	I	400	50	0.60	1.00	9.66
III-V AlAs Aluminum arsenide	Z	5.6605	2.36	2.23	I	180		0.11	0.22	10.1
AlP Aluminum phosphide	Z	5.4635	2.42	2.51	I	60	450	0.212	0.145	9.8
AlSb Aluminum antimonide	Z	6.1355	1.58	1.68	I	200	420	0.12	0.98	14.4
BN Boron nitride	Z	3.6157	6.4		I	200	500	0.26	0.36	7.1
"	W	$a=2.55, c=4.17$	5.8		D			0.24	0.88	6.85
BP Boron phosphide	Z	4.5383	2.0		I	40	500	0.67	0.042	11
GaAs Gallium arsenide	Z	5.6533	1.42	1.52	D	8,000	400	0.063	$0.076^{lh}, 0.5^{hh}$	12.9
GaN Gallium nitride	W	$a=3.189, c=5.182$	3.44	3.50	D	400	10	0.27	0.8	10.4
GaP Gallium phosphide	Z	5.4512	2.26	2.34	I	110	75	0.82	0.60	11.1
GaSb Gallium antimonide	Z	6.0959	0.72	0.81	D	5,000	850	0.042	0.40	15.7
InAs Indium arsenide	Z	6.0584	0.36	0.42	D	33,000	460	0.023	0.40	15.1
InP Indium phosphide	Z	5.8686	1.35	1.42	D	4,600	150	0.077	0.64	12.6
InSb Indium antimonide	Z	6.4794	0.17	0.23	D	80,000	1,250	0.0145	0.40	16.8
II-VI CdS Cadmium sulfide	Z	5.825	2.5		D			0.14	0.51	5.4
"	W	$a=4.136, c=6.714$	2.49		D	350	40	0.20	0.7	9.1
CdSe Cadmium selenide	Z	6.050	1.70	1.85	D	800		0.13	0.45	10.0
CdTe Cadmium telluride	Z	6.482	1.56		D	1,050	100			10.2
ZnO Zinc oxide	R	4.580	3.35	3.42	D	200	180	0.27		9.0
ZnS Zinc sulfide	Z	5.410	3.66	3.84	D	600		0.39	0.23	8.4
"	W	$a=3.822, c=6.26$	3.78		D	280	800	0.287	0.49	9.6
IV-VI PbS Lead sulfide	R	5.9362	0.41	0.286	I	600	700	0.25	0.25	17.0
PbTe Lead telluride	R	6.4620	0.31	0.19	I	6,000	4,000	0.17	0.20	30.0

D = Diamond, W = Wurtzite, Z = Zincblende, R = Rock salt. I, D = Indirect, direct bandgap. l, t, lh, hh = Longitudinal, transverse, light-hole, heavy-hole effective mass.

WS 2008/2009



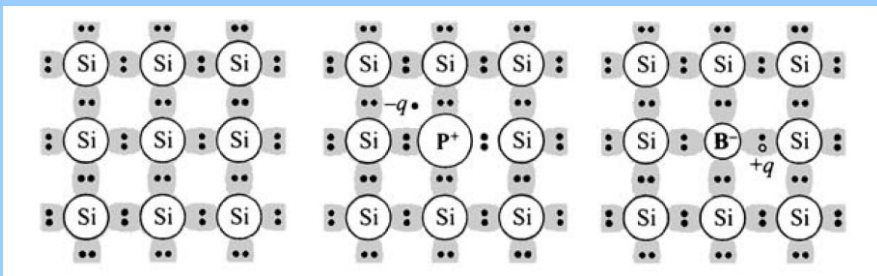
Typy półprzewodników

półprzewodnik
samoistny (*intrinsic*)

półprzewodnik
domieszkowy (*extrinsic*)

typ n

typ p



WS 2008/2009



Podstawowe definicje

liczba elektronów n

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N(E)F(E)dE$$

$N(E)$ - gęstość stanów

$F(E)$ - rozkład obsadzeń

$$N(E) = M_C \frac{\sqrt{2} m_{de}^{3/2} (E - E_C)^{1/2}}{\pi^2 \hbar^3}$$

dla niewielkich koncentracji
i niskich temperatur oraz tylko
przy dnie pasma przewodnictwa

M_C - liczba równoważnych minimów pasma przewodnictwa

dla Si - $M_C = 6$, dla GaAs - $M_C = 1$

m_{de} - masa efektywna gęstości stanów

$$m_{de} = (m_1^* m_2^* m_3^*)^{1/3}$$

WS 2008/2009



Podstawowe definicje

$F(E)$ - rozkład obsadzeń

dla elektronów - statystyka Fermiego - Diraca

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F)/kT]}$$

E_F - poziom Fermiego - energia
dla której prawdopodobieństwo
znalezienia elektronu wynosi 1/2

wówczas $n(E)$:

$$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C}{kT} \right)$$

efektywna gęstość stanów
w paśmie przewodnictwa

$$N_C \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_{de} kT}{h^2} \right)^{3/2} M_C$$

całka Fermiego-Diraca

$$F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C}{kT} \right) = \int_{E_C}^{\infty} \frac{[(E - E_C)/kT]^{1/2} dE}{1 + \exp[(E - E_F)/kT] kT}$$

WS 2008/2009



Podstawowe definicje

przypadek bez degeneracji - koncentracja

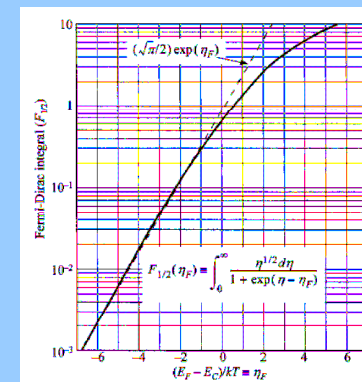
domieszek jest dużo mniejsza niż N_C

⇒ Poziom Fermiego znajduje się kilka razy kT
poniżej krawędzi pasma

$$F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C}{kT} \right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp \left(- \frac{E_C - E_F}{kT} \right)$$

liczba elektronów n

$$n = N_C \exp \left(- \frac{E_C - E_F}{kT} \right)$$



WS 2008/2009



Podstawowe definicje

liczba dziur p

$$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2} \left(\frac{E_V - E_F}{kT} \right)$$

uproszczenie

$$p = N_V \exp \left(- \frac{E_F - E_V}{kT} \right)$$

$$N_V \equiv 2 \left(\frac{2 \pi m_{dh} kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

WS 2008/2009



Podstawowe definicje

przypadek półprzewodnika zdegenerowanego

typ n

$$E_F - E_C \approx kT \left[\ln \left(\frac{n}{N_C} \right) + 2^{-3/2} \left(\frac{n}{N_C} \right) \right]$$

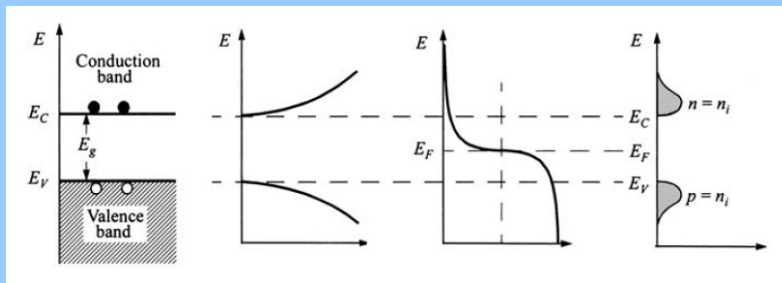
typ p

$$E_V - E_F \approx kT \left[\ln \left(\frac{p}{N_V} \right) + 2^{-3/2} \left(\frac{p}{N_V} \right) \right]$$

WS 2008/2009



Półprzewodnik samoistny



stan równowagi między termiczną aktywacją nośników a rekombinacją elektronów i dziur

$$n = p$$

WS 2008/2009



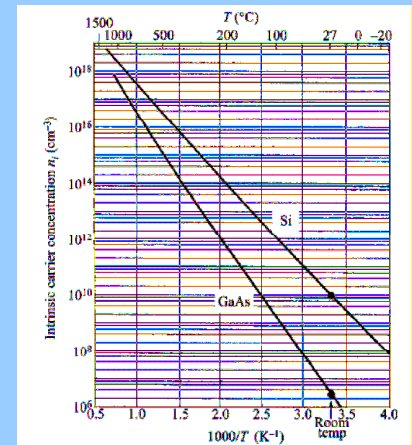
Półprzewodnik samoistny

$$E_F = E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$$

$$n_i = N_C \exp \left(- \frac{E_C - E_i}{kT} \right) =$$

$$N_V \exp \left(- \frac{E_i - E_V}{kT} \right) =$$

$$\sqrt{N_C N_V} \exp \left(- \frac{E_g}{2kT} \right)$$



WS 2008/2009



Półprzewodnik samoistny

warto zapamiętać

$$pn = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

WS 2008/2009



Półprzewodnik samoistny

przykład: skalowanie samoistnej koncentracji nośników w Ge, Si, GaAs

stała Boltzmann

$$8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$\frac{n_i(T)}{n_i(300 \text{ K})} = \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{E_G(T)}{2kT}\right)}{\exp\left(-\frac{E_G(300 \text{ K})}{2k \cdot 300}\right)}$$

	Si	Ge	GaAs
E_G [eV]	1.12	0.67	1.35
dE_G/dT [eV/K]	-2.3×10^{-4}	-3.7×10^{-4}	-5.0×10^{-4}
$n_i(300 \text{ K})$ [cm^{-3}]	1.45×10^{10}	2.4×10^{13}	1.79×10^6

$$\frac{n_i(T)}{n_i(300 \text{ K})} = \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} e^{-\frac{E_G(300 \text{ K})}{2k \cdot 300} (300/T-1)} e^{\frac{1}{2k} \frac{\partial E_G}{\partial T} (300/T-1)}$$

WS 2008/2009



Półprzewodnik samoistny

	Si	Ge	GaAs
$T = 300 \text{ K}$			
$n_i(300 \text{ K})$ [cm^{-3}]	1.45×10^{10}	2.4×10^{13}	1.79×10^6
$T = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$	$\left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} =$	0.8681	
$e^{-\frac{E_G(300 \text{ K})}{2k \cdot 300} (300/T-1)}$	0.1175	0.278	0.076
$e^{\frac{1}{2k} \frac{\partial E_G}{\partial T} (300/T-1)}$	0.8764	0.809	0.751
$n_i(273 \text{ K})$ [cm^{-3}]	1.30×10^9	4.68×10^{12}	8.83×10^4
$T = 77 \text{ K}$	$\left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} =$	0.130	
$e^{-\frac{E_G(300 \text{ K})}{2k \cdot 300} (300/T-1)}$	5.80×10^{-28}	5.09×10^{-17}	1.48×10^{-33}
$e^{\frac{1}{2k} \frac{\partial E_G}{\partial T} (300/T-1)}$	0.021	0.002	2.25×10^{-4}
$n_i(77 \text{ K})$ [cm^{-3}]	2.30×10^{-20}	3.17×10^{-7}	7.74×10^{-32}

WS 2008/2009



Domieszkowanie

atom wodoru $E_H = \frac{m_0 q^4}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} = 13.6 \text{ eV}$

domieszka donorowa w półprzewodniku $m_0 \Rightarrow m_e$ $\epsilon_0 \Rightarrow \epsilon_s$

$$E_C - E_D = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_s}\right)^2 \left(\frac{m_{ce}}{m_0}\right) E_H$$

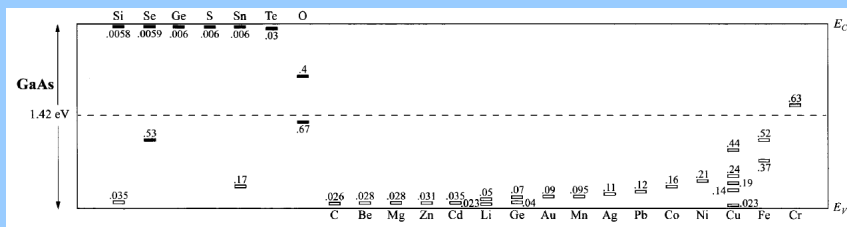
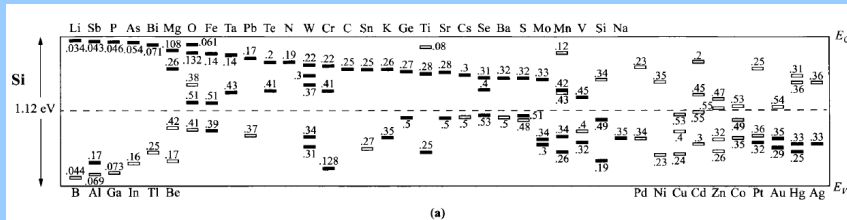
dla krzemu: 0.025 eV; dla arsenku galu: 0.007 eV

energie porównywalne z energią termiczną: w 300 K – płytkie donory są praktycznie całkowicie zjonizowane

WS 2008/2009



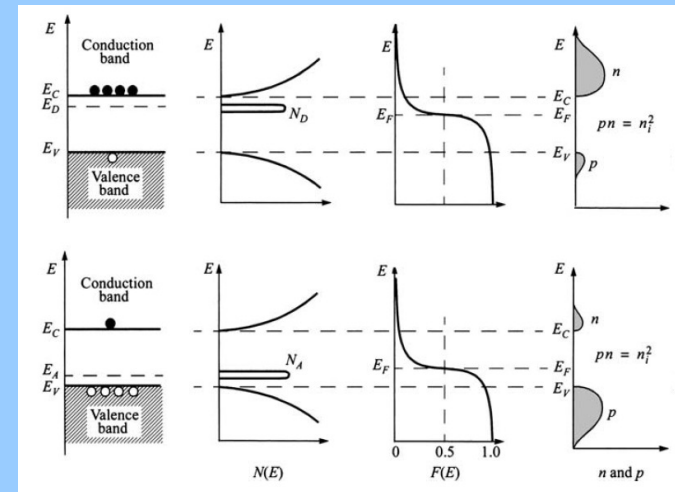
Domieszkowanie



WS 2008/2009



Domieszkowanie



WS 2008/2009



Domieszkowanie

koncentracja zjonizowanych donorów

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + g_D \exp[(E_F - E_D)/kT]}$$

$g_D=2$, bo spin

koncentracja zjonizowanych akceptorów

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + g_A \exp[(E_A - E_F)/kT]}$$

$g_A=4$, bo spin i degeneracja

WS 2008/2009



Domieszkowanie

koncentracja donorów N_D , wówczas z warunku neutralności ładunku:

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

wynika, że:

$$n = N_D^+ + p \approx N_D^+$$

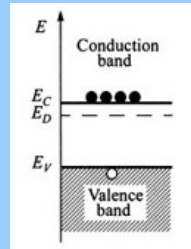
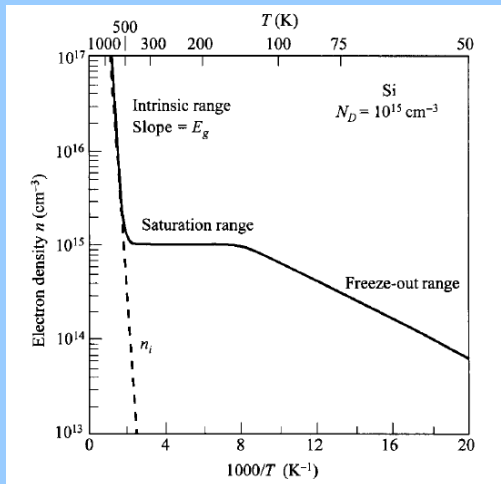
$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \approx \frac{N_D}{1 + 2 \exp[(E_F - E_D)/kT]}$$

z tej zależności można wyznaczyć poziom energii Fermiego i koncentrację nośników

WS 2008/2009



Domieszkowanie



WS 2008/2009



Transport w półprzewodnikach

nośniki w paśmie walencyjnym lub przewodnictwa nie są związane z żadnym atomem, węzłem sieci krystalicznej, są swobodnymi nośnikami

średnia energia kinetyczna wynosi $3/2 kT$

średnia prędkość w temperaturze pokojowej wynosi 10^7 cm/s

wskutek rozproszeń na domieszkach, neutralnych i zjonizowanych, na drganiach sieci krystalicznej, fononach, na defektach średnia droga swobodna (odcinek między dwoma zderzeniami) wynosi 10^{-5} cm, a średni czas swobodny 10^{-12} s

WS 2008/2009



Transport w półprzewodnikach

dryft – efekt przyłożenia zewnętrznego pola elektrycznego

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

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

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

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



Relacja Einsteina

zależność pomiędzy stałą dyfuzji a ruchliwością nośników

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

WS 2008/2009