



Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptaak

Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113
konsultacje: pn. – cz. 11-12



Plan wykładu



Fizyka półprzewodników, złącze P-N

- Materiały półprzewodnikowe
- Pasmowy model przewodnictwa
- Półprzewodnik samoistny
- Półprzewodniki – statystyka
- Półprzewodniki domieszkowane
- Przewodnictwo elektryczne półprzewodników
- Złącze P-N



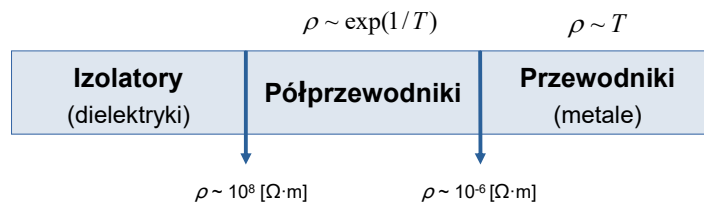
Materiały półprzewodnikowe



Podział materiałów ze względu na przewodnictwo elektryczne (rezystywność).

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}$$

ρ – rezystywność [$\Omega \cdot m$]
 σ – konduktywność [$1/(\Omega \cdot m)$]



Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

3



Materiały półprzewodnikowe



UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW CHEMICZNYCH

Elektryczność wg Paulinga: 2,4 196,96655
Liczba atomowa: 79 23
Symbol chemiczny: Au
Nazwa pierwiastka: Złoto
Charakter tenki przy typowej wartościowości: (kwasowy, zasadowy)
Masa atomowa: 196,96655
Wartośćowość: (rzadko spotykana, typowa)
Pewność elektronowa: (lub funkcjonalna nazwa utworzona zgodnie z regułami nazewnictwa systematycznego)

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1 H Wodór	2 He Hel	13 B Bor	14 C Węgiel	15 N Azot	16 O Tlen	17 F Fluor	18 Ne Neon
3 Li Lit	4 Be Beryl	5 Bor	6 C Węgiel	7 N Azot	8 O Tlen	9 F Fluor	10 Ne Neon
11 Na Sód	12 Mg Magnez	13 Al Alumini	14 Si Krzem	15 P Fosfor	16 S Siarka	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
19 K Potas	20 Ca Wapń	21 Sc Skand	22 Ti Tytan	23 V Wanad	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Żelazo
37 Rb Rubid	38 Sr Stront	39 Y Yttr	40 Zr Cyrkon	41 Nb Niob	42 Mo Molibden	43 Tc Technet	44 Ru Ruten
55 Cs Cez	56 Ba Baryt	57 La Lantan	58 Ce Cer	59 Pr Prasodym	60 Nd Neodym	61 Pm Promet	62 Sm Samar
87 Fr Franc	88 Ra Radium	89 Ac Aktyn	90 Th Tor	91 Pa Protaktyn	92 U Uran	93 Np Neptun	94 Pu Płon
119 Uue Ununenn	120 Ubn Unbin	121 Ubu Unbin	122 Ubb Unbin	123 Ubc Unbin	124 Ubd Unbin	125 Ube Unbin	126 Ubf Unbin

Grupy i szeregi:
Metale ziem alkalicznych, Metale przejściowe, Metaloizy, Halogeny, Lantanowce, Półprzewodniki, Izolatory, Aktywne, Metale grup głównych, Niemetale, Szeregi s, d, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, t, u, v, w, x, y, z, aa, ab, ac, ad, ae, af, ag, ah, ai, aj, ak, al, am, an, ao, ap, aq, ar, as, at, au, av, aw, ax, ay, az, ba, bb, bc, bd, be, bf, bg, bh, bi, bj, bk, bl, bm, bn, bo, bp, bq, br, bs, bt, bu, bv, bw, bx, by, bz, ca, cb, cc, cd, ce, cf, cg, ch, ci, cj, ck, cl, cm, cn, co, cp, cq, cr, cs, ct, cu, cv, cw, cx, cy, cz, da, db, dc, dd, de, df, dg, dh, di, dj, dk, dl, dm, dn, do, dp, dq, dr, ds, dt, du, dv, dw, dx, dy, dz, ea, eb, ec, ed, ee, ef, eg, eh, ei, ej, ek, el, em, en, eo, ep, eq, er, es, et, eu, ev, ew, ex, ey, ez, fa, fb, fc, fd, fe, ff, fg, fh, fi, fj, fk, fl, fm, fn, fo, fp, fq, fr, fs, ft, fu, fv, fw, fx, fy, fz, ga, gb, gc, gd, ge, gf, gg, gh, gi, gj, gk, gl, gm, gn, go, gp, gq, gr, gs, gt, gu, gv, gw, gx, gy, gz, ha, hb, hc, hd, he, hf, hg, hh, hi, hj, hk, hl, hm, hn, ho, hp, hq, hr, hs, ht, hu, hv, hw, hx, hy, hz, ia, ib, ic, id, ie, if, ig, ih, ii, ij, ik, il, im, in, io, ip, iq, ir, is, it, iu, iv, iw, ix, iy, iz, ja, jb, jc, jd, je, jf, jg, jh, ji, jj, jk, jl, jm, jn, jo, jp, jq, jr, js, jt, ju, jv, jw, jx, jy, jz, ka, kb, kc, kd, ke, kf, kg, kh, ki, kj, kk, kl, km, kn, ko, kp, kq, kr, ks, kt, ku, kv, kw, kx, ky, kz, la, lb, lc, ld, le, lf, lg, lh, li, lj, lk, ll, lm, ln, lo, lp, lq, lr, ls, lt, lu, lv, lw, lx, ly, lz, ma, mb, mc, md, me, mf, mg, mh, mi, mj, mk, ml, mm, mn, mo, mp, mq, mr, ms, mt, mu, mv, mw, mx, my, mz, na, nb, nc, nd, ne, nf, ng, nh, ni, nj, nk, nl, nm, nn, no, np, nq, nr, ns, nt, nu, nv, nw, nx, ny, nz, oa, ob, oc, od, oe, of, og, oh, oi, oj, ok, ol, om, on, oo, op, oq, or, os, ot, ou, ov, ow, ox, oy, oz, pa, pb, pc, pd, pe, pf, pg, ph, pi, pj, pk, pl, pm, pn, po, pp, pq, pr, ps, pt, pu, pv, pw, px, py, pz, qa, qb, qc, qd, qe, qf, qg, qh, qi, qj, qk, ql, qm, qn, qo, qp, qq, qr, qs, qt, qu, qv, qw, qx, qy, qz, ra, rb, rc, rd, re, rf, rg, rh, ri, rj, rk, rl, rm, rn, ro, rp, rq, rr, rs, rt, ru, rv, rw, rx, ry, rz, sa, sb, sc, sd, se, sf, sg, sh, si, sj, sk, sl, sm, sn, so, sp, sq, sr, ss, st, su, sv, sw, sx, sy, sz, ta, tb, tc, td, te, tf, tg, th, ti, tj, tk, tl, tm, tn, to, tp, tq, tr, ts, tt, tu, tv, tw, tx, ty, tz, ua, ub, uc, ud, ue, uf, ug, uh, ui, uj, uk, ul, um, un, uo, up, uq, ur, us, ut, uu, uv, uw, ux, uy, uz, va, vb, vc, vd, ve, vf, vg, vh, vi, vj, vk, vl, vm, vn, vo, vp, vq, vr, vs, vt, vu, vv, vw, vx, vy, vz, wa, wb, wc, wd, we, wf, wg, wh, wi, wj, wk, wl, wm, wn, wo, wp, wq, wr, ws, wt, wu, wv, ww, wx, wy, wz, xa, xb, xc, xd, xe, xf, xg, xh, xi, xj, xk, xl, xm, xn, xo, xp, xq, xr, xs, xt, xu, xv, xw, xx, xy, xz, ya, yb, yc, yd, ye, yf, yg, yh, yi, yj, yk, yl, ym, yn, yo, yp, yq, yr, ys, yt, yu, yv, yw, yx, yy, yz, za, zb, zc, zd, ze, zf, zg, zh, zi, zj, zk, zl, zm, zn, zo, zp, zq, zr, zs, zt, zu, zv, zw, zx, zy, zz

Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

4



Materiały półprzewodnikowe



Półprzewodniki – substancje, najczęściej krystaliczne, których rezystywność zmienia się w szerokim zakresie poprzez domieszkowanie, zmianę temperatury, oświetlanie lub inne czynniki.

Półprzewodniki elementarne:

Si, Ge, C (diament), Sn

Związki półprzewodnikowe:

- grupa A^{III}B^V: GaAs, GaP, InAs, InSb, GaN, itp.
- grupa A^{II}B^{VI}: CdS, CdSe, CdTe, ZnTe, ZnO,
- kryształy mieszane: np. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (x – skład molowy),
- związki organiczne,
- materiały amorficzne...

Diagram of the periodic table showing the classification of semiconductor elements. The legend indicates that elements in groups IIIA (13) and IVA (14) are semiconductors. The highlighted elements are: B, C, N, O, Al, Si, P, S, Zn, Ga, Ge, As, Se, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi, Po.

Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

5

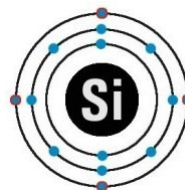


Atom krzemu

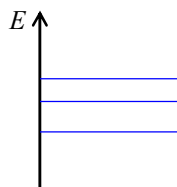


Model atomu Bohra – elektron w atomie może mieć tylko niektóre, skokowo zmieniające się wartości energii (dyskretne poziomy energetyczne).

$$E_n = -\frac{Ze^4 m_e}{8n^2 h^2 \epsilon_0^2}$$



- Z – liczba atomowa pierwiastka ($Z_{\text{Si}}=14$)
- e – ładunek elementarny elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)
- m_e – masa elektronu ($9,109 \cdot 10^{-31}$ kg)
- n – numer powłoki elektronowej ($n = 1, 2, 3, \dots$),
- h – stała Plancka ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js),
- ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

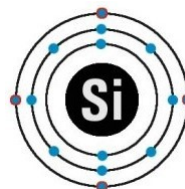
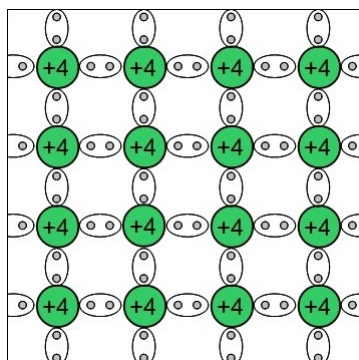


Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

6



Dwuwymiarowy model półprzewodnika IV grupy, np. Si.

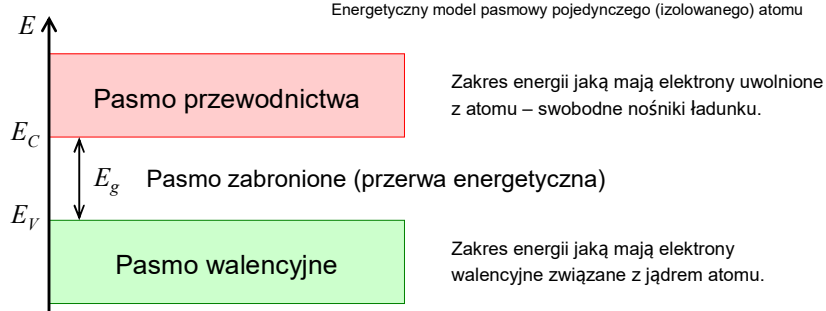


Półprzewodniki:

- samoistne,
- domieszkowane.



Energetyczny model pasmowy pojedynczego (izolowanego) atomu



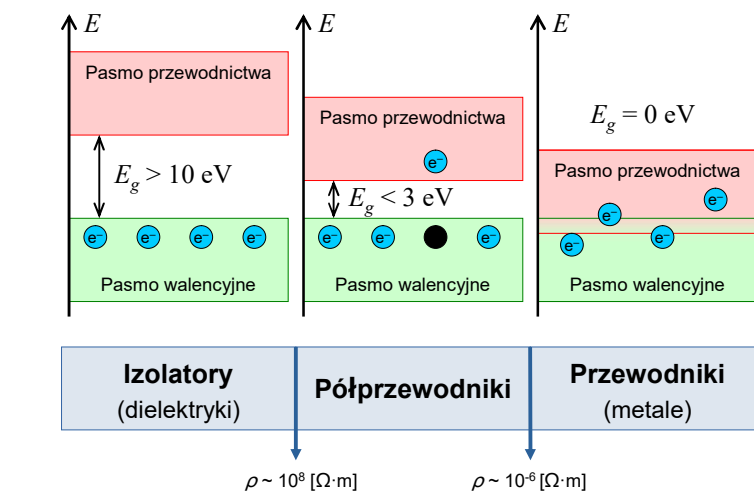
$$E_g = E_C - E_V \text{ [eV]}$$

$$1 \text{ eV} = 1 \text{ e} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

1 eV – jednostka energii – energia jaką uzyskuje bądź traci elektron przemieszczający się w polu elektrycznym o różnicy potencjałów 1 V



Pasmowy model przewodnictwa



Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

9



Materiały półprzewodnikowe



Szerokość przerwy energetycznej w półprzewodnikach

Rozwój materiałów półprzewodnikowych:

- Ge: 1947 – 1958
- Si: 1962 – teraz
- GaAs: 1970 – teraz
- Półprzewodniki z szeroką przerwą energetyczną: 1990 – teraz
- Polimery, materiały amorficzne, metale ziem rzadkich?

Półprzewodnik		E_g (eV) w 300 K
Pierwiastki	Si	1,12
	Ge	0,67
	C (diament)	5,30
	Sn	0,08
	amorficzny Si	1,71
Związki A ^{III} B ^V	GaAs	1,35
	GaP	2,24
	InAs	0,36
	InSb	0,18
	GaSb	0,66
	InP	1,34
	GaN	3,39
	InN	1,89
Związki A ^{II} B ^V	AlN	6,20
	CdS	2,42
	CdSe	1,73
	CdTe	1,50
	ZnTe	2,25
	SiC	2,2 – 3,2

Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

10



Półprzewodniki:

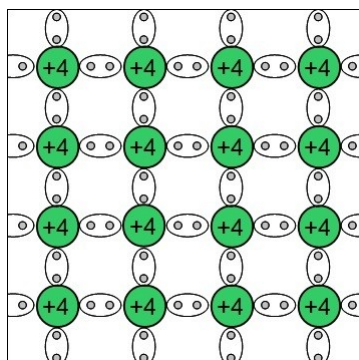
- samoistne – idealnie czysty materiał, bez domieszek i defektów sieci krystalicznej. Swobodne nośniki ładunku powstają wskutek generacji par elektron-dziura,
- niesamoistne:
 - struktura krystaliczna nie jest idealna – posiada defekty (wakanse, dyslokacje, ...),
 - celowe domieszkowanie półprzewodników (donorowe, akceptorowe).

Domieszkowanie – wprowadzenie do półprzewodnika samoistnego atomu o innej wartościowości (powstaje nadmiar lub niedobór elektronów).



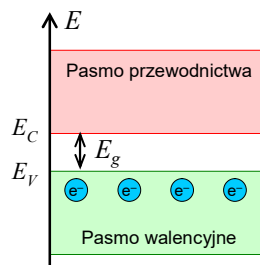
Półprzewodnik samoistny (ang. intrinsic) – mało nośników ładunku, mała przerwa energetyczna

temperatura $T = 0 \text{ K}$ (brak swobodnych nośników energii)



Dwuwymiarowy model półprzewodnika IV grupy

Energetyczny model pasmowy



dla Si: $E_g = 1,12 \text{ eV}$

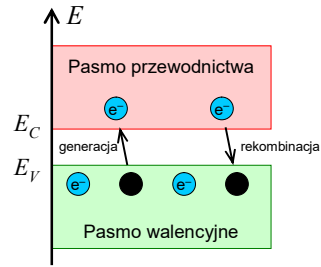
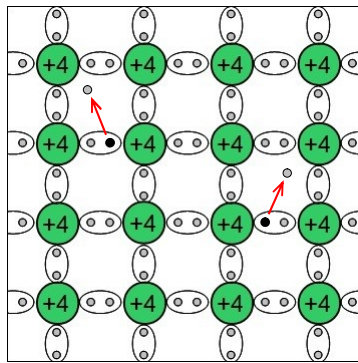


Półprzewodnik samoistny



Generacja par elektron-dziura: pod wpływem ciepła, światła, promieniowania, jonizacji zderzeniowej.

temperatura $T > 0$ K



Elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego.

Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

13



Półprzewodniki – statystyka



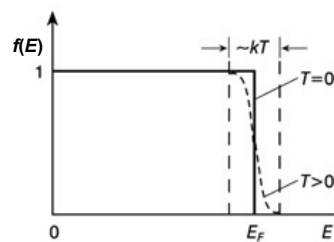
Prawdopodobieństwo obsadzenia przez elektron dowolnego stanu energetycznego E w temperaturze T – **funkcja rozkładu prawdopodobieństwa Fermiego-Diraca**:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

k – stała Boltzmanna ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

E_F – poziom Fermiego (energia Fermiego):

$$f(E_F) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_F - E_F}{kT}}} = \frac{1}{2}$$



- Dla $T = 0$ K wszystkie poziomy o energii $E < E_F$ są na pewno obsadzone, a poziomy o energii $E > E_F$ większej niż energia Fermiego są puste.
- Dla $T > 0$ K prawdopodobieństwo zapełnienia stanu o energii E_F wynosi 0,5.

Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

14



Półprzewodniki – statystyka



elektrony (w paśmie przewodnictwa)

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

$$\text{Dla } |E - E_F| > 3kT: f_n(E) = e^{-(E-E_F)/kT}$$

dziury (w paśmie walencyjnym)

$$f_p(E) = \frac{1}{1 + e^{(E_F-E)/kT}}$$

$$\text{Dla } |E_F - E| > 3kT: f_p(E) = e^{-(E_F-E)/kT}$$

funkcja gęstości dozwolonych stanów energetycznych

$$N_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_C}$$

$$N_V(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E_F - E}$$

koncentracja nośników ładunku

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N_C(E) f_n(E) dE = N_C e^{\frac{(E_C-E_F)}{kT}}$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} N_V(E) f_p(E) dE = N_V e^{\frac{(E_F-E_V)}{kT}}$$

efektywna gęstość stanów energetycznych

$$N_C = 2 \left(\frac{m_n kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$N_V = 2 \left(\frac{m_p kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

15



Półprzewodniki – statystyka



$$np = N_C N_V \cdot e^{\frac{E_C-E_V}{kT}} = N_C N_V \cdot e^{\frac{E_g}{kT}}$$

Dla dowolnego półprzewodnika iloczyn koncentracji elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej w określonej temperaturze jest stały; nie zależy od sposobu domieszkowania.

Półprzewodnik samoistny (ang. intrinsic):

$$n = p \equiv n_i$$

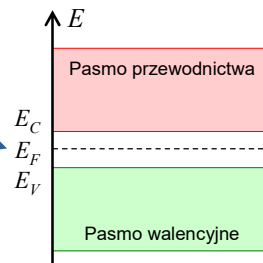
$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C}$$

Prawo działania mas: $np \equiv n_i^2$

$$n_i(T) = \sqrt{np} = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{\frac{E_g}{2kT}} = AT^{3/2} \cdot e^{\frac{E_g}{2kT}}$$

Wartość n_i zależy tylko od rodzaju materiału i od temperatury!

Aby obliczyć n_i wystarczy znajomość E_g i T .



Elementy elektroniczne I – fizyka półprzewodników

16



Półprzewodniki – statystyka



Co to wszystko oznacza?

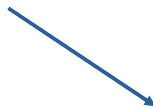
W 1 cm^3 Si znajduje się 10^{23} atomów.

Przerwa energetyczna w Si: $E_g = 1,12 \text{ eV}$.

Średnia energia termiczna elektronu $E_T = kT$ w temp. pokojowej ($T = 300 \text{ K}$) wynosi $E_T = 0,025 \text{ eV}$.

Jak elektrony mogą pokonać przerwę energetyczną?

$$n_i(T) = AT^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$
$$n_i(300 \text{ K}) \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



W 1 mm^3 Si jest 15 milionów swobodnych elektronów (i tyle samo dziur).

Energię wystarczającą do pokonania przerwy energetycznej w Si w temperaturze pokojowej ma 1 elektron na $1,5 \cdot 10^{13}$ atomów.

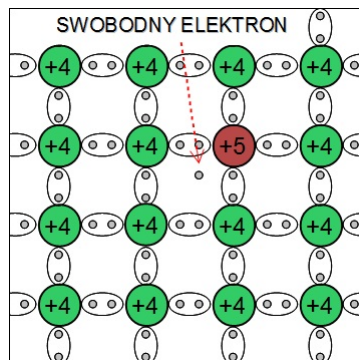


Półprzewodniki domieszkowane



Domieszki donorowe – półprzewodnik typu N (negative)

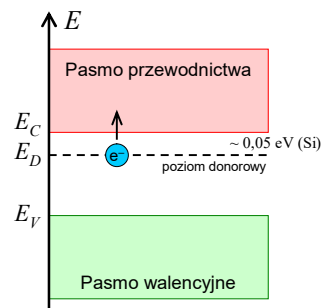
Pierwiastki V grupy, np. P, As, Sb



$$n \approx N_D$$

(dla $N_D \gg n_i$)

n – koncentracja elektronów w paśmie przewodn.
 N_D – koncentracja atomów domieszki donorowej



W półprzewodniku typu n – elektrony są nośnikami większościowymi, a dziury mniejszościowymi.

W temperaturze pokojowej wszystkie elektrony z poziomu donorowego przejdą do pasma przewodnictwa. Atomy domieszki po utracie elektronu będą jonami dodatnimi.

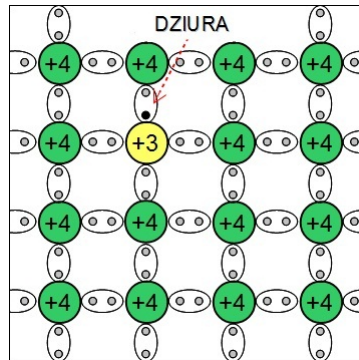


Półprzewodniki domieszkowane



Domieszki akceptorowe – półprzewodnik typu P (positive)

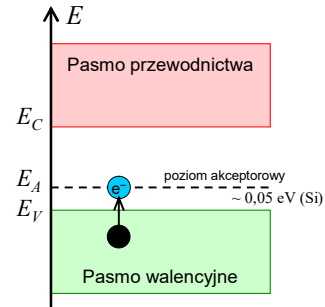
Pierwiastki III grupy, np. B, Al, Ga, In



$$p \approx N_A$$

(dla $N_A \gg n_i$)

p – koncentracja
dziur w paśmie
walencyjnym
 N_A – koncentracja
atomów domieszki
akceptorowej



W półprzewodniku typu p – dziury są nośnikami większościowymi, a elektrony mniejszościowymi.

W temperaturze pokojowej elektrony z pasma walencyjnego przejdą na poziom akceptorowy. Atomy domieszki po otrzymaniu elektronu będą jonami ujemnymi.



Półprzewodniki domieszkowane



Równanie neutralności elektrycznej – wprowadzenie domieszek do półprzewodnika nie może zmienić całkowitego ładunku, który w stanie równowagi musi być równy zero.

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

Z prawa działania mas można wyznaczyć koncentracje nośników dla znanej koncentracji domieszek:

$$np \equiv n_i^2$$

Dla półprzewodników donorowych: $n_n \approx N_D$
typu N ($N_D \gg N_A$)

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

koncentracje
mniejszościowych
nośników ładunku

Dla półprzewodników akceptorowych: $p_p \approx N_A$
typu P ($N_A \gg N_D$)

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Jeśli $N_A = N_D$ – półprzewodnik skompensowany ($n = p = n_i$)

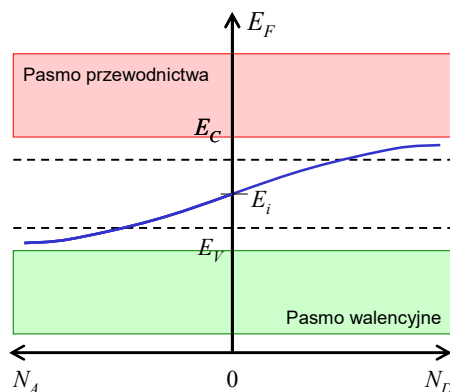


Półprzewodniki domieszkowane



Poziom Fermiego w półprzewodniku domieszkowanym

Domieszkowanie powoduje zmiany położenia poziomu Fermiego.



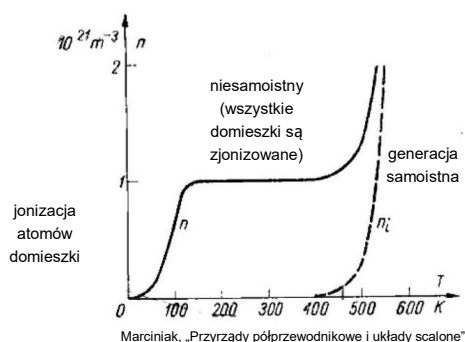
Położenie poziomu Fermiego zależy również od temperatury.



Półprzewodniki domieszkowane



Zależność koncentracji elektronów w półprzewodniku typu N od temperatury (Si)



Domieszkowanie powoduje stabilizację liczby nośników ładunku w stosunkowo dużym zakresie temperatury.

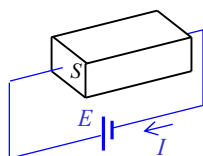


Przewodnictwo elektryczne półprzewodników KPE



Ruch nośników ładunku w półprzewodniku odbywa się pod wpływem mechanizmów: unoszenia i dyfuzji.

Unoszenie nośników



$$v_n = \mu_n \cdot E$$

$$v_p = \mu_p \cdot E$$

μ_n, μ_p – ruchliwość elektronów i dziur

Dla Si: $\mu_n \approx 3\mu_p$

Ładunek, który przepływa przez powierzchnię S w czasie dt :

$$dQ = n \cdot e \cdot v_n \cdot dt \cdot S + p \cdot e \cdot v_p \cdot dt \cdot S$$

gęstość prądu: $J = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt}$

$$J = n \cdot e \cdot v_n + p \cdot e \cdot v_p$$

prawo Ohma: $J = \sigma \cdot E$

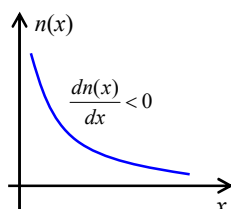
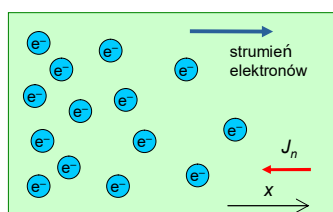
konduktywność: $\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$



Przewodnictwo elektryczne półprzewodników KPE



Dyfuzja nośników – zachodzi w przypadku nierównomiernej koncentracji nośników



Nośniki przemieszczają się z obszarów o większej do obszarów o mniejszej koncentracji – dyfuzja prowadzi do wyrównania koncentracji.

$$J = -e \cdot D \frac{dn(x)}{dx} \quad D - \text{współczynnik dyfuzji}$$

$$J_n = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E + e \cdot D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p = p \cdot e \cdot \mu_p \cdot E + e \cdot D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

unoszenie dyfuzja

$$J_c = J_n + J_p$$

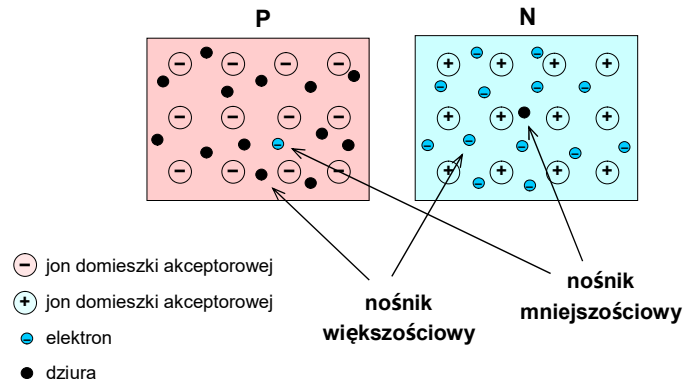
$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} = U_T \approx 26 \text{ mV } (T = 300 \text{ K})$$



Złącze P-N



Jak powstaje złącze p-n?



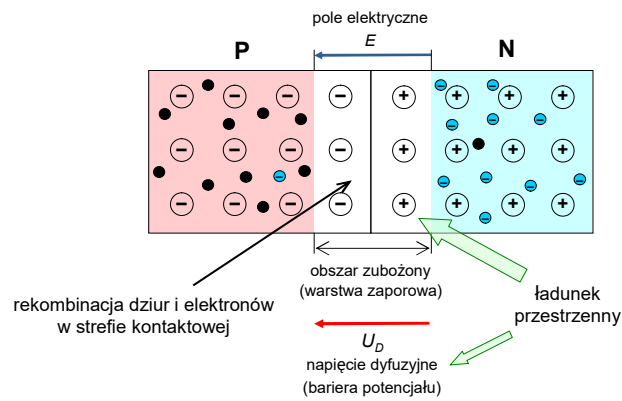
Złącze P-N – złącze dwóch półprzewodników niesamoistnych o różnych typach domieszkowania: P i N.



Złącze P-N



Połączenie półprzewodników P i N



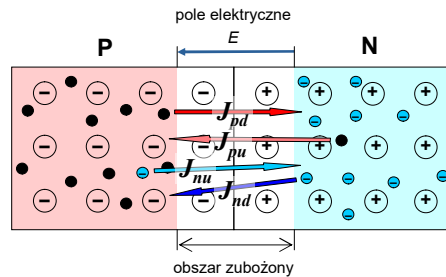
Złącze niespolaryzowane – w stanie równowagi termodynamicznej.



Złącze P-N



Stan równowagi termodynamicznej



$$J_{pd} - J_{pu} = 0 \quad J_{nd} - J_{nu} = 0$$

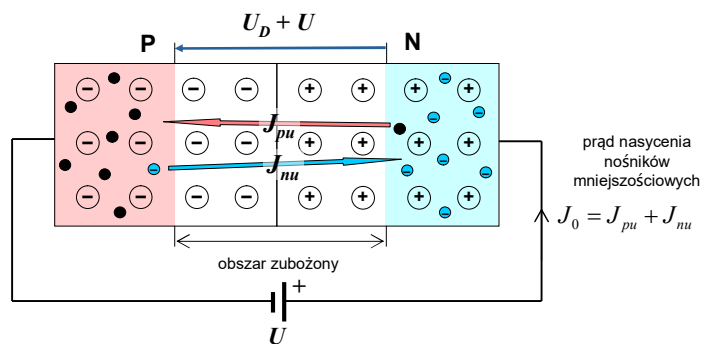
W stanie równowagi termodynamicznej sumaryczny prąd płynący przez złącze jest równy zero.



Złącze P-N



Polaryzacja w kierunku zaporowym



Bariera potencjału zwiększa się ($U_D + U$)
i powoduje całkowity zanik prądów dyfuzyjnych:

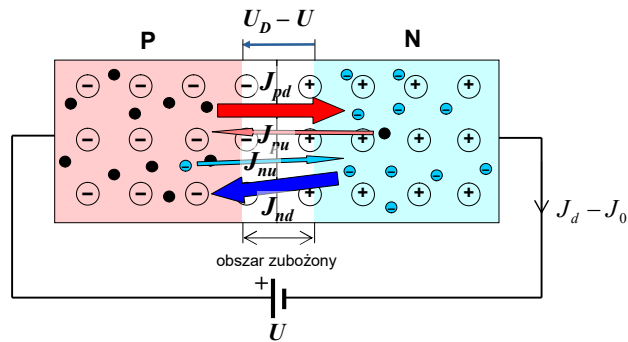
$$J_{pd} \rightarrow 0 \quad J_{nd} \rightarrow 0$$

Prądy unoszenia:

$$J_{pu} = \text{const}, \quad J_{nu} = \text{const} \\ \text{– nie zależą od } U$$



Polaryzacja w kierunku przewodzenia



Bariera potencjału zmniejsza się ($U_D - U$)
i powoduje przepływ dużych prądów dyfuzyjnych:

$$J_{pd} + J_{nd} = J_d = J_0 e^{U/U_T}$$

Prądy unoszenia:

$$J_{pu} = \text{const}, J_{nu} = \text{const}$$

$$J_u = J_0 \ll J_d$$