

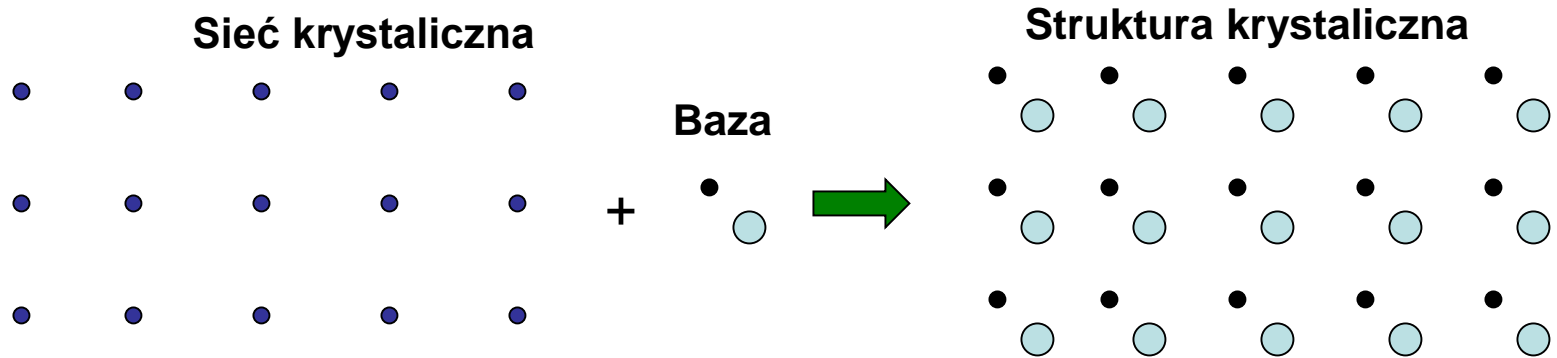
Wykład Vb

Wiązania chemiczne, ciało stałe i krótki wstęp do fizyki półprzewodników

<http://www.dbc.wroc.pl/publication/17102>

FOZE_wyklad e-skrypt_Popko.pdf

Fizyka Ciała Stałego



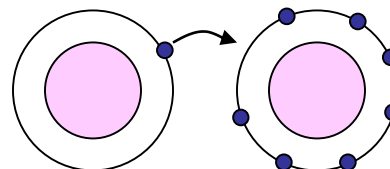
O właściwościach ciała stałego decyduje:

- **Struktura krystaliczna (rodzaj sieci)**
- **Wiązania chemiczne (rodzaj atomów w sieci)**

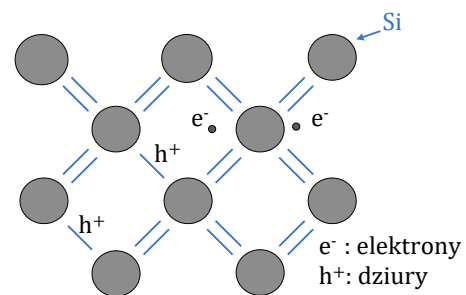
Wiązania chemiczne

Typy:

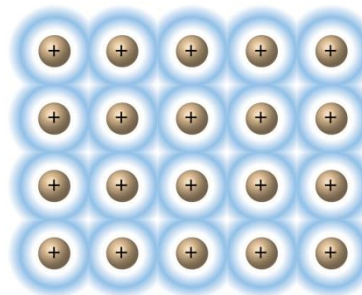
Wiązania jonowe



Wiązania kowalencyjne



Wiązania metaliczne



Wiązania Van der Waalsa



Wiązania jonowe

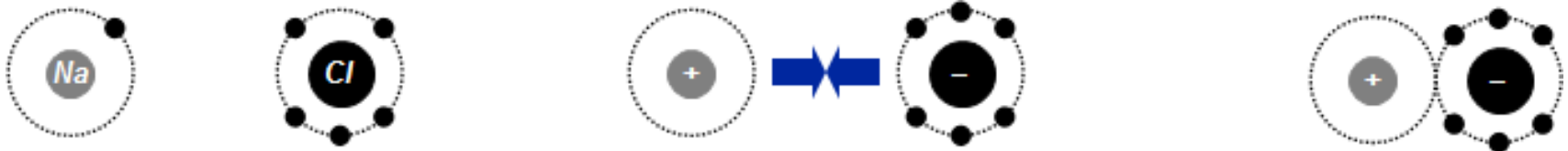
• Powstają gdy następuje transfer ładunku od jednego atomu do drugiego

* Dwa atomy tworzą w ten sposób układ dwóch jonów o przeciwnych znakach

* Typowym przykładem jest tu kryształ NaCl powstający w wyniku transferu elektronu z sodu do chloru

⇒ Struktura elektronowa atomu Na $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$

⇒ Struktura elektronowa atomu Cl $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$

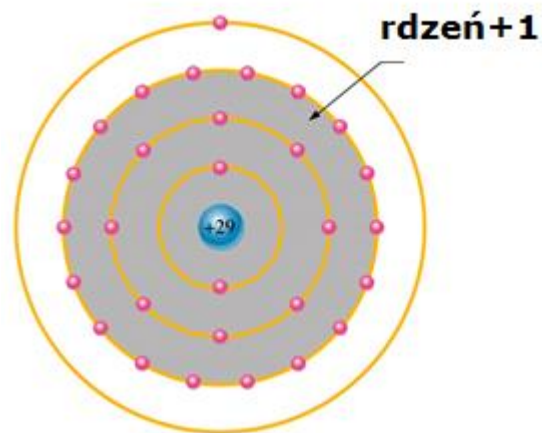


Wiązanie metaliczne

Atom Cu:

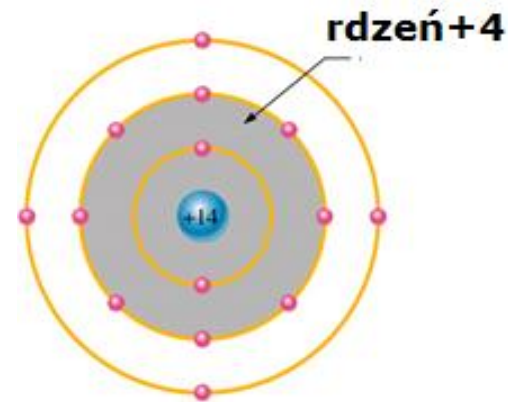
- Tylko 1 elektron walencyjny
- Dobry przewodnik
- Konfiguracja elektronowa:2:8:18:1

29 protonów
29 neutronów
28 elektronów na
powłokach
wewnętrznych



Atom krzemu (Si)

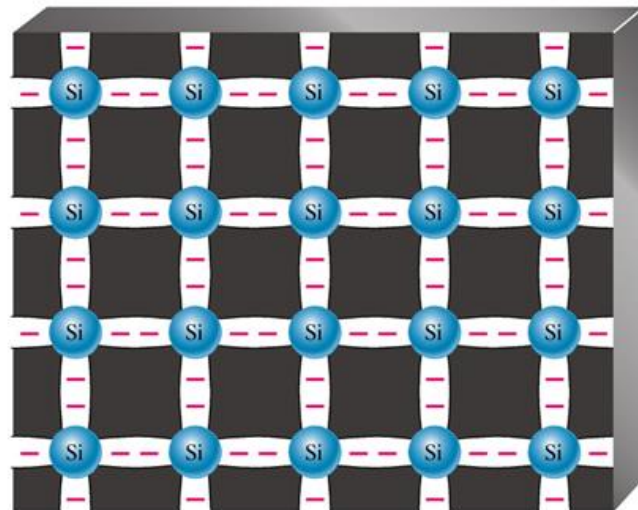
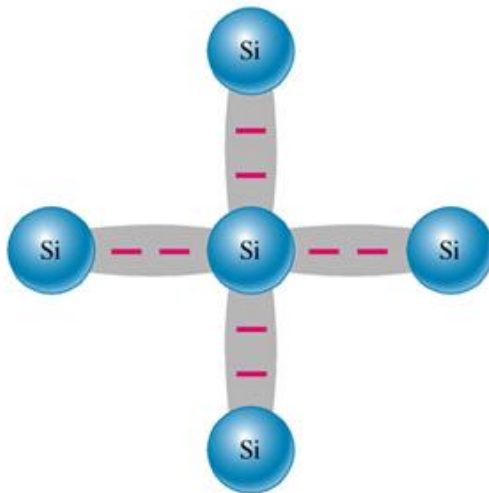
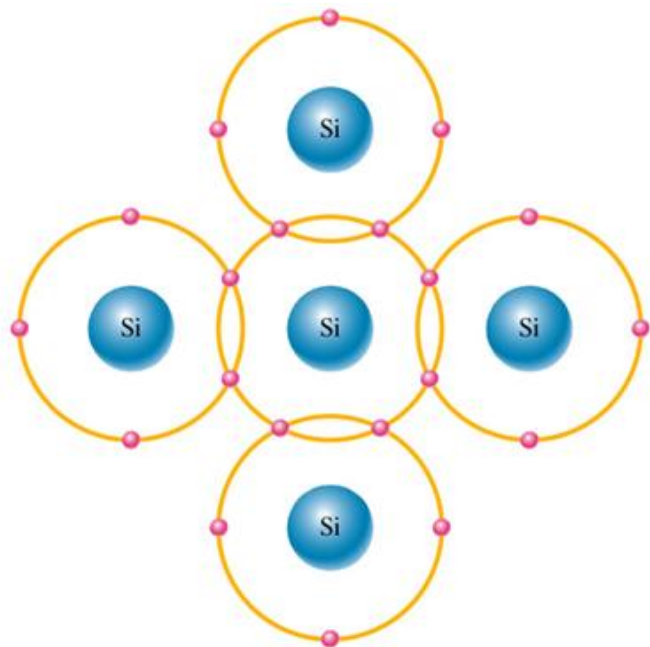
- 14 neutronów
- 14 protonów
- 10 elektronów na powłokach wewnętrznych (rdzeń)
- 4 elektrony walencyjne



Si – liczba atomowa $Z = 14$

- konfiguracja elektronowa $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
- zamknięte powłoki K i L : $Ne (Z = 10) (1s^2 2s^2 2p^6)$
- 4 walencyjne elektrony na podpowłoce M: 2 elektrony w stanie $3s^2$ i 2 elektrony w stanie $3p^2$
- razem $[Ne] 3s^2 3p^2$

Wiązanie kowalencyjne w Si – wspólne elektrony walencyjne

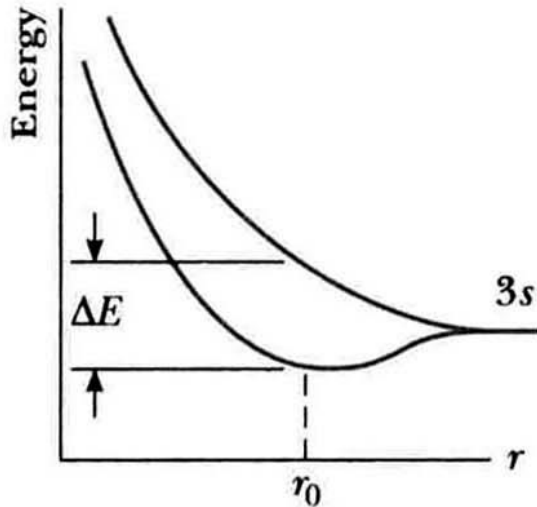


Atom środkowy dzieli się swoim elektronem z każdym z czterech sąsiednich atomów, tworząc wiązanie kowalencyjne. Te z kolei, dzielą się swoimi elektronami z sąsiadami.

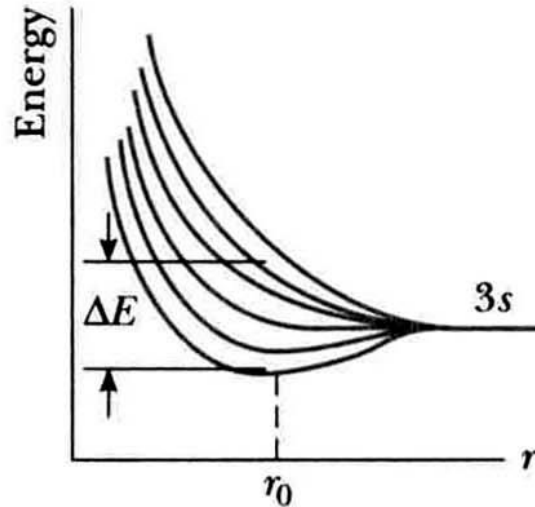
Wiązanie kowalencyjne w kryształce krzemu. Minusy reprezentują wspólne elektrony walencyjne

Rozszczepienie poziomów energetycznych w ciele stałym

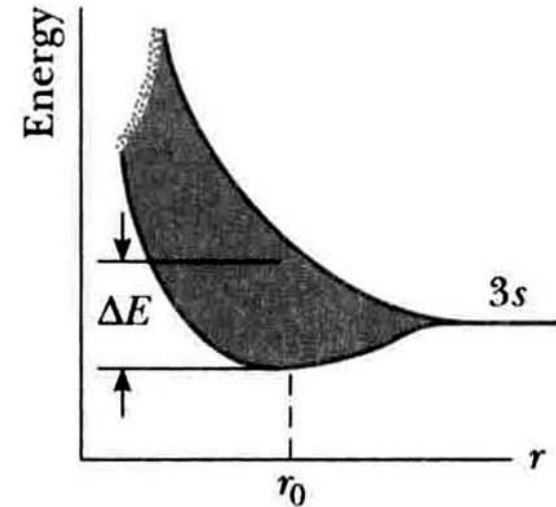
Dwa atomy



Sześć atomów



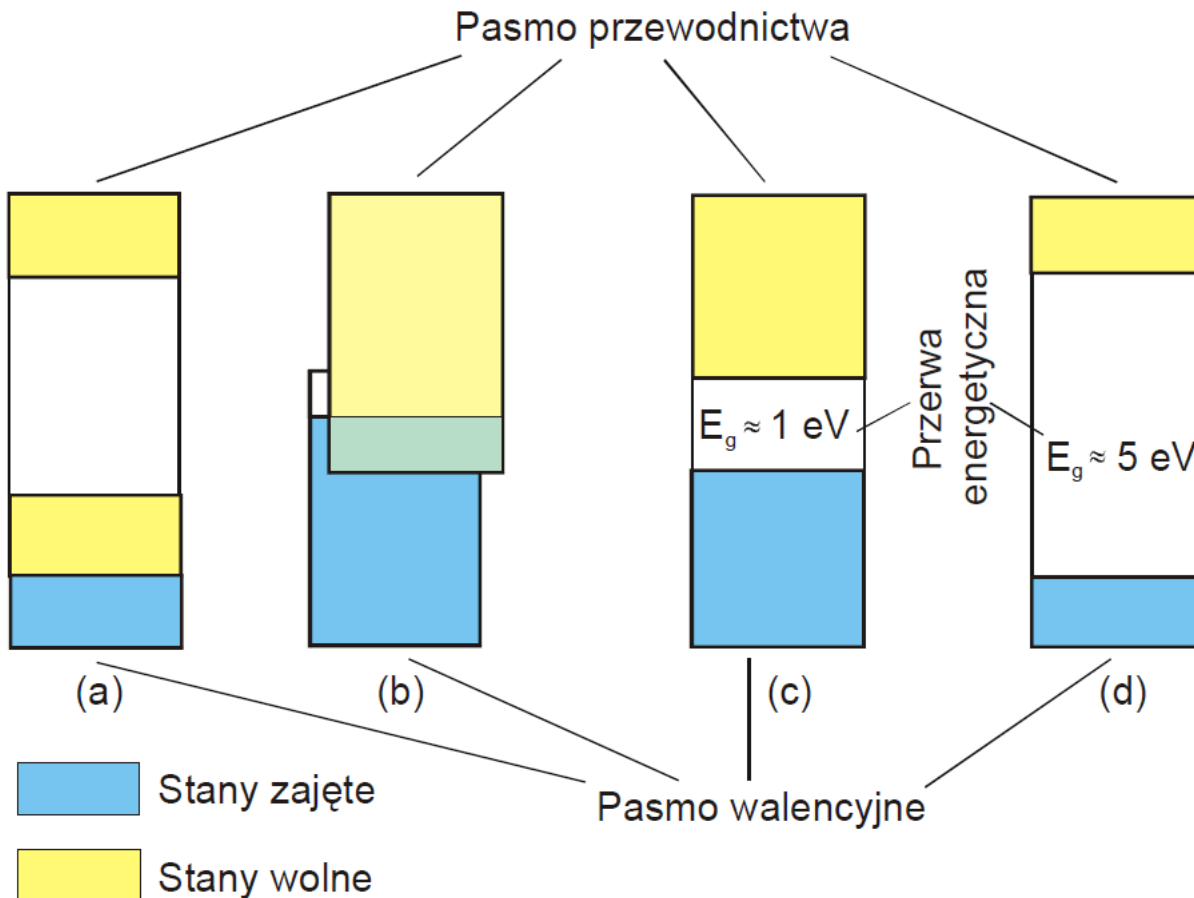
Ciało stałe
 $N \sim 10^{23}$ atomów/cm³



- **Zakaz Pauliego:** elektrony w atomie muszą różnić się przynajmniej jedną liczbą kwantową tzn. nie ma dwóch takich elektronów których stan opisywany byłby przez ten sam zestaw liczb kwantowych n , ℓ , m_ℓ oraz m_s .
- W zbiorze wzajemnie oddziałujących na siebie atomów nie ma dwóch elektronów o identycznych stanach energetycznych

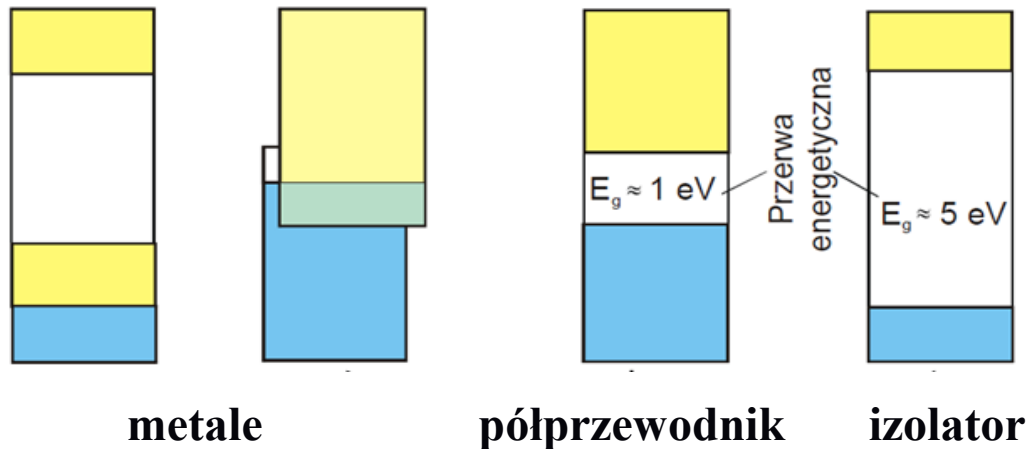
Metale, izolatory, półprzewodniki

- Zbliżenie atomów w kryształach prowadzi do rozszczepienia poziomów energetycznych. Istotnemu rozszczepieniu ulegają poziomy elektronów walencyjnych.
- Rozszczepione poziomy grupują się w pasma



a) i b) - metale,
c) Półprzewodnik
(przerwa wzbr. 1eV-
umownie)
d) izolator

Metale, izolatory, półprzewodniki



To podejście tłumaczy:

- małą oporność metali w niskiej T (brak przerwy wzbronionej: stany wolne znajdują się w sąsiedztwie stanów zajętych elektronami);
- większą oporność półprzewodników i największą - izolatorów (im większa E_g , tym mniejsze prawdopodobieństwo, że elektron znajdzie się w pasmie przewodnictwa);

$$p \sim e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

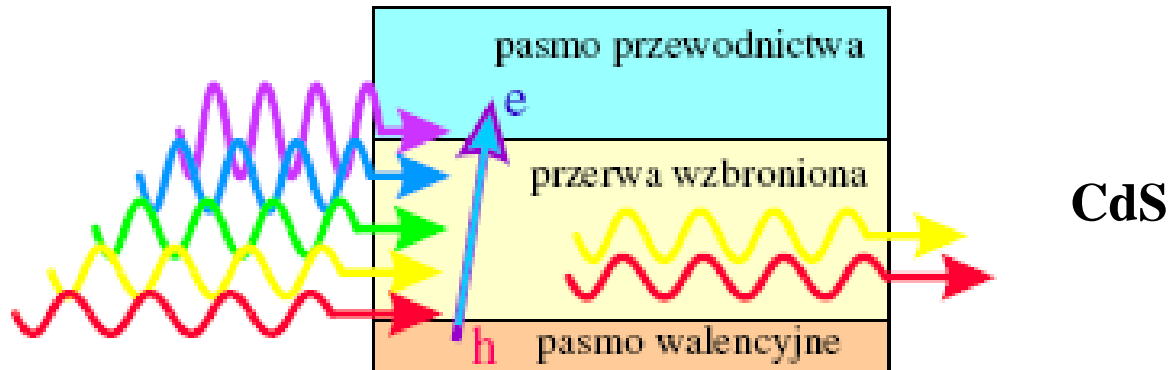
- wykładniczy spadek oporności półprzewodników ze wzrostem temperatury (im wyższa temperatura, tym większe prawdopodobieństwo, że elektron znajdzie się w pasmie przewodnictwa).

Krawędź absorpcji

To podejście tłumaczy również występowanie krawędzi absorpcji w półprzewodnikach i izolatorach (tylko fotony o energii większej od E_g zostaną zaabsorbowane):

$$E_F = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \geq E_g$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$$



Półprzewodniki (Si, Ge, GaAs)

Konfiguracja elektronowa atomu Si:

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2 = [\text{Ne}] 3s^2 3p^2$ 4 elektrony walencyjne

Kryształ Si: wiązanie kowalencyjne: hybrydyzacja orbitali sp^3

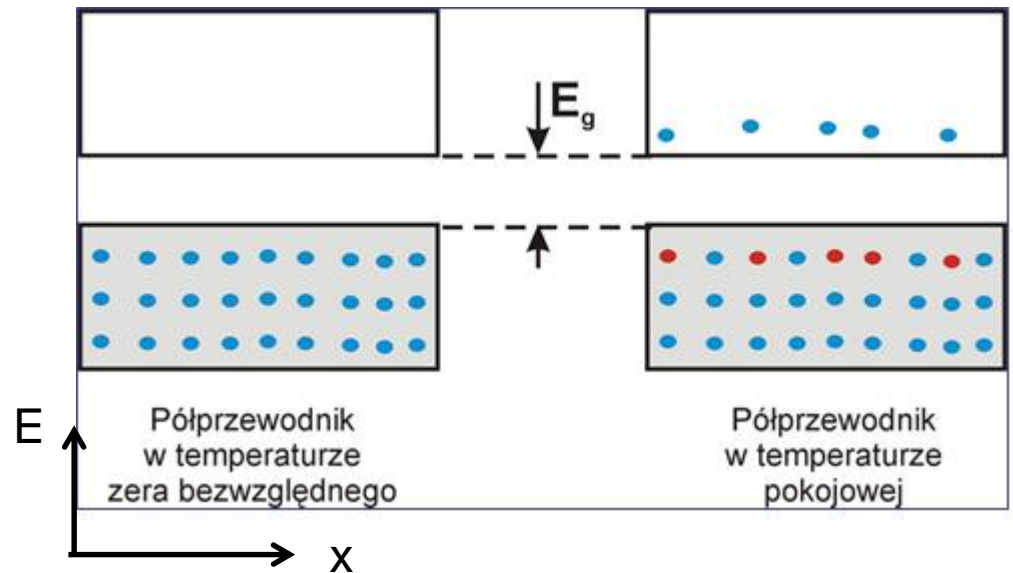
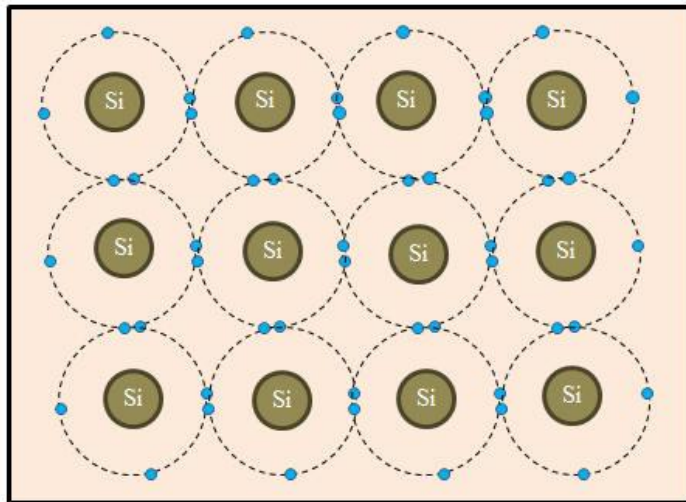


Diagram pasmowy
Półprzewodnik samoistny

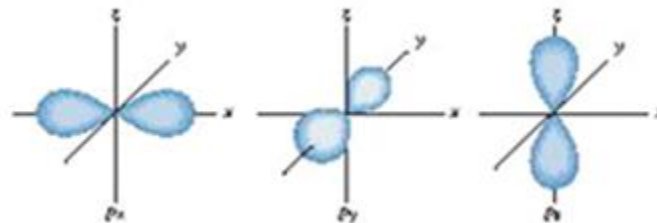
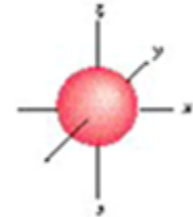
Zhybrydyzowane orbitale SP^3 w Si

Z rozw. równania Schrodingera dla atomu Si otrzymuje się radialną i kątową zależność funkcji falowej dla elektronu (tzw. orbitale).

konfiguracja elektronowa $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

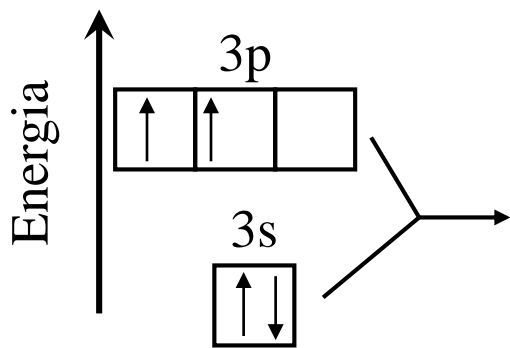
Dla podpowłoki walencyjnej ($n=3$) z dwoma elektronami w stanie $3s$ i dwoma w stanie $3p$:

- jest dodatni orbital $3s$ sferycznie symetryczny. Orbital ten może zgodnie z zasadą Pauliego pomieścić 2 elektrony o przeciwnych spinach
- są 3 orbitale $3p$ (p_x , p_y , p_z) wzajemnie prostopadłe o kształcie maczugi z dodatnią i ujemną częścią. Podpowłoka $3p$ może pomieścić 6 elektronów, ale w Si są tylko 2 elektrony.



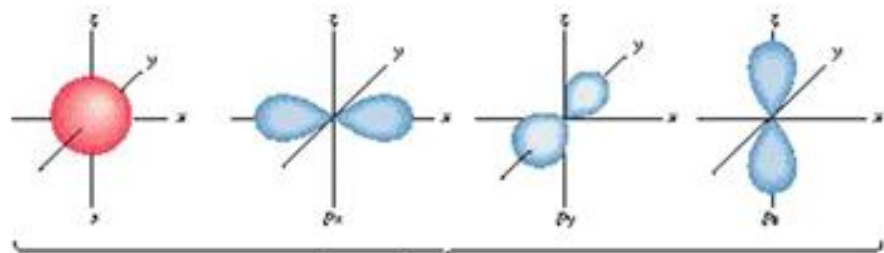
Wiązanie kowalencyjne

Izolowany atom Si:
1 orbital s
3 orbitale p

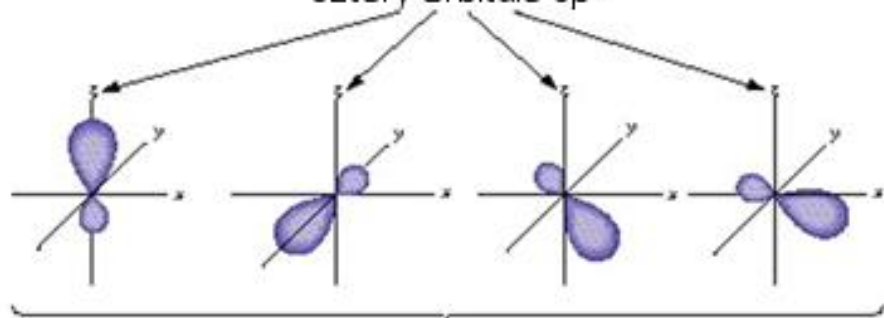


Hybrydyzacja sp^3

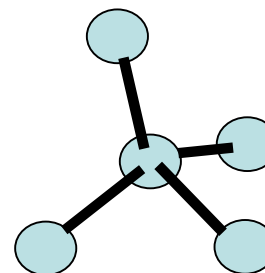
1 orbital s
3 orbitale p } = sp^3



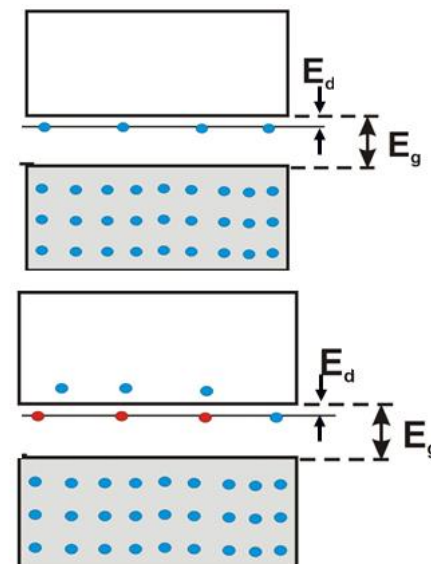
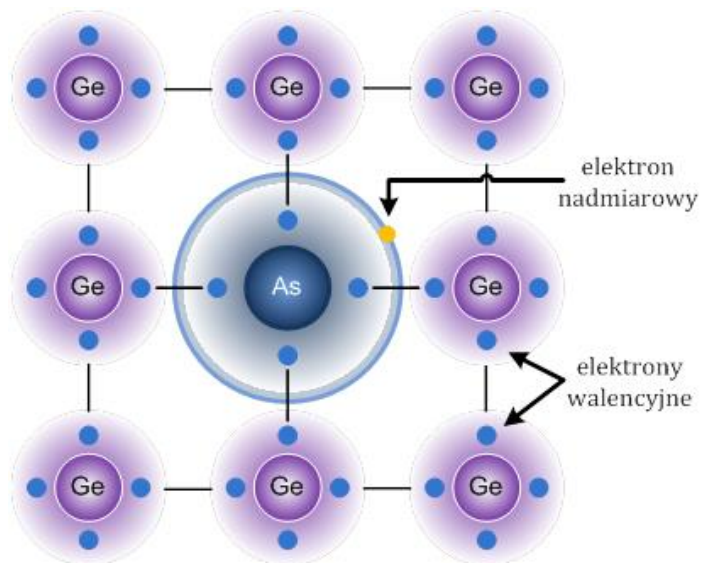
łącznie tworzą
cztery orbitale sp^3



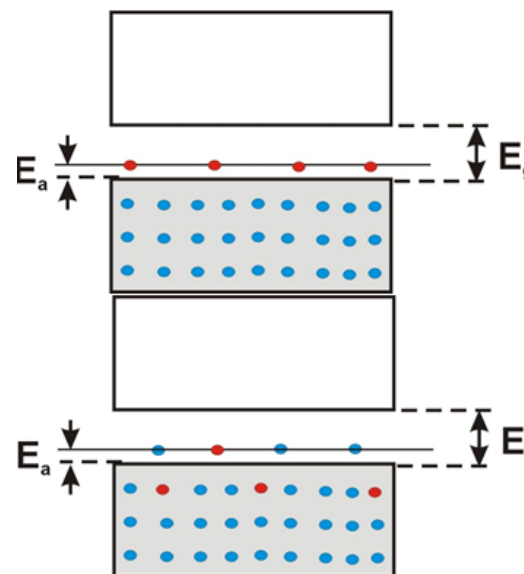
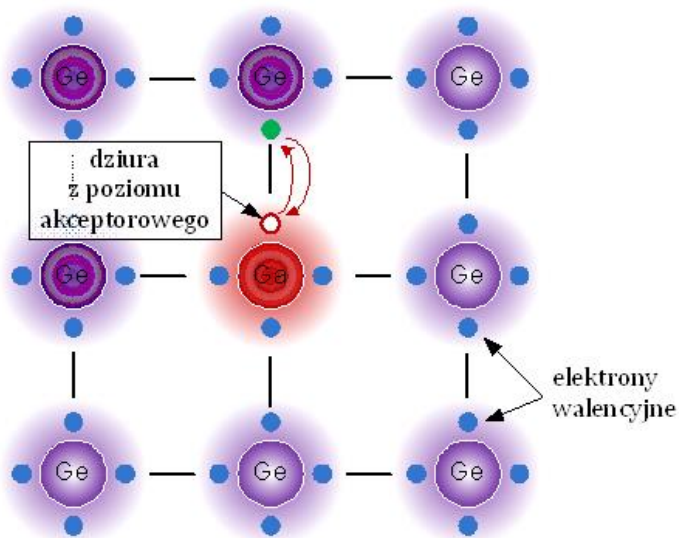
reprezentowane w postaci
tetraedru



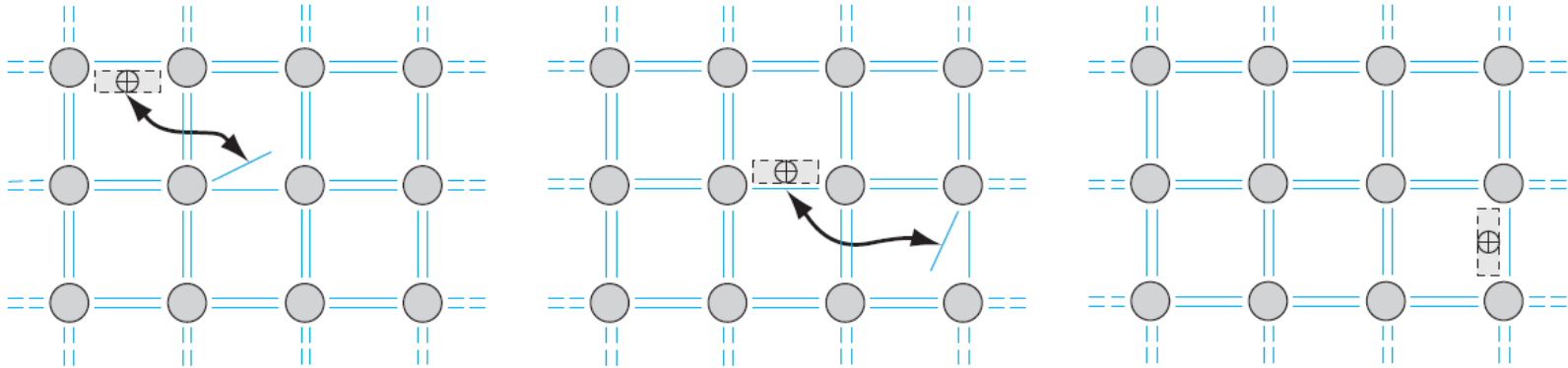
Półprzewodnik typu n



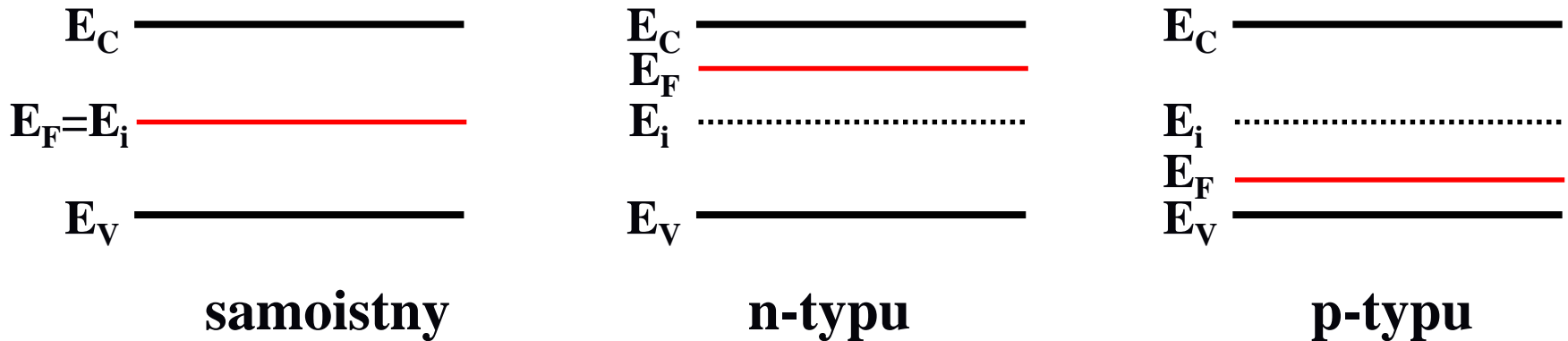
Półprzewodnik typu p



Koncepcja dziury



Poziom Fermiego w półprzewodniku niezdegenerowanym



Wpływ domieszkowania na poziom Fermiego E_F :

- **n-typu:** poziom Fermiego przesuwa się do góry
- **p-typu:** poziom Fermiego przesuwa się w dół

Półprzewodnik w polu elektrycznym

$$F = -\frac{dE_p}{dx}$$

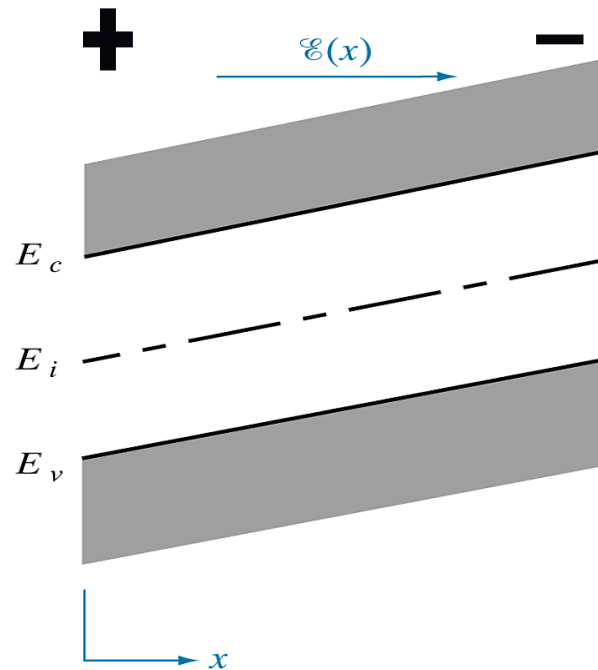
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = \text{const} = c \rightarrow$$

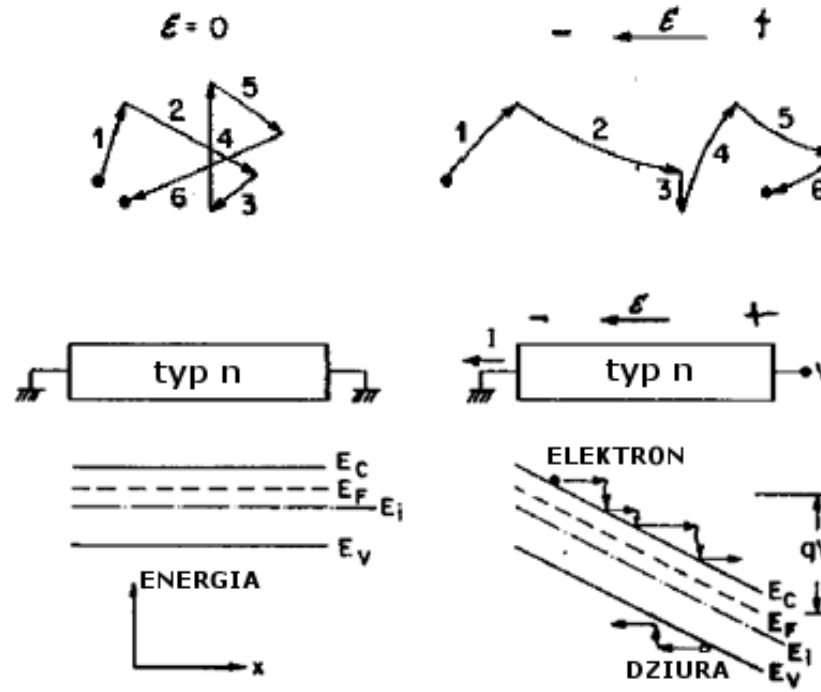
$$V = -cx \rightarrow$$

$$E_p = cex$$



Gęstość prądu unoszenia

Prąd unoszenia:
wynika z obecności
pola elektrycznego



$$J_x = \sigma \mathcal{E}_x$$

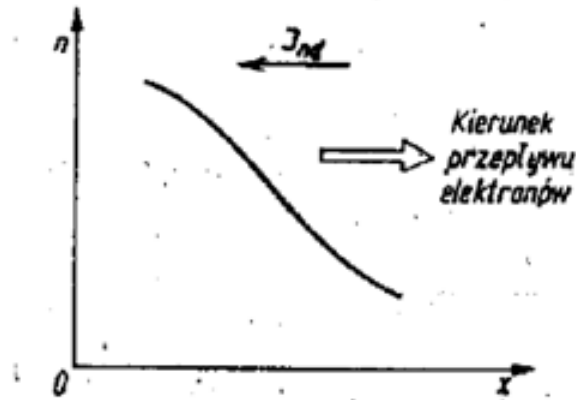
$$J_x = qn \mu_n \mathcal{E}_x$$

Całkowity prąd unoszenia elektronowy i dziurowy:

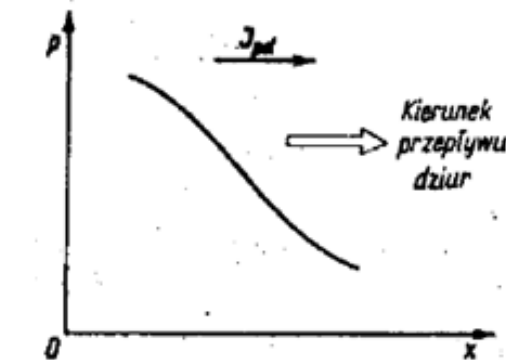
$$J_x = qn \mu_n \mathcal{E}_x + qp \mu_p \mathcal{E}_x = q(n \mu_n + p \mu_p) \mathcal{E}_x = \sigma \mathcal{E}_x$$

Gęstość prądu dyfuzyjnego

Prąd dyfuzyjny:
wynika z gradientu
koncentracji
nośników



$$J_n(\text{dyf}) = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = +qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$



$$J_p(\text{dyf}) = -(+q)D_p \frac{dp(x)}{dx} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Całkowity prąd w obecności pola elektrycznego

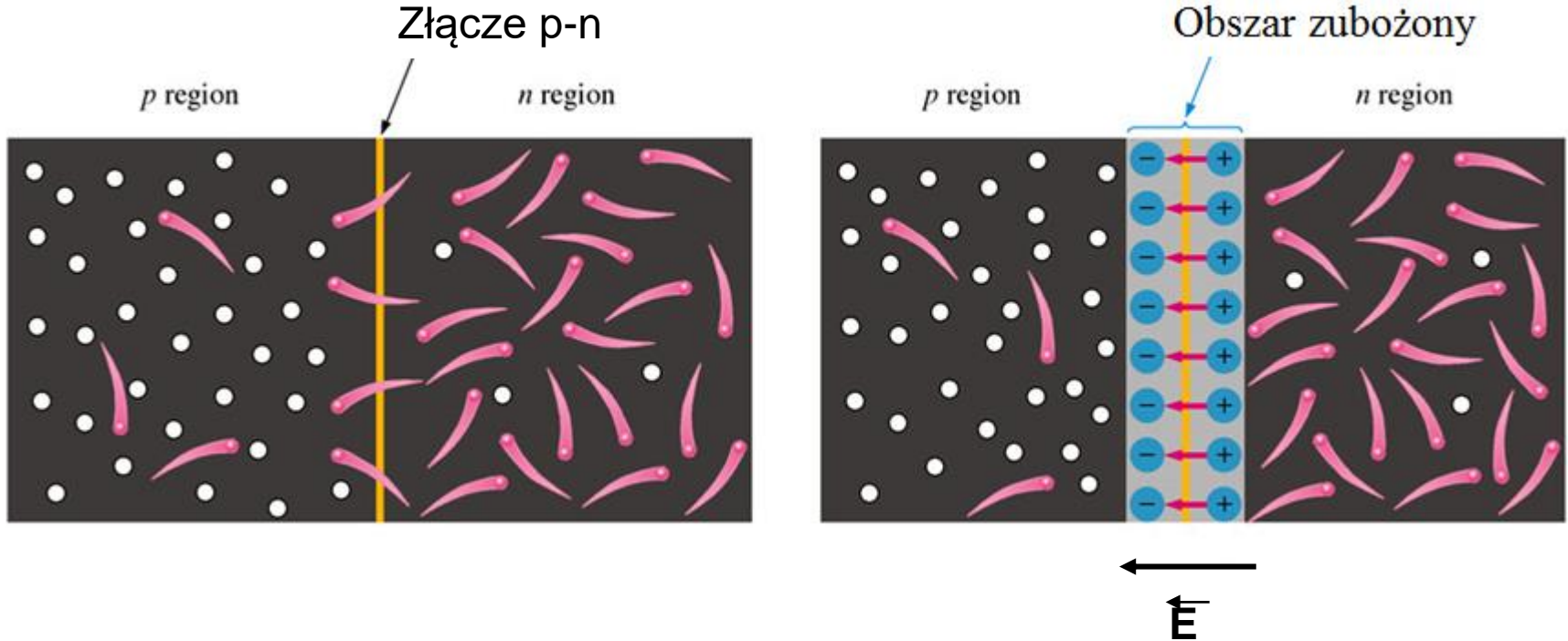
Całkowity prąd jest sumą prądu dyfuzyjnego (elektronowego i dziurowego) i prądu unoszenia (elektronowego i dziurowego) :

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \mathbf{J}_n(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_p(\mathbf{x})$$

$$J_n(x) = q\mu_n n(x)\varepsilon(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(x) = q\mu_p p(x)\varepsilon(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Złącze p-n

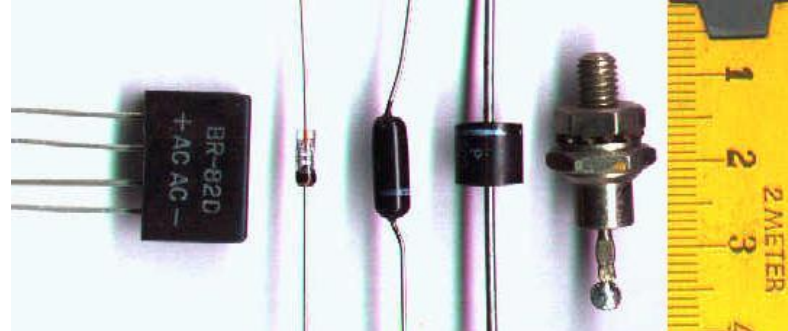


Tworzy się złącze p-n

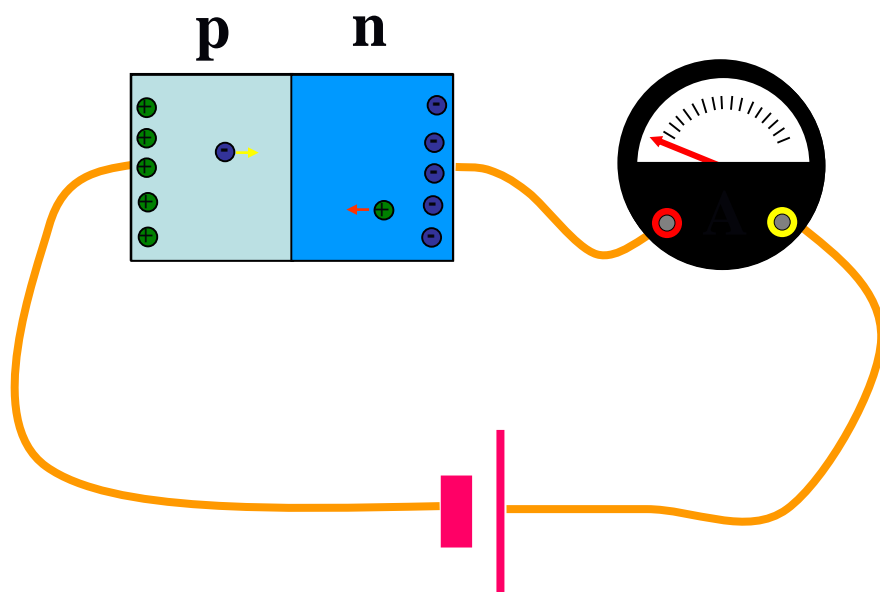
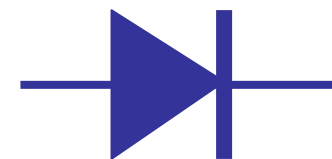
Złącze po utworzeniu

Pole elektryczne na styku dwóch półprzewodników powoduje, że prąd łatwo płynie w jednym kierunku a przepływ w drugim kierunku jest utrudniony.

Złącze p-n dioda półprzewodnikowa

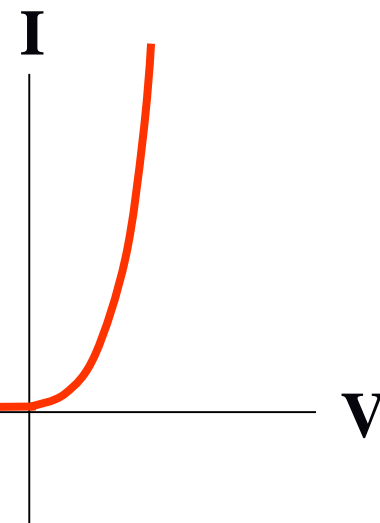


Charakterystyka I-V - nieliniowa

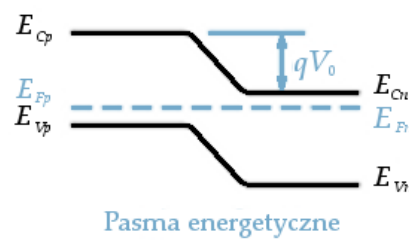
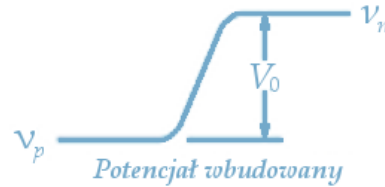
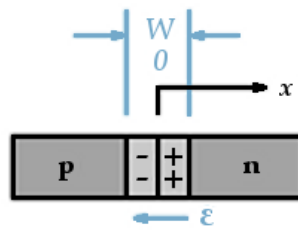


Polaryzacja w kier.
przewodzenia

Polaryzacja
zaporowa

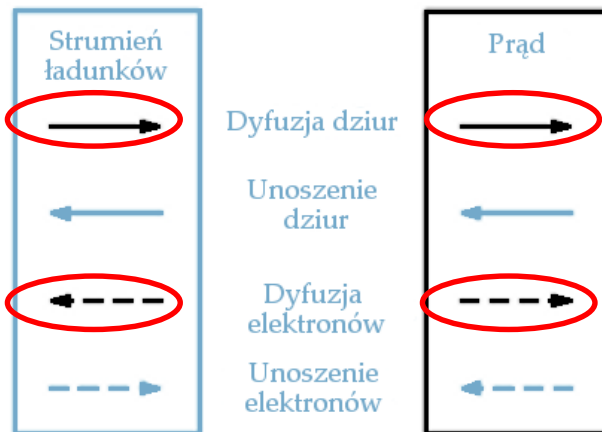


Tworzenie się złącza p-n - diagram pasmowy złącza



(a)

(b)

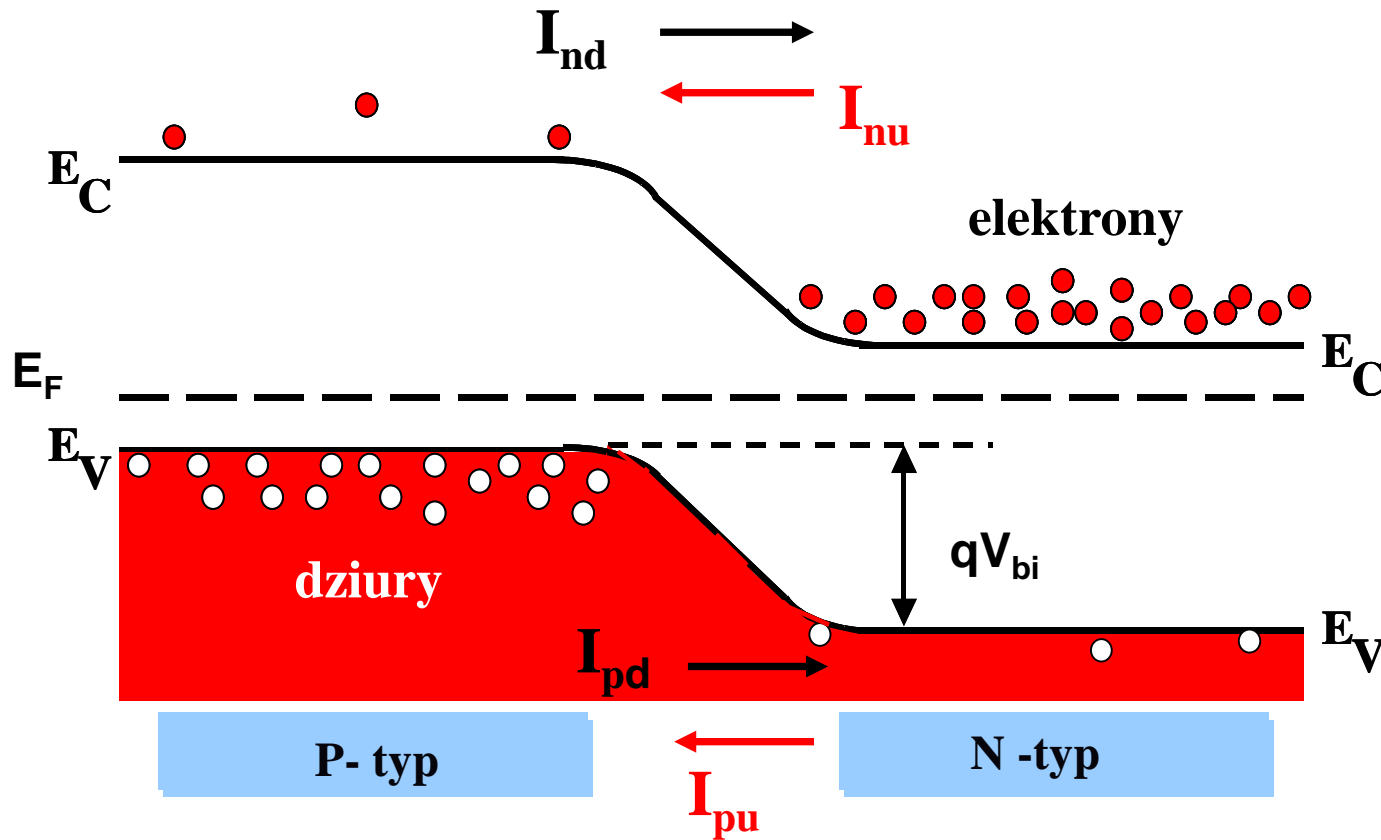


(c)

W stanie równowagi gradient poziomu Fermiego jest równy zero!

$$\frac{dE_F}{dx} = 0$$

Diagram pasmowy złącza p-n w stanie równowagi termodynamicznej

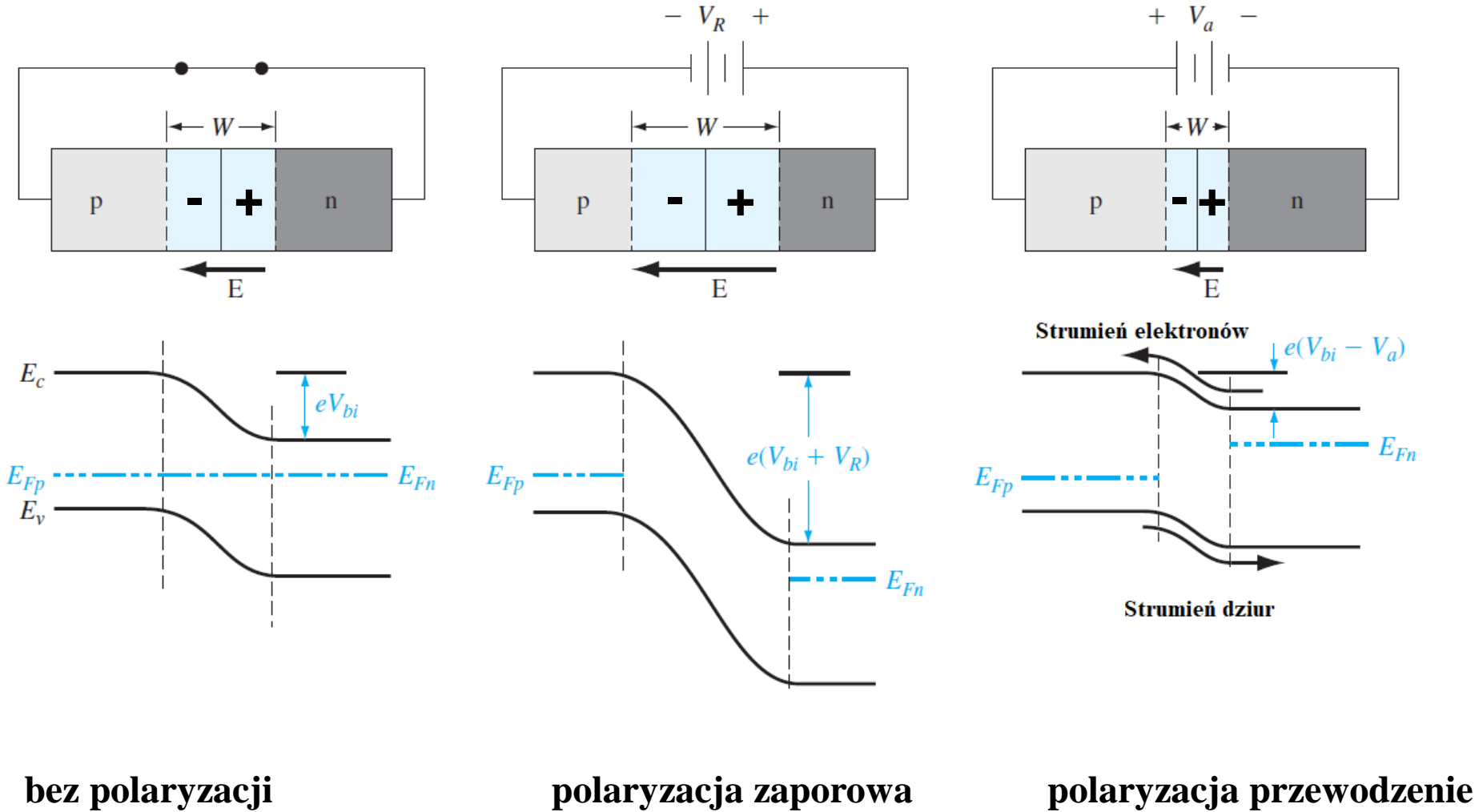


I_{nd} (I_{pd}) – prąd dyfuzyjny elektronowy (dziurowy)

I_{nu} (I_{pu}) – prąd unoszenia elektronowy (dziurowy)

V_{bi} – potencjał wbudowany

Polaryzacja złącza p-n



Równanie Shockley'a

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_S = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right)$$

