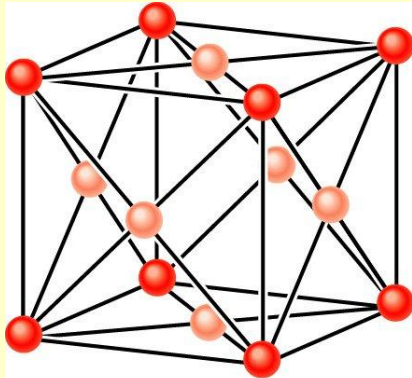
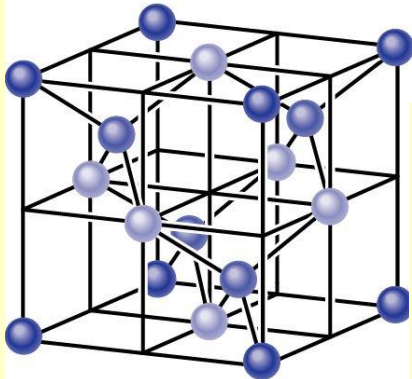


Fizyka Ciała Stałego

Ciała stałe: kryształy, polikryształy, ciała bezpostaciowe



kryształ Cu



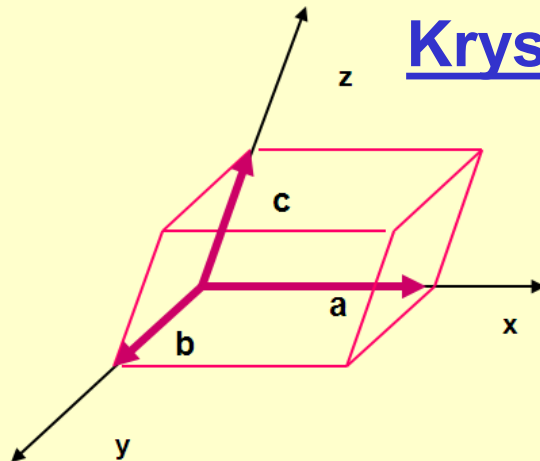
kryształ Si

Atomy w **kryształe** ułożone są w powtarzający się regularny wzór zwany siecią krystaliczną

Polikryształy → ciała zbudowane z bardzo wielu małych kryształków.

Ciała niekrystaliczne (np. szkło) → uporządkowanie atomowe nie rozciąga się na duże odległości.

Kryształy:



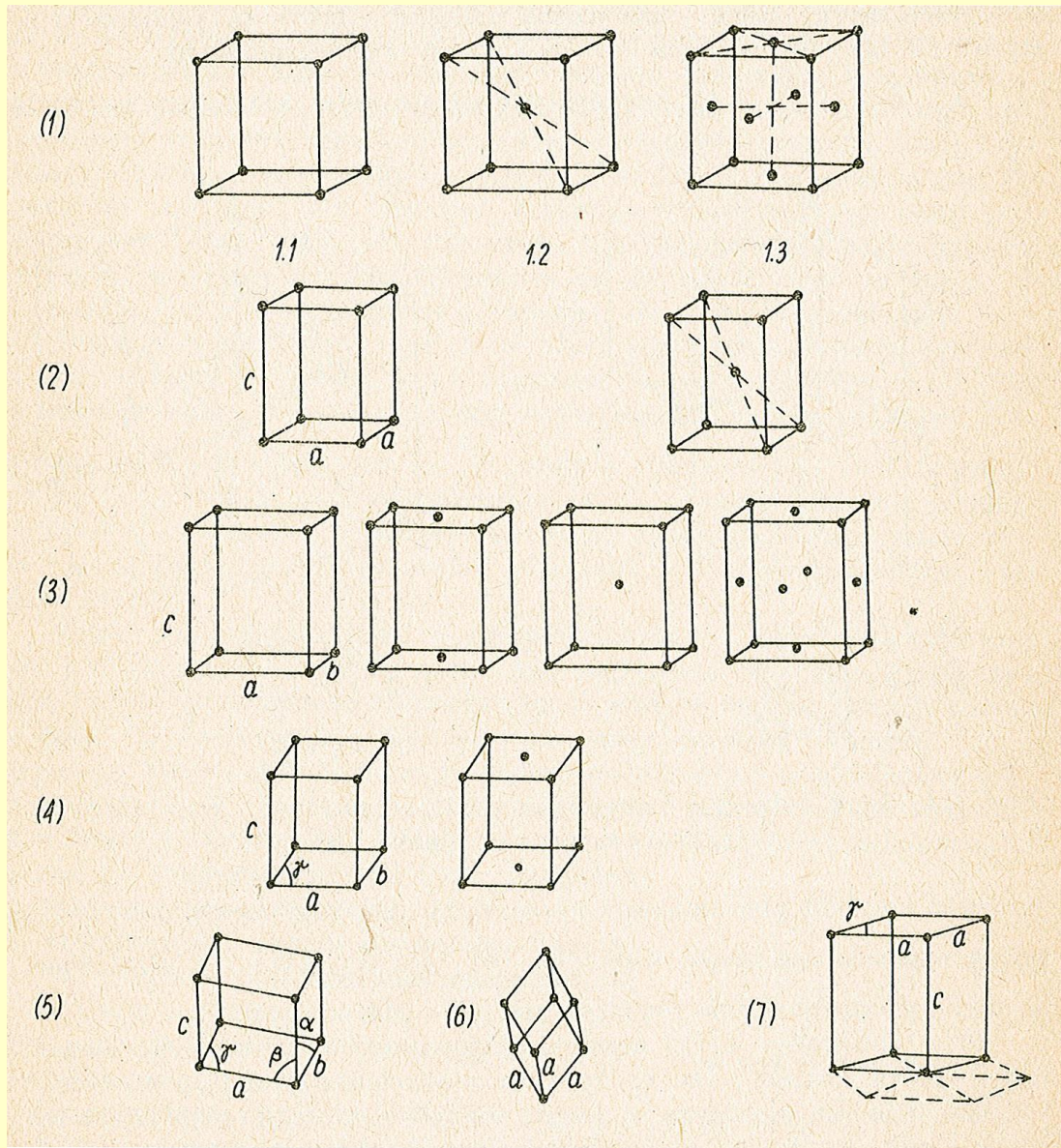
Położenia cząstek (atomów) w sieci:

$$\mathbf{R} = n_1 \mathbf{a} + n_2 \mathbf{b} + n_3 \mathbf{c}$$

a, b, c – wektory translacji, n_1, n_2, n_3 - dowolne liczby całkowite

Komórki elementarne - sieci Bravais'go

14 sposobów takiego wypełnienia przestrzeni



1. Układ sześcienny

1.1 sieć prosta

1.2 sieć centrowana objętościowo

1.3 sieć centrowana płasko

2. Układ tetragonalny

3. Układ rombowy

4. Układ jednoskośny

5. Układ trójskośny

6. Układ romboedryczny

7. Układ heksagonalny

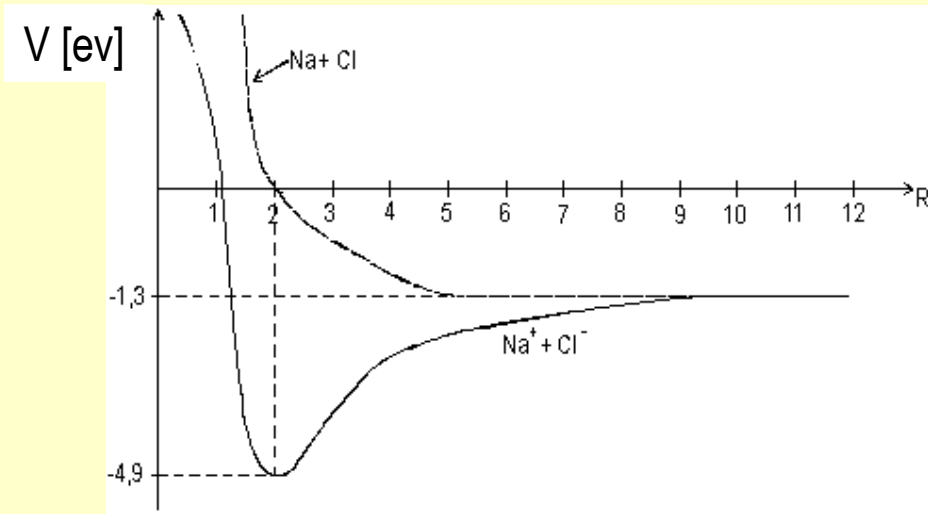
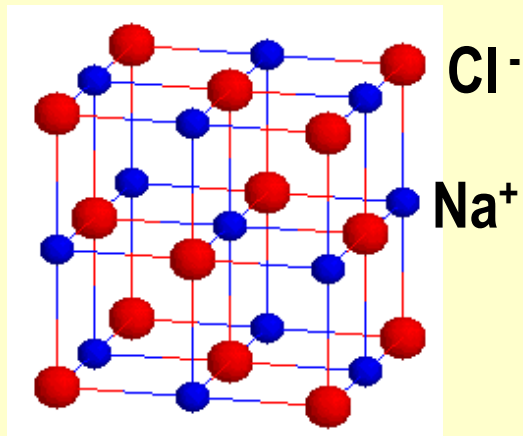
Rodzaje wiązań

Ze względu na typy wiązań kryształy dzielimy na:

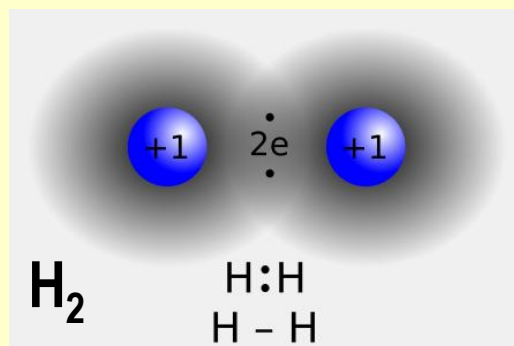
- Kryształy jonowe,
- Kryształy atomowe (kowalenne),
- Kryształy metaliczne,
- Kryształy cząsteczkowe (molekularne),
- Kryształy o wiązaniach wodorowych,

Wiązania jonowe (np. NaCl, KCl, LiBr) - naprzemienne ułożenie dodatnich jonów (powstałych z atomów elektrododatnich) i ujemnych jonów (powstałych z atomów elektroujemnych) → przyciąganie siłami kulombowskimi.

Kryształy jonowe (np. NaCl, energia wiązania = 7.95 eV na parę) → **brak swobodnych elektronów** → **złe przewodniki elektryczności i ciepła**. Siły kulombowskie wiążące kryształy jonowe są duże → kryształy są **twarde** i mają **wysoką temperaturę topnienia**.



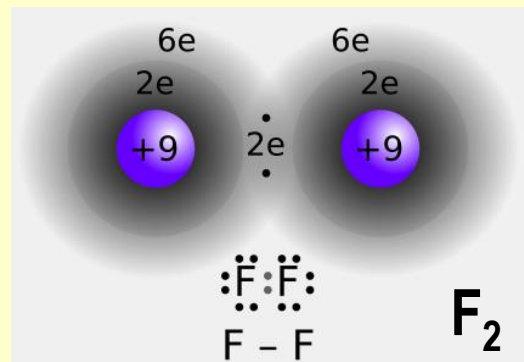
Wiązania atomowe, kowalencyjne – atomy elektroujemne połączone parami wspólnych elektronów walencyjnych. Atomy osiągają konfigurację gazu szlachetnego (wiązania w cząsteczkach H_2 , N_2 , F_2 , H_2O , CO_2 , CH_4 ...)



${}_1\text{H} : 1s^1$

gaz szlachetny:

${}_2\text{He} : 1s^2$



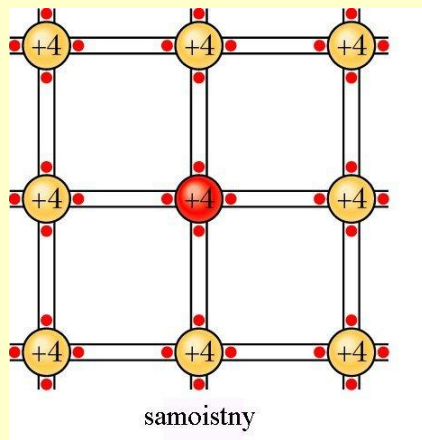
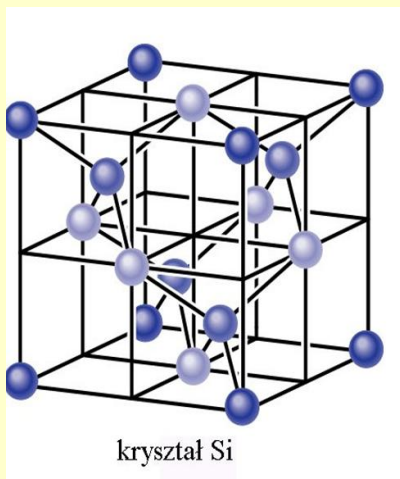
${}_9\text{F} : 1s^2 2s^2 2p^5$

gaz szlachetny:

${}_{10}\text{Ne} : 1s^2 2s^2 2p^6$

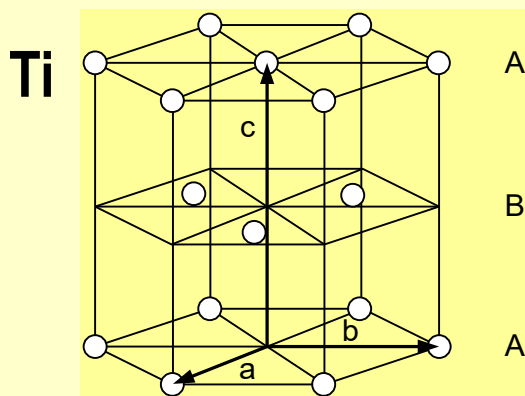
Kryształy kowalencyjne - np. diament (en. wiąz. 3,6 eV/atom), german, krzem,

Brak elektronów swobodnych → **twarde**, posiadają **wysoką temperaturę topnienia**, nie są **dobrymi przewodnikami elektryczności i ciepła**.

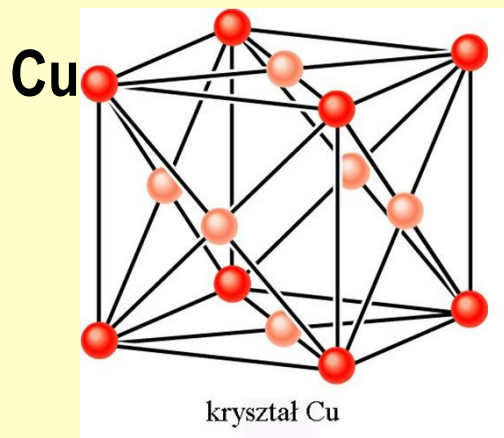


${}_{14}\text{Si} : 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

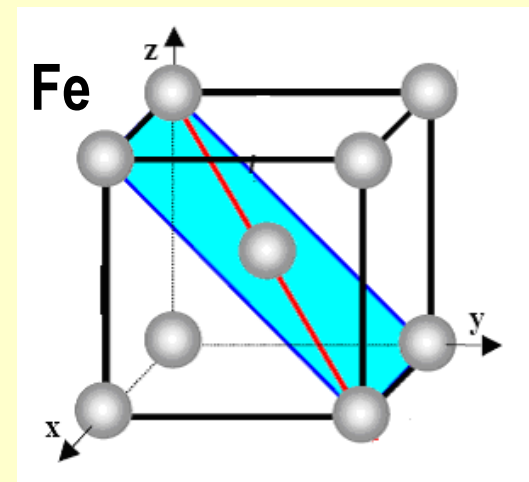
Wiązania metaliczne - między atomami elektrodawnymi, np. kryształy tworzone przez metale alkaliczne (energia wiązania dla Li wynosi 1,6 eV/atom). Wiązanie metaliczne to graniczny przypadek wiązania kowalentnego - elektrony walencyjne są wspólne dla wszystkich jonów w kryształcie.



heksagonalny



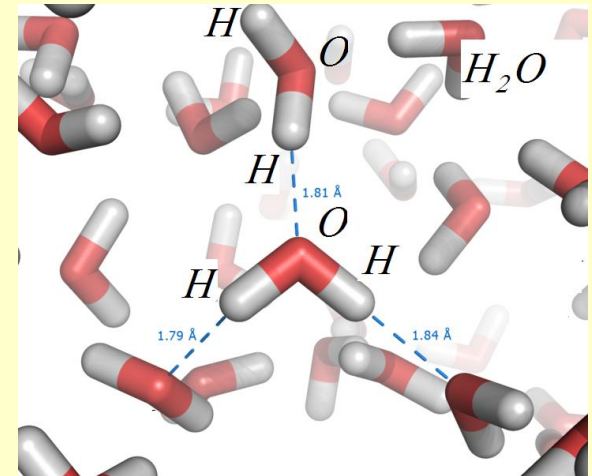
sześcienne (ściennie centr.)



sześcienne (przestrz. centr.)

Kryształ metaliczny → elektrony na zewnętrznych powłokach są słabo związane (mogą zostać uwolnione kosztem bardzo małej energii). Swobodne elektrony poruszają się w całym kryształcie → są wspólne dla wszystkich jonów i tworzą gaz elektronowy wypełniający przestrzeń pomiędzy dodatnimi jonami.

Wiązanie wodorowe- (energia wiązania ok. 0,1-0,2 eV)
Atom wodoru pośredniczy w połączeniu dwóch różnych atomów



Przykłady: oddziaływanie między cząsteczkami wody, w układach biologicznych wodorowe pomiędzy pierwiastkami: P, O, N (białka, kwasy nukleinowe, DNA).

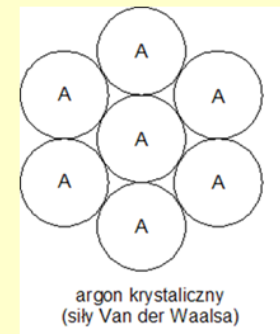
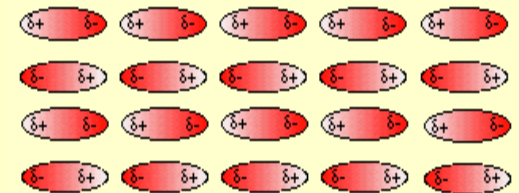
Wiązania molekularne - siły Van der Waalsa
(Energia wiązania około 10^{-2} eV)

Wiązania te tworzą, m.in., w stanie stałym gazy szlachetne (np. hel) i zwykłe gazy, takie jak CO_2 , O_2 , N_2 , H_2 .

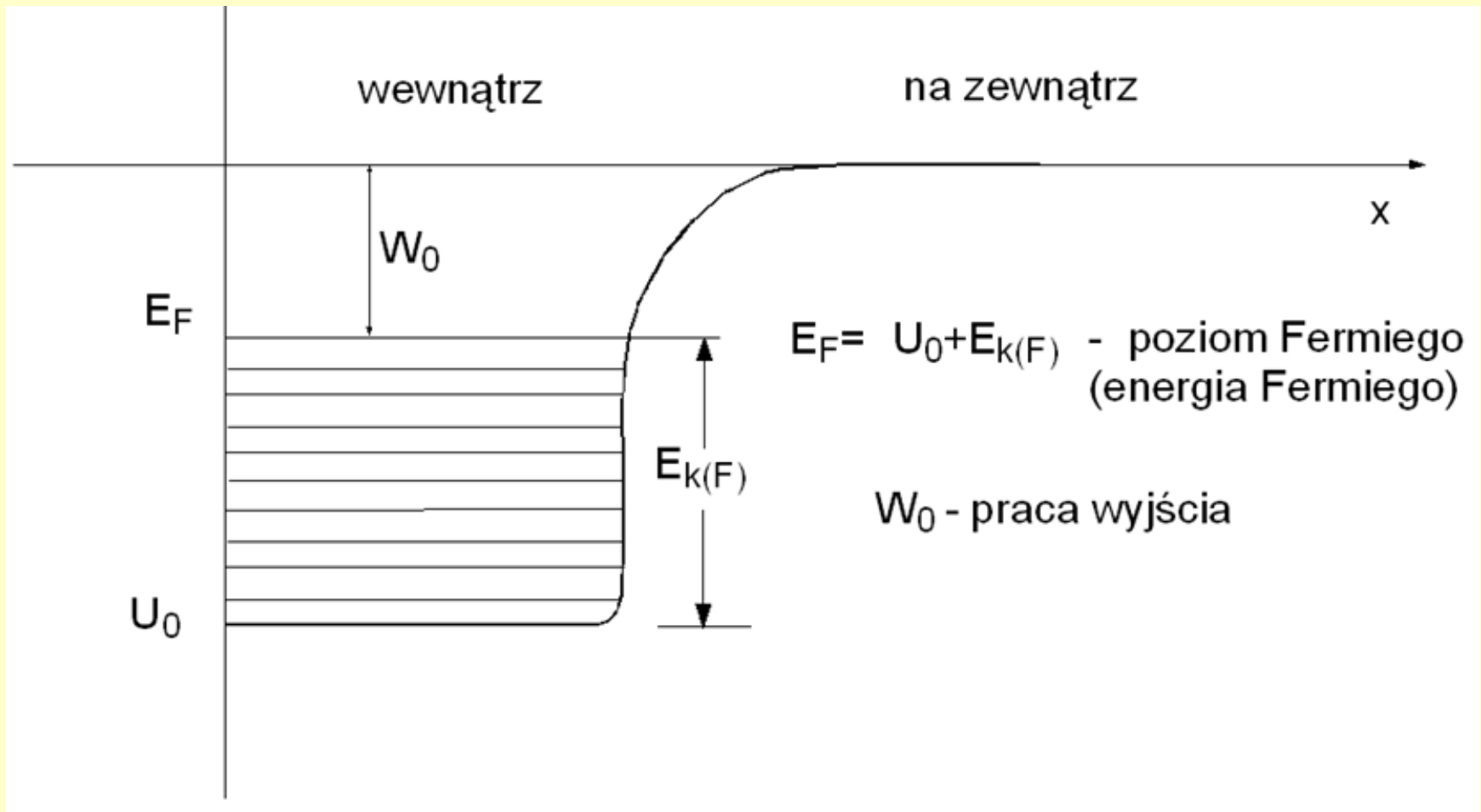
Wynikają one z fluktuacji gęstości chmur elektronowych, tworzących szybkozmienne dipole. Jest ono bardzo słabe.

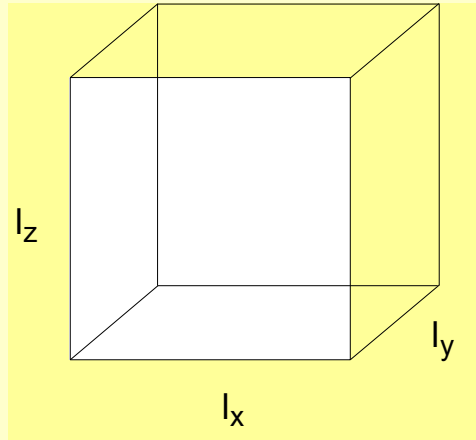
Zestalenie kryształów cząsteczkowych zachodzi dopiero w bardzo niskich temperaturach. Np. dla wodoru 14 K (tj. -259°C).

Kryształy cząsteczkowe $\rightarrow$ **brak elektronów swobodnych** $\rightarrow$ **bardzo złe przewodniki ciepła i elektryczności.**



Teoria swobodnych elektronów w metalach





Elektrony zamknięte w sześciennym pudle

w jednowymiarowej studni potencjału było:

$$p = n \frac{h}{2l}$$

$$p_x = n_x \frac{h}{2l_x}$$

$$p_y = n_y \frac{h}{2l_y}$$

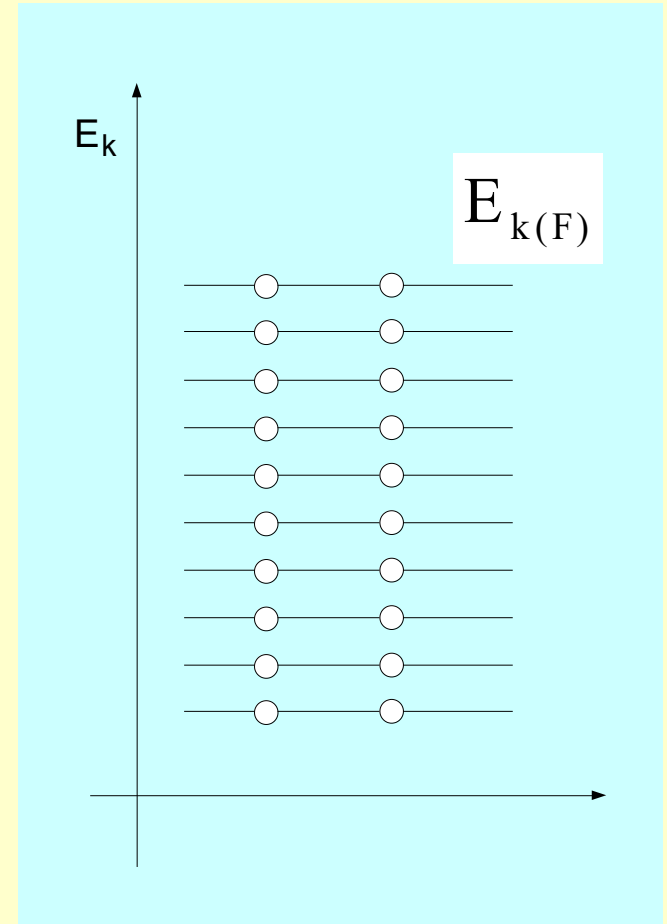
$$p_z = n_z \frac{h}{2l_z}$$

Przyjmijmy dla uproszczenia:

$$l_x = l_y = l_z = 1$$

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = \frac{h^2}{4l^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$

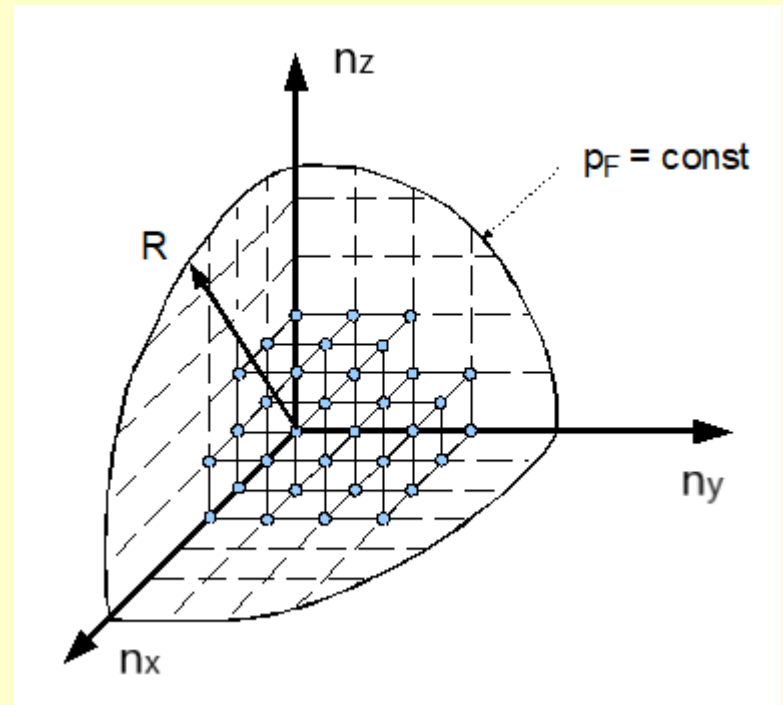
$$E_k = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{8ml^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$



Obliczmy energię
Fermiego

$$p_F = p_{x_F} = n_{x(F)} \frac{h}{2l}$$

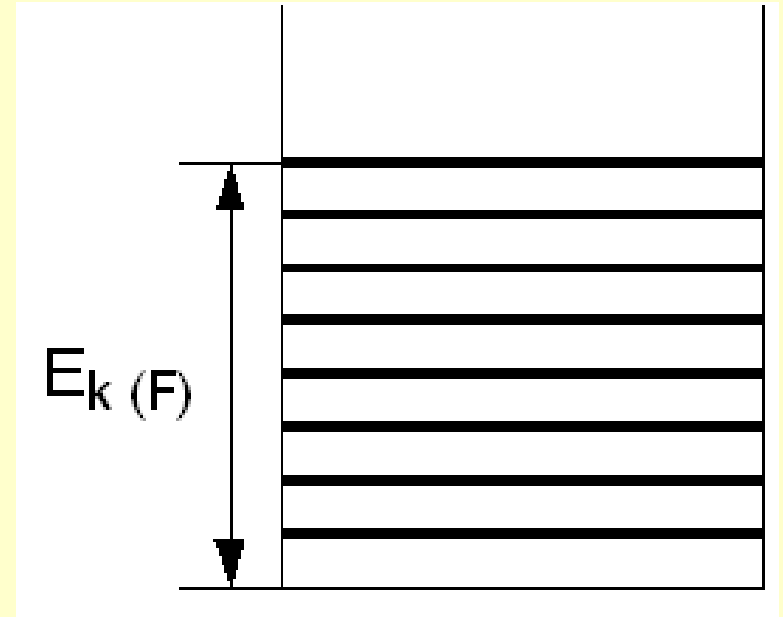
$$R = n_{x(F)}$$



$$E_{k(F)} = \frac{p_F^2}{2m}$$

$$E_{k(F)} = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} n \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$E_{k(F)} = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} n \right)^{\frac{2}{3}}$$



Przykład: $E_{k(F)}$ dla litu

$$\rho = 0,534 \text{ g/cm}^3$$

$$A = 6,94$$

$$n = \frac{N_A}{V_{mol}} = \frac{N_A \rho}{A}$$

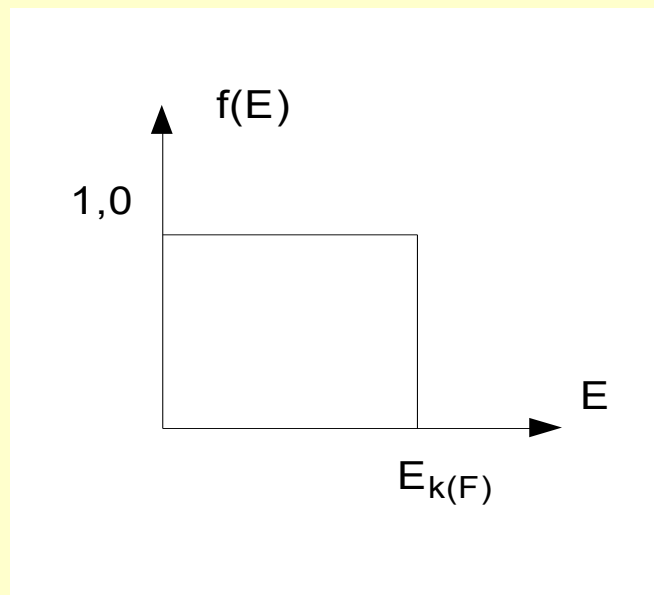
$$E_{k(F)} = 4,7 \text{ eV}$$

Rozkład Fermiego-Diraca

W temperaturze $T=0$

$$f(E) = 1 \quad \text{gdy} \quad E \leq E_{k(F)}$$

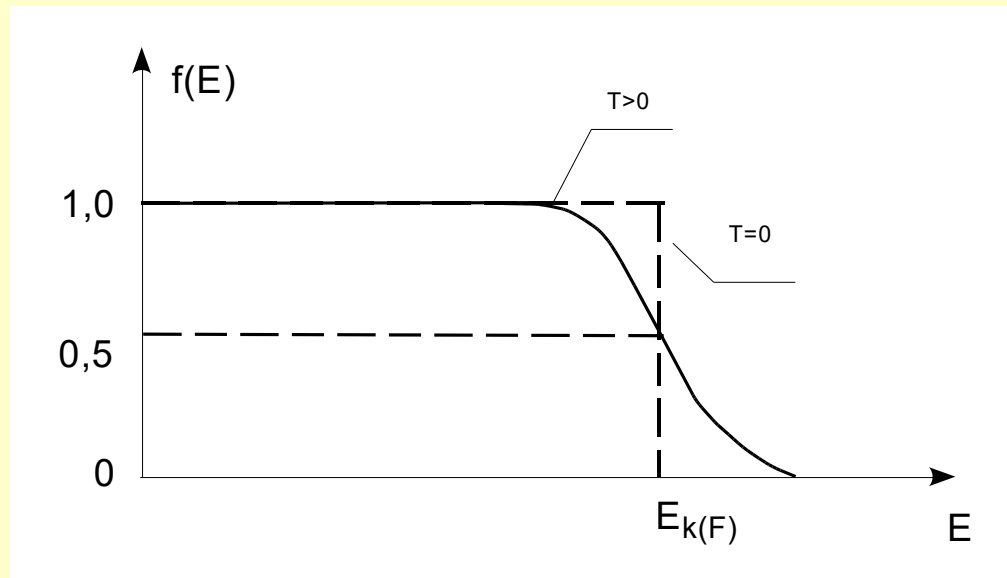
$$f(E) = 0 \quad \text{gdy} \quad E > E_{k(F)}$$

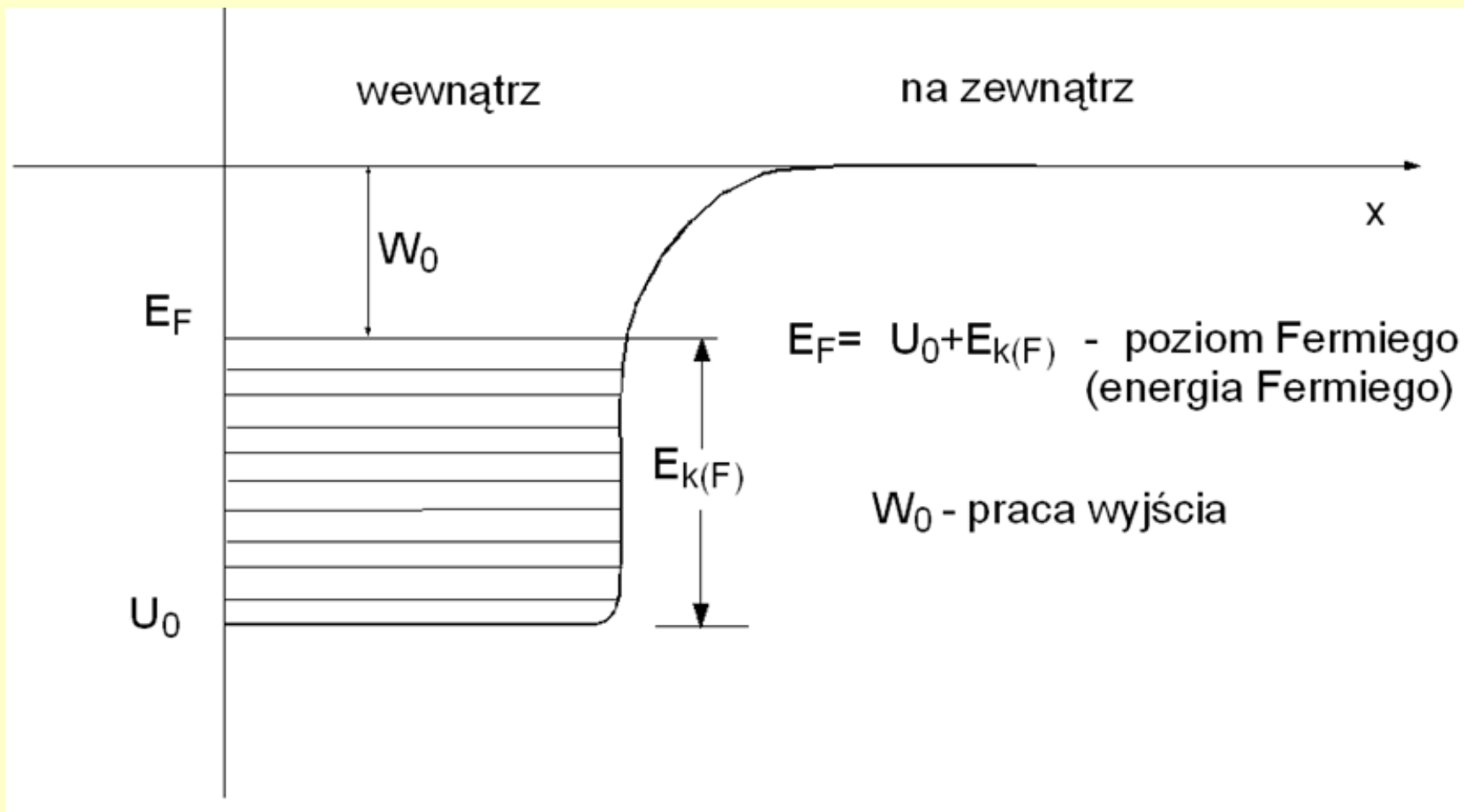


W temperaturach $T>0$

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_{k(F)})/kT} + 1}$$

$$\bar{E} = \frac{3}{5} E_{k(F)}$$

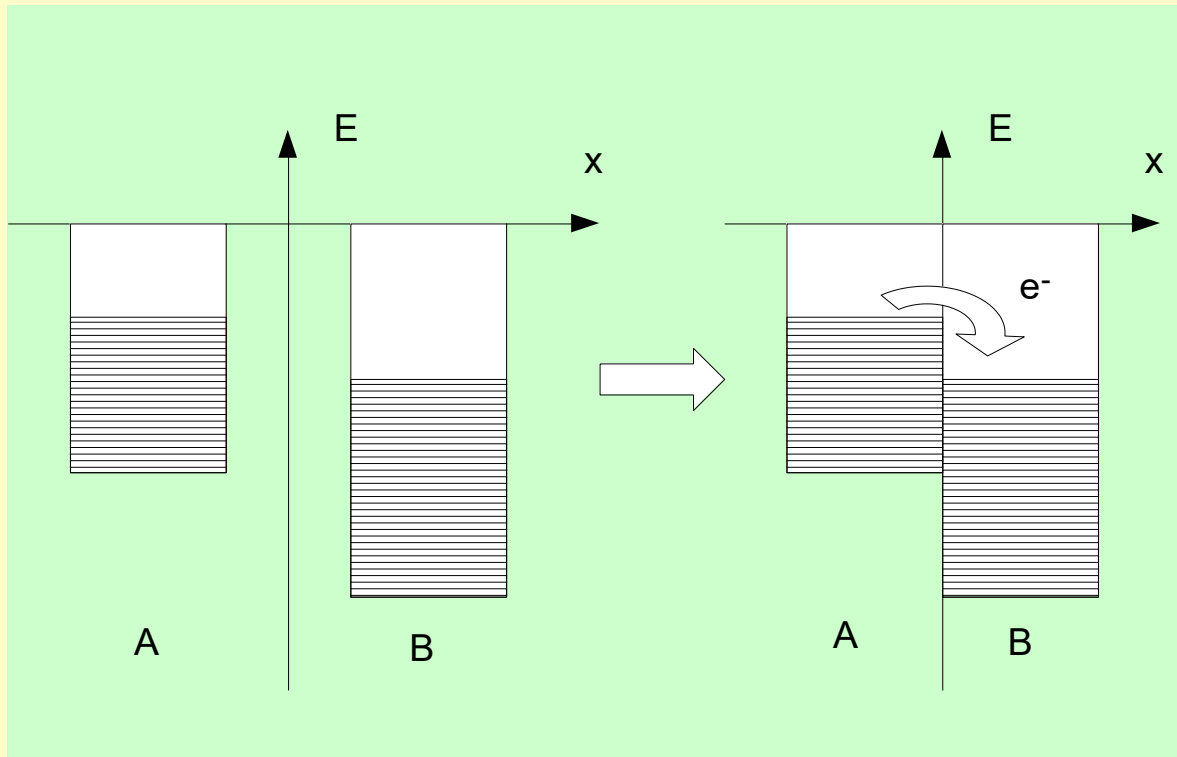




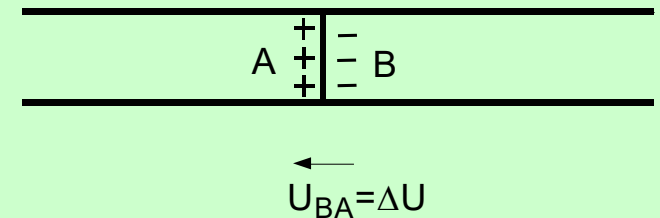
$$E_F = U_0 + E_{k(F)} = -W_0$$

$$E_F = -W_0$$

Potencjał kontaktowy

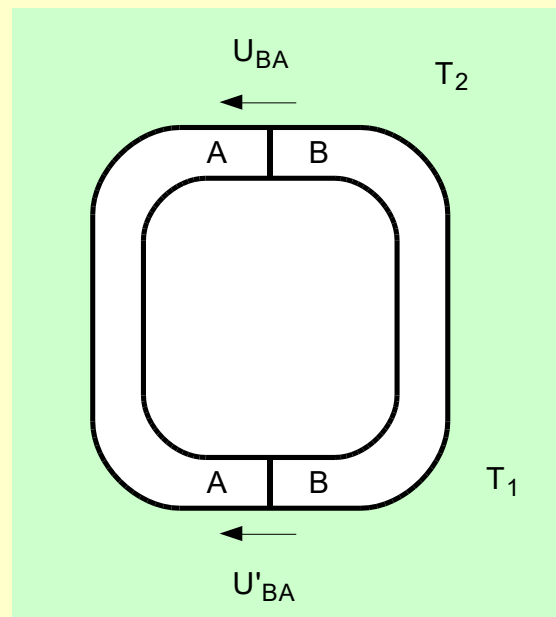


$$\Delta U = E_{F(A)} - E_{F(B)}$$



Działanie termopary:

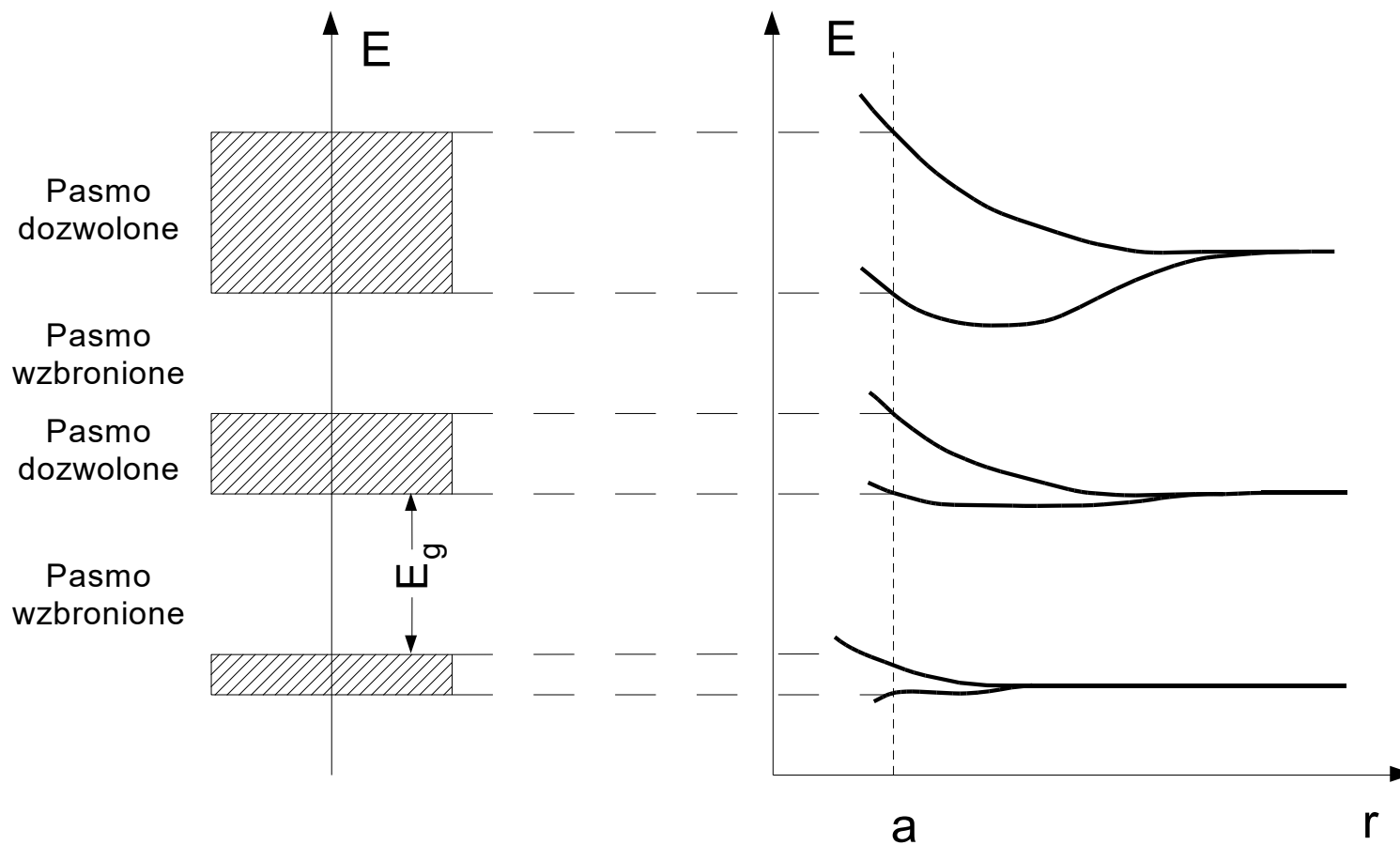
$$U = a + bT$$

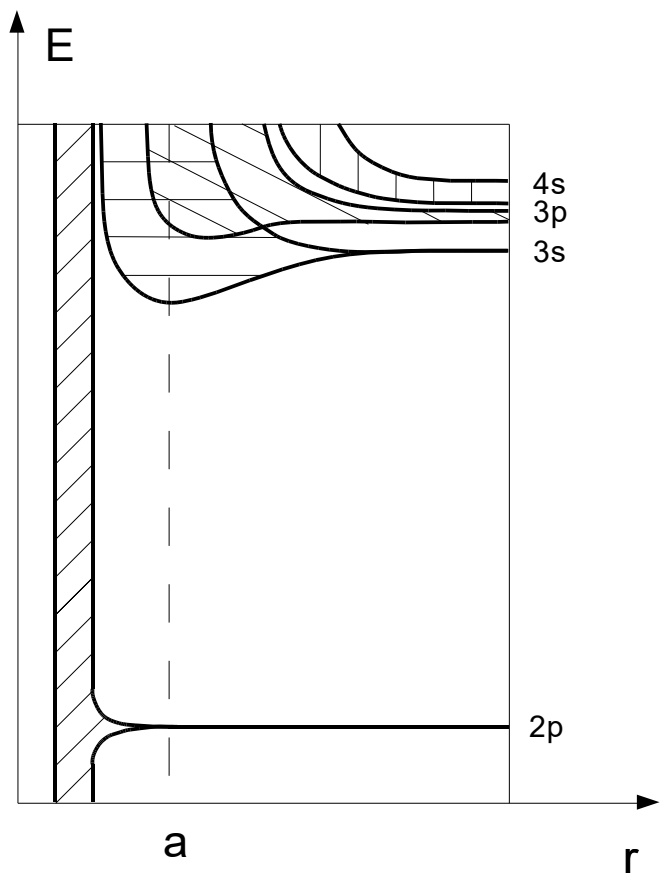


Fe/konstantan	→	do temperatury $t = 760^{\circ}\text{C}$
Cu/konstantan	→	do temperatury $t = 400^{\circ}\text{C}$
chromel/alumel	→	do temperatury $t = 1370^{\circ}\text{C}$
Pt/Pt+10%Ra	→	do temperatury $t = 1700^{\circ}\text{C}$

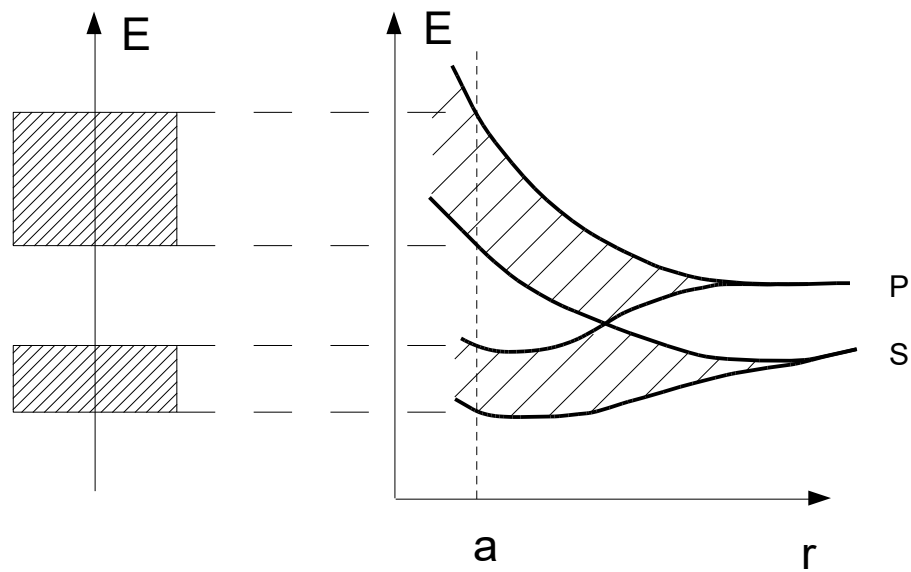
konstantan to stop: Cu(60%) i Ni(40%)
alumel to stop: Ni(94,5%); Mn(2,5%); Al(2%); Si(1%)
chromel to stop: Ni(90%); Cr(10%)

Model silnego wiązania elektronów



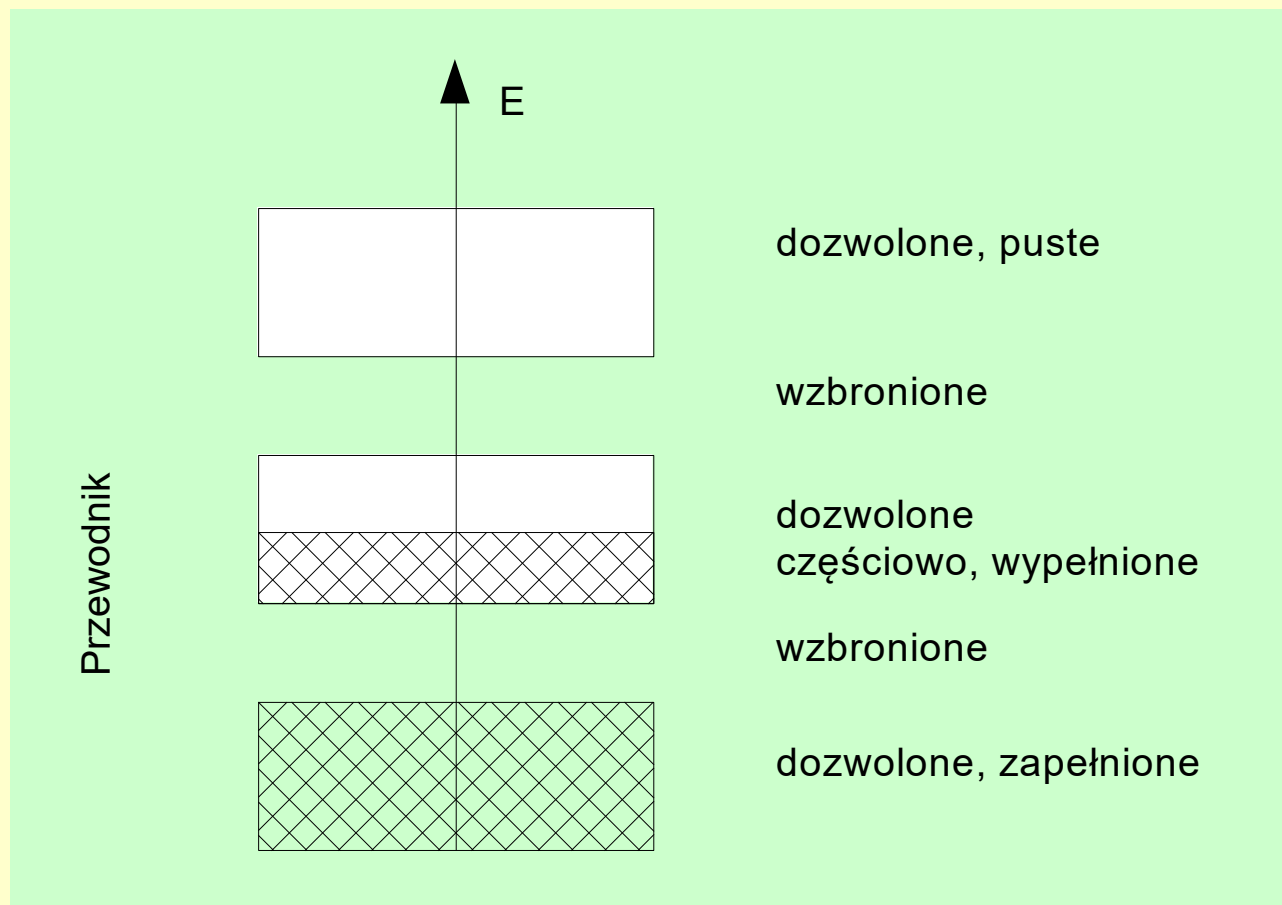


sód



diament

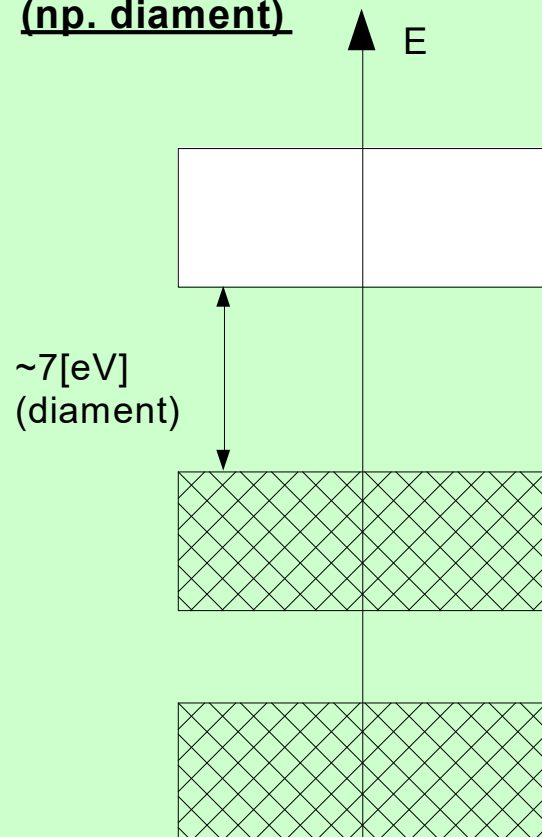
Przewodniki, półprzewodniki i izolatory



Przewodnik

IZOLATORY

(np. diament)



$T=0$

dozwolone, puste

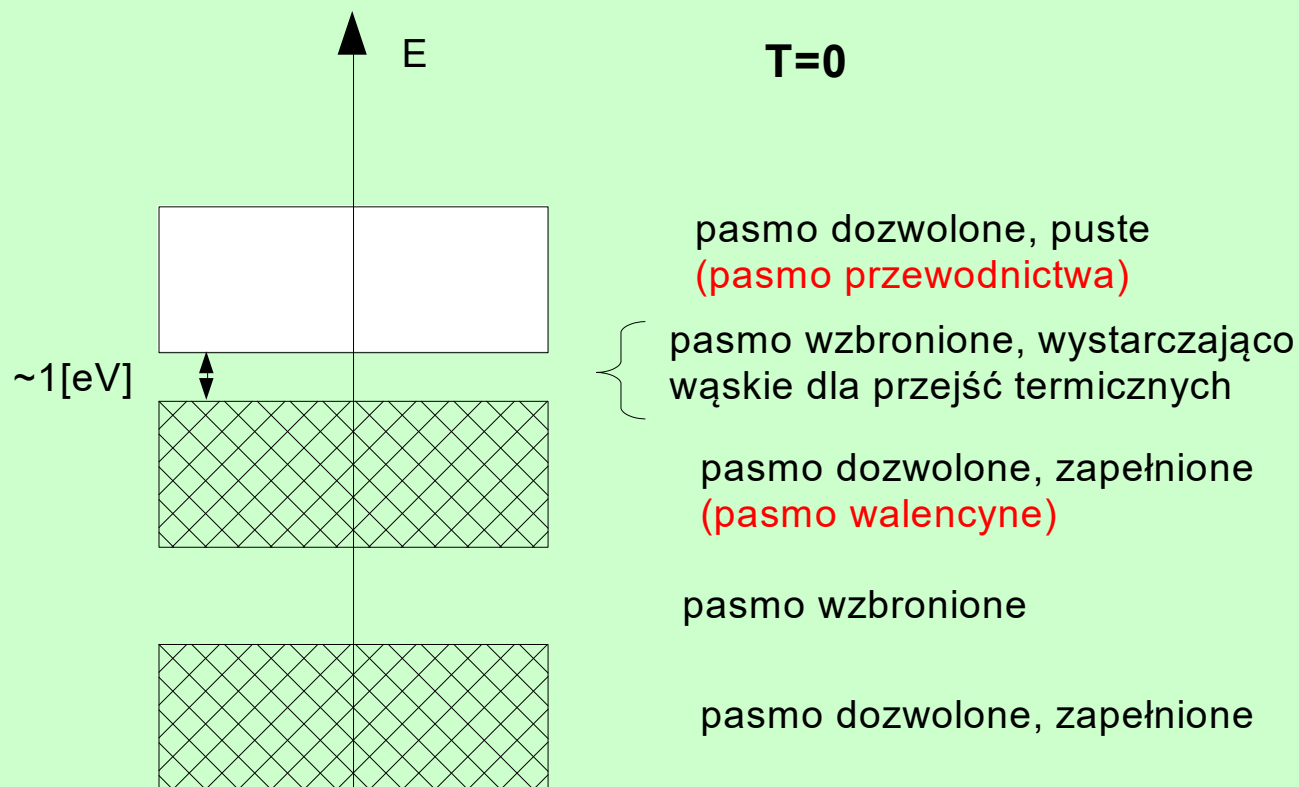
wzbronione, zbyt szerokie
dla przejść termicznych

dozwolone, zapełnione

wzbronione

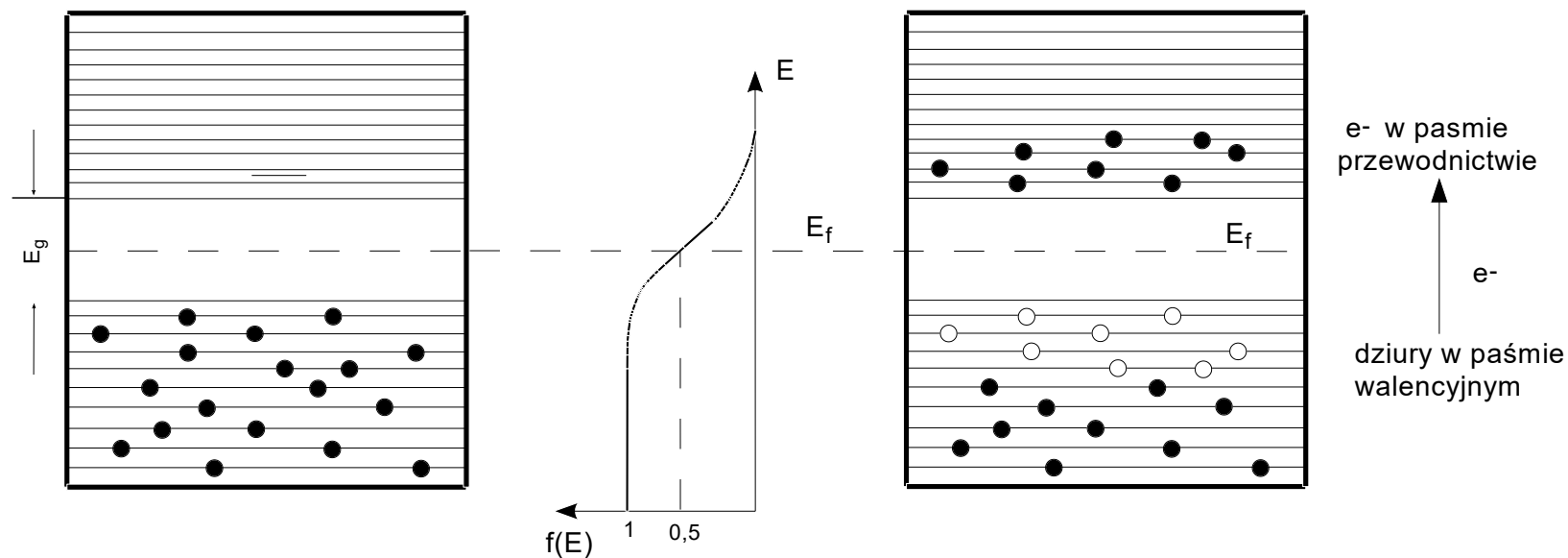
dozwolone, zapełnione

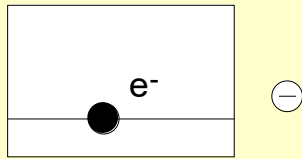
PÓŁPRZEWODNIKI
(IV grupa ukł. Okresowego
np. Ge, Si)



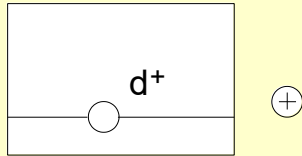
Półprzewodniki

Półprzewodniki samoistne





elektron-dziura

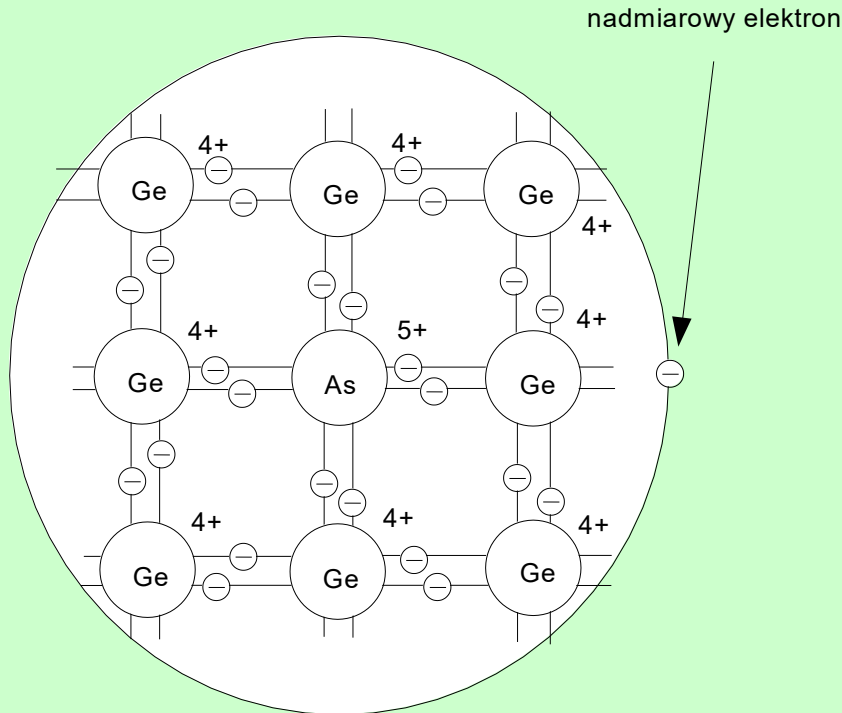


Prawdopodobieństwo wzbudzenia e^- do pasma przewodnictwa:

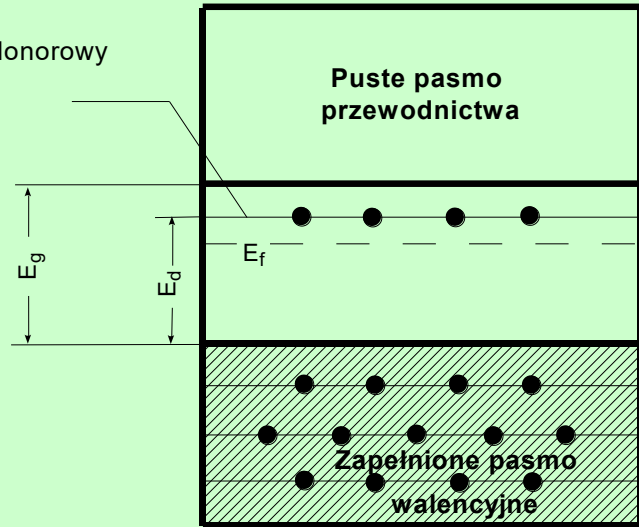
$$p_{wzb} \propto e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

Półprzewodniki domieszkowane

Półprzewodniki typu n



Poziom donorowy



$$E_g = 0,67 \text{ [eV]}$$

$$E_d = 0,66 \text{ [eV]}$$

Atom As dostarcza jednego e^- , którego poziom znajdzie się tuż poniżej pasma przewodnictwa.

Elektrony z poziomów donorowych łatwo zostaną wzbudzone do pasma przewodnictwa.

Przewodnictwo elektryczne uwarunkowane jest zatem tylko ruchem elektronów w paśmie przewodnictwa.

IA																		VIIIA																	
1	H																	2	He																
IIA												IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA																			
3	Li	4	Be											5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne										
11	Na	12	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII			IB	IIIB	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar										
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89	Ac																														
		58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu						
		90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr						



metale proste



metale przejściowe

magnetyczne
metale przejściowe

półprzewodniki



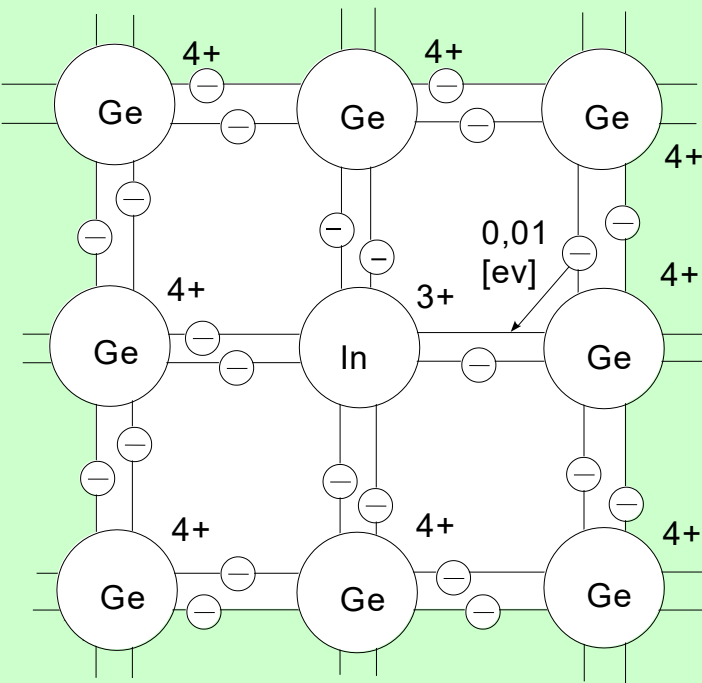
półmetale



izolatory

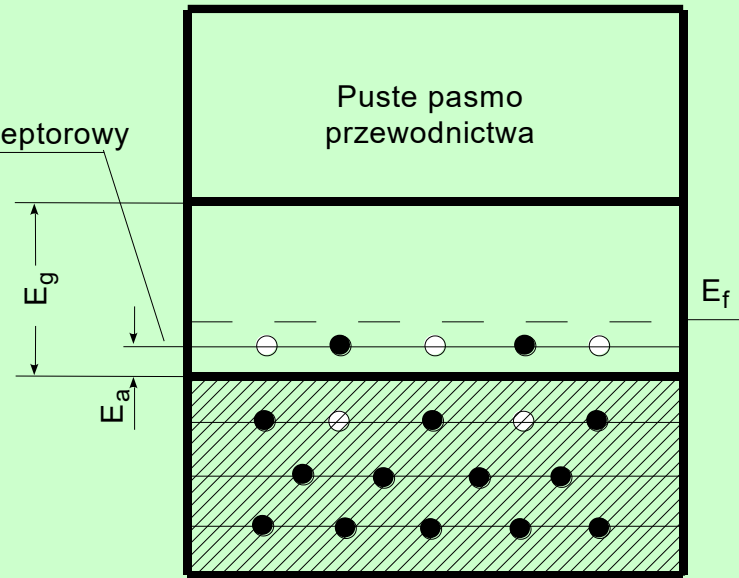
ziemie rzadkie
i lantanowce

Półprzewodnik typu p



$$E_a = 0,01 \text{ [ev]}$$
$$E_g = 0,67 \text{ [ev]}$$

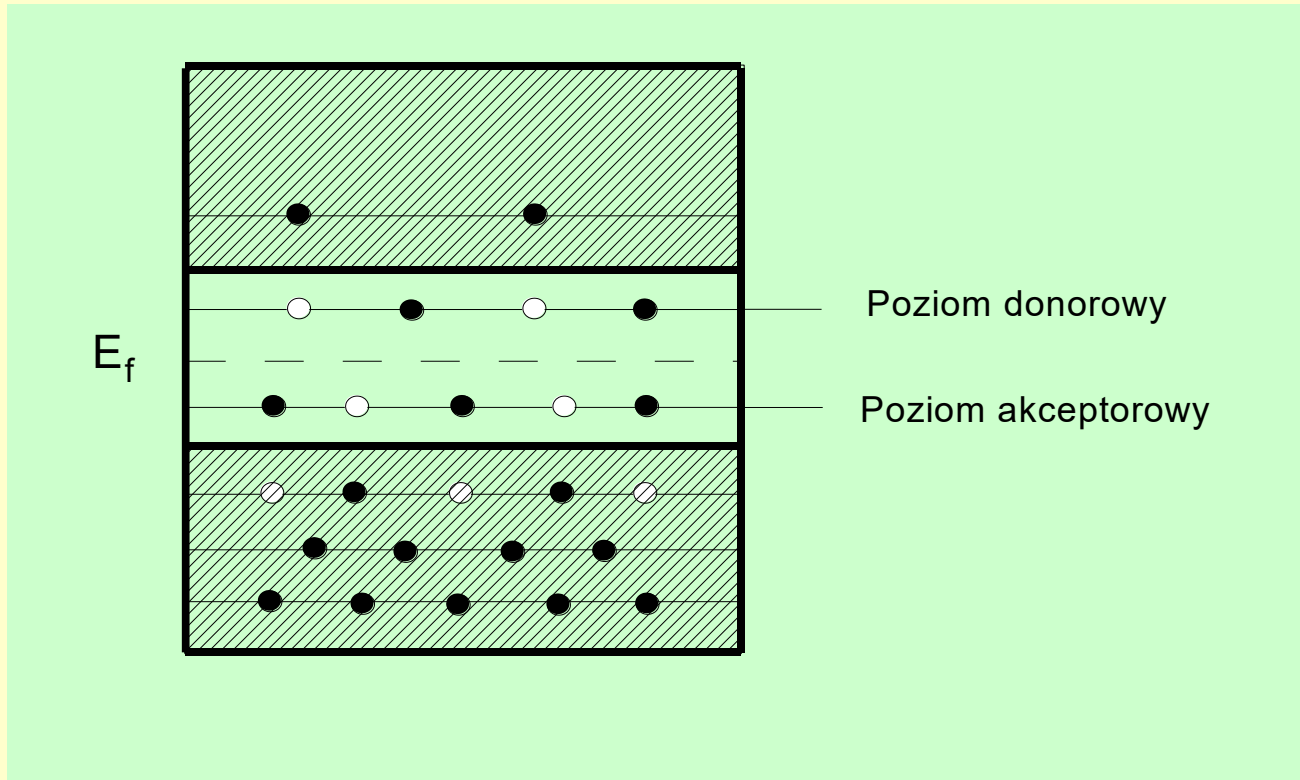
Poziom akceptorowy



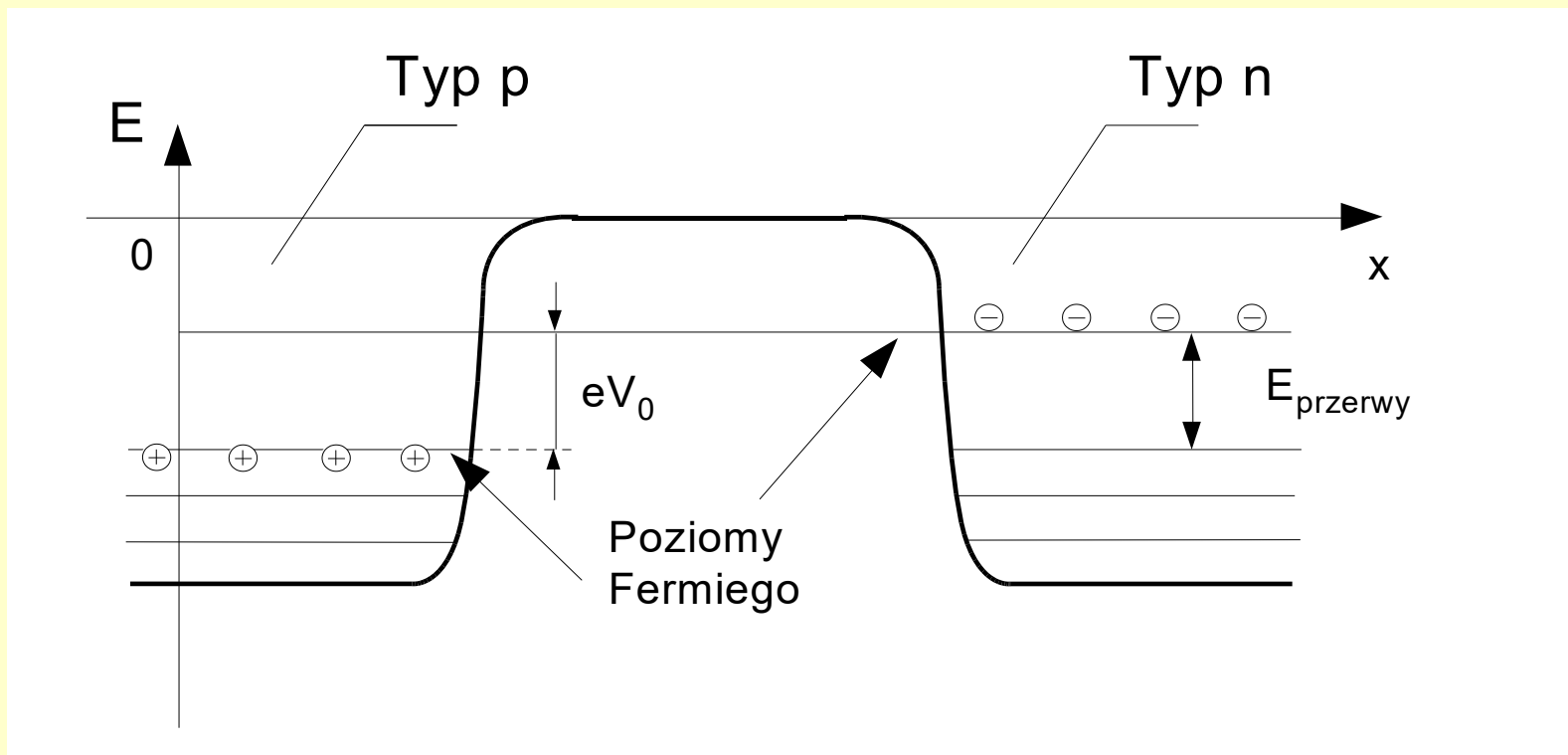
Atom In nie może tworzyć kompletnego wiązania z Ge (brakuje mu jednego e^-). Brakujący e^- „pożyczony” jest od atomu Ge. W efekcie w paśmie walencyjnym powstaje dziura (d^+), a w pasmie wzbronionym – dodatkowy poziom energetyczny z „pożyczonym” e^- (poziom akceptorowy)

Przewodnictwo elektronów półprzewodniku typu p jest uwarunkowane tylko ruchem dziur w paśmie walencyjnym.

Półprzewodniki typu mieszanego

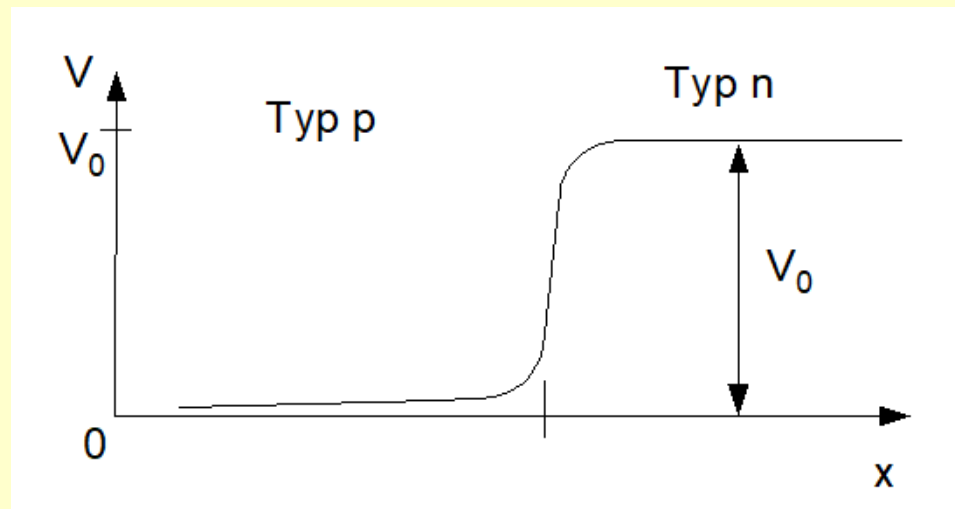


Złącze p-n



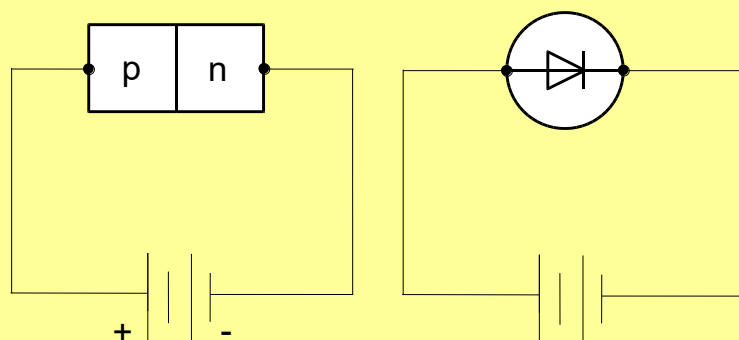
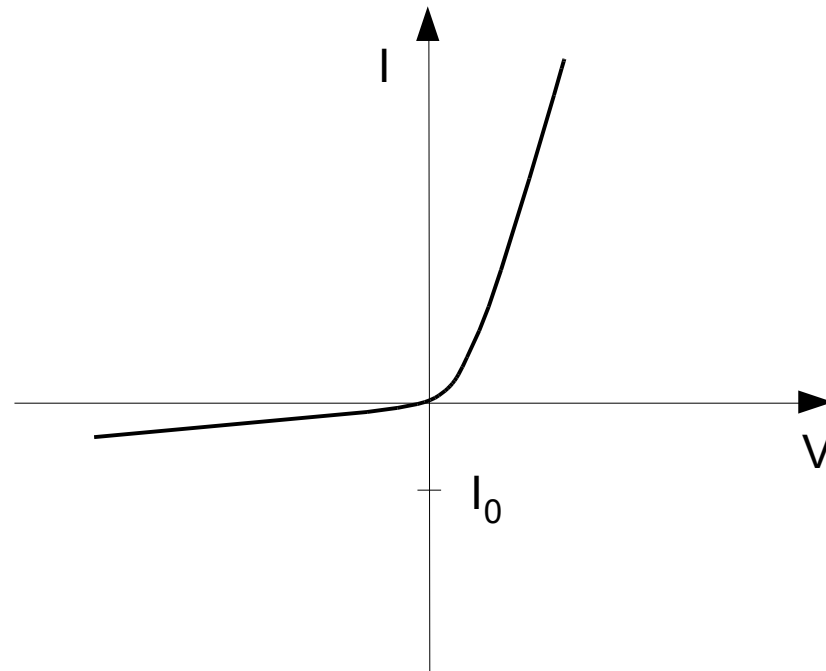
Przepływ nośników będzie zachodził aż nie wyrównają się poziomy Fermiego. Wskutek tego obszar typu p zostanie naładowany ujemnie dodatkowymi elektronami, a obszar typu n będzie naładowany dodatnio

Powstaje kontaktowa różnica potencjałów V_0 , równa pierwotnej różnicy potencjałów Fermiego, której wartość $\approx E_{\text{przerwy}}$



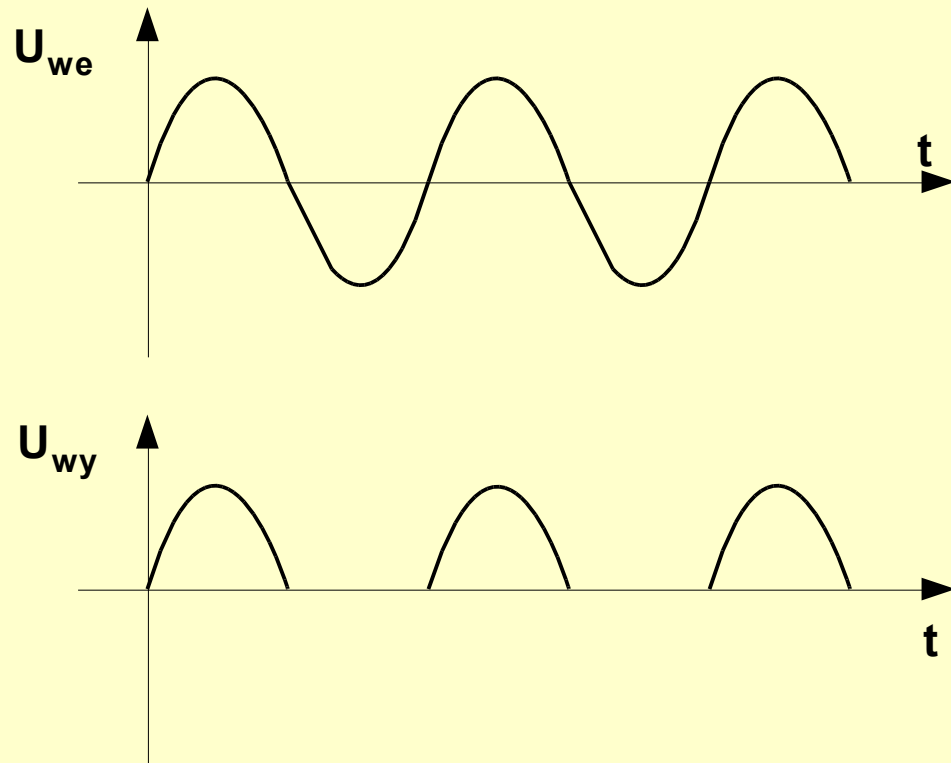
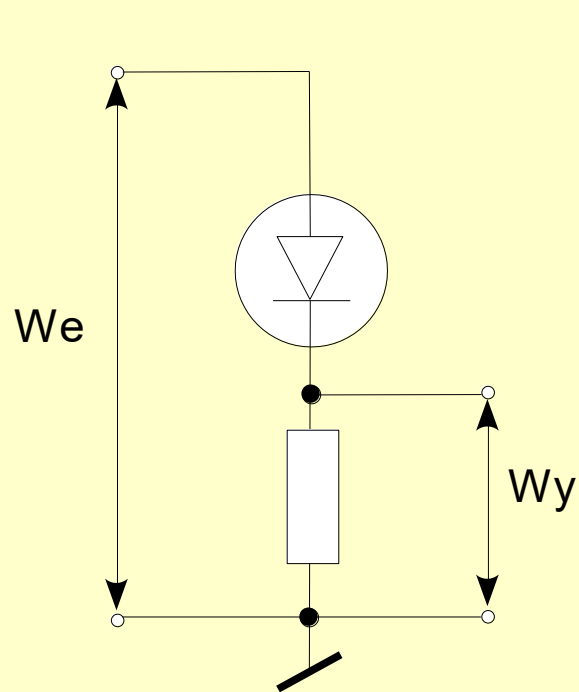
Prąd w złączu (p-n):

$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{eV}{kT} \right] - 1 \right)$$

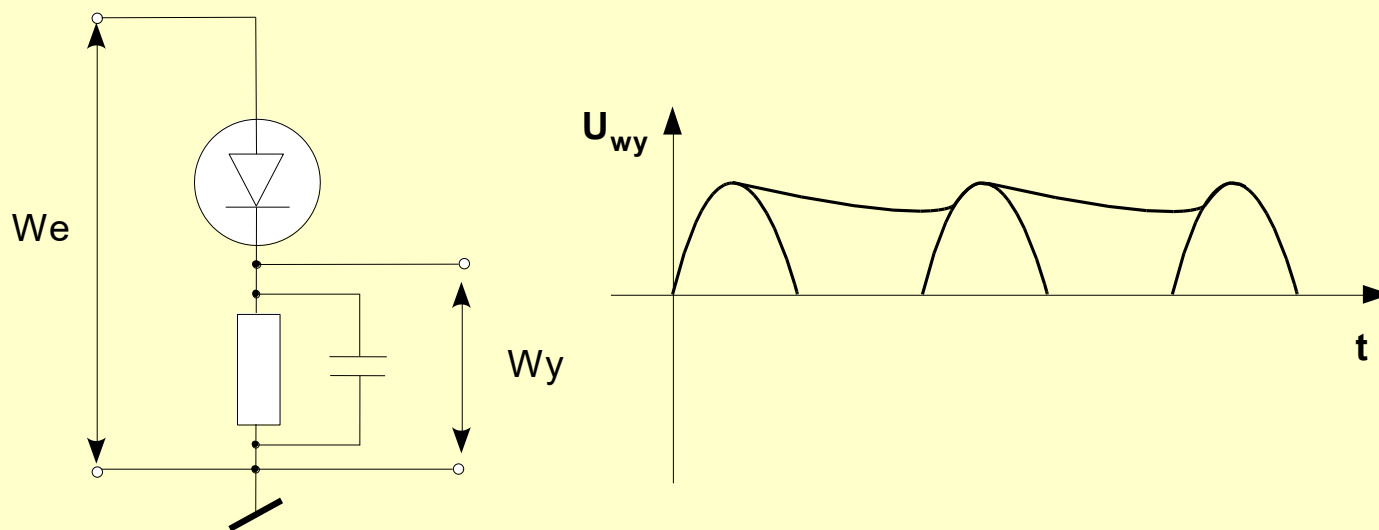


Dioda n-p działa jak prostownik !

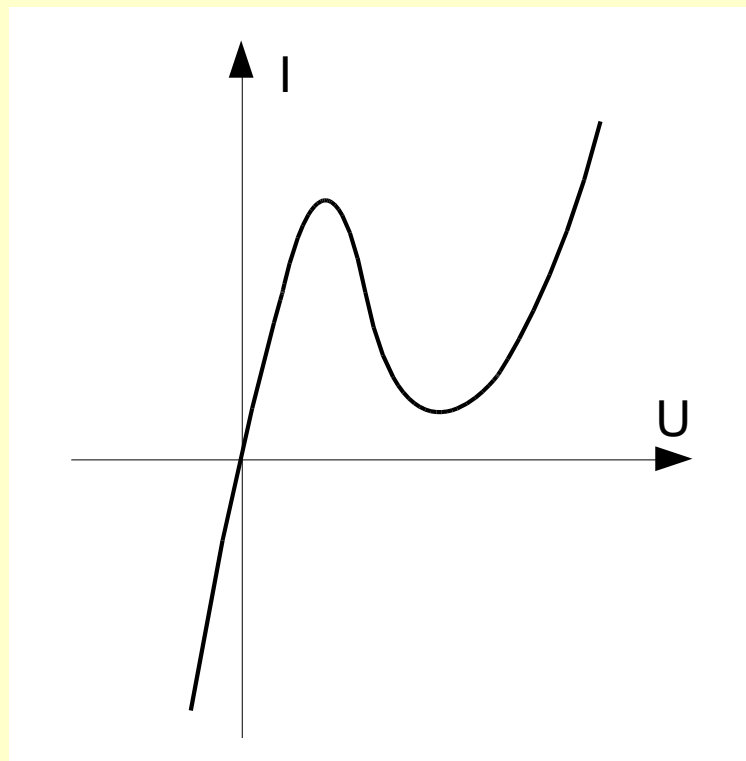
Zastosowanie diody: prostownik



Wygładzenie przebiegu prądu po prostowaniu:

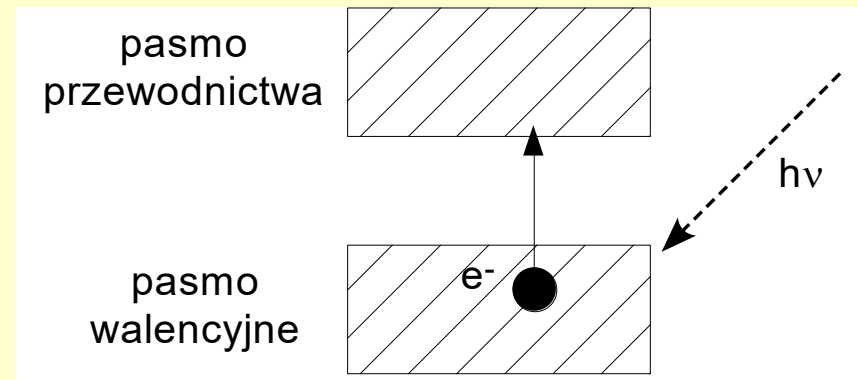
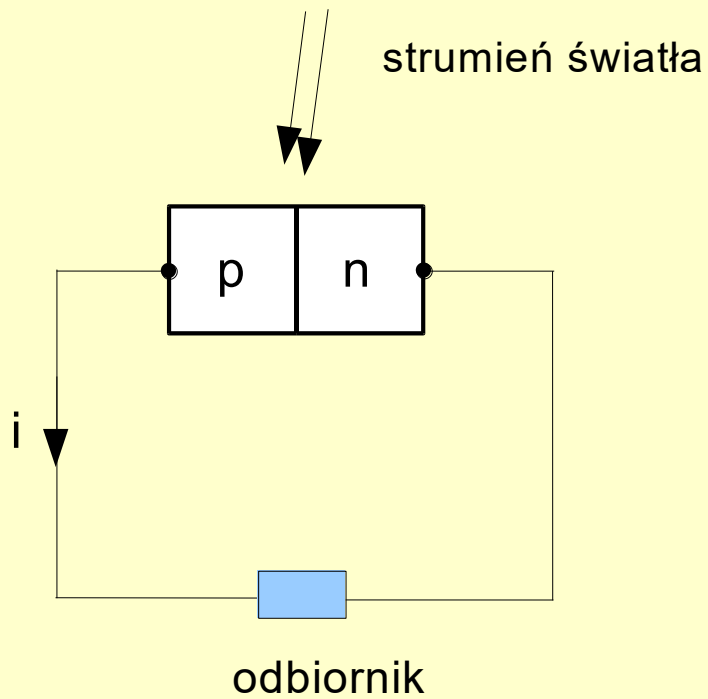


Dioda tunelowa



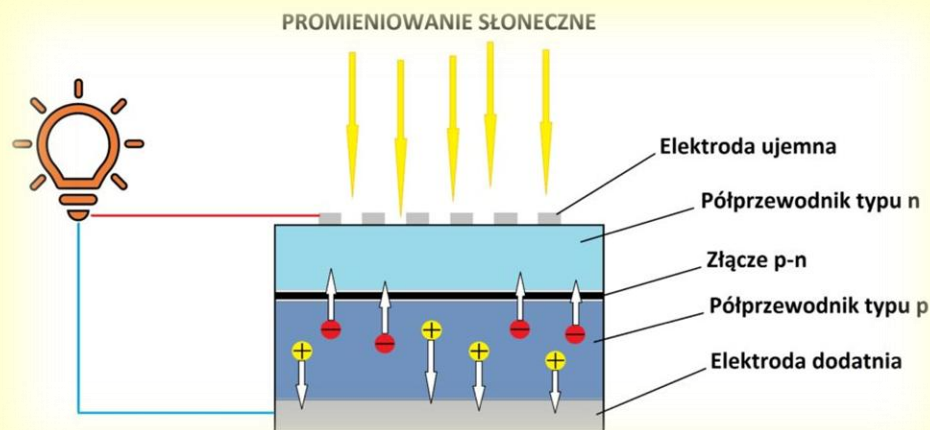
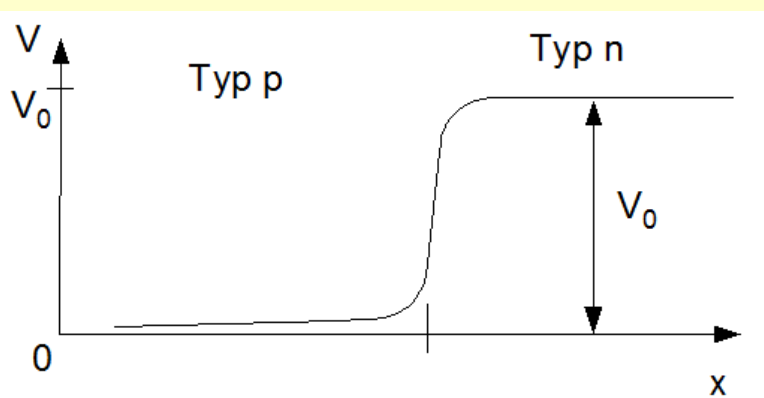
Interesujący i ważny dla zastosowań (np. w automatyce) jest zakres ujemnej oporności.

Baterie słoneczne



Jeśli złącze *p-n* oświetlimy, to elektrony z pasma walencyjnego, będą wzbudzone do pasma przewodnictwa (powstaną pary: e^- , dziura).

Pole elektryczne wewnątrz półprzewodnika, związane z obecnością złącza *p-n*, przesuwa nośniki różnych rodzajów w różne strony. Elektrony trafiają do obszaru *n*, dziury do obszaru *p*. Rozdzielenie nośników ładunku w złączu powoduje powstanie na nim zewnętrznego napięcia elektrycznego.

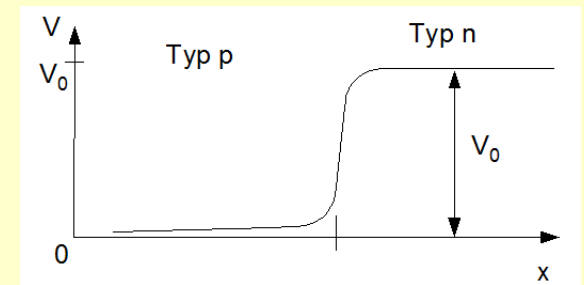
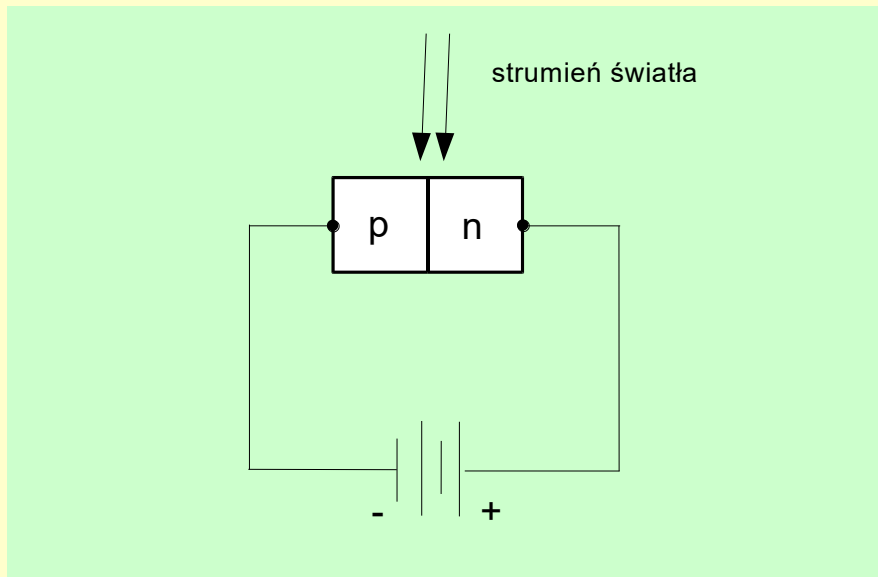


Mamy zamianę światła na moc elektryczną.

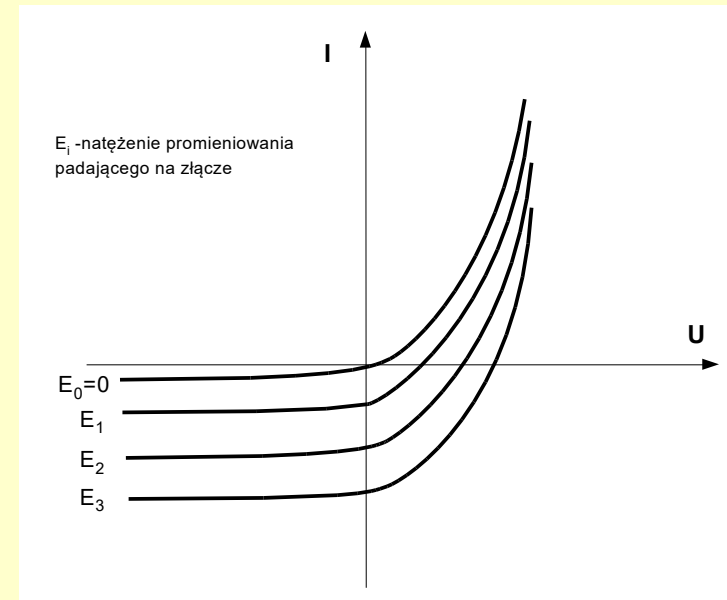
Krzemowa bateria daje napięcie: 0,5 V, zaś sprawność przetwarzania: 15%.

Fotodiody

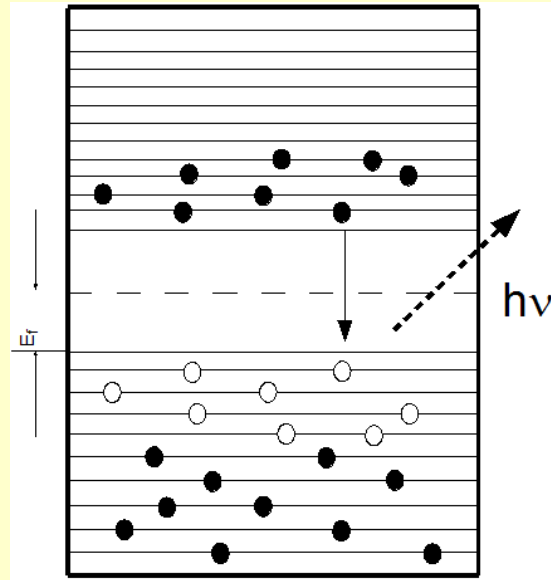
Jeśli baterię słoneczną spolaryzujemy zaporowo, wówczas małe natężenie prądu I_0 wzrośnie wielokrotnie, jeśli wskutek oświetlenia będą wytwarzane dodatkowe nośniki prądu → prąd gwałtownie wzrośnie wskutek oświetlenia strumieniem światła.



Jest to wykorzystywane w fotokomórkach.



Diody wysyłające światło

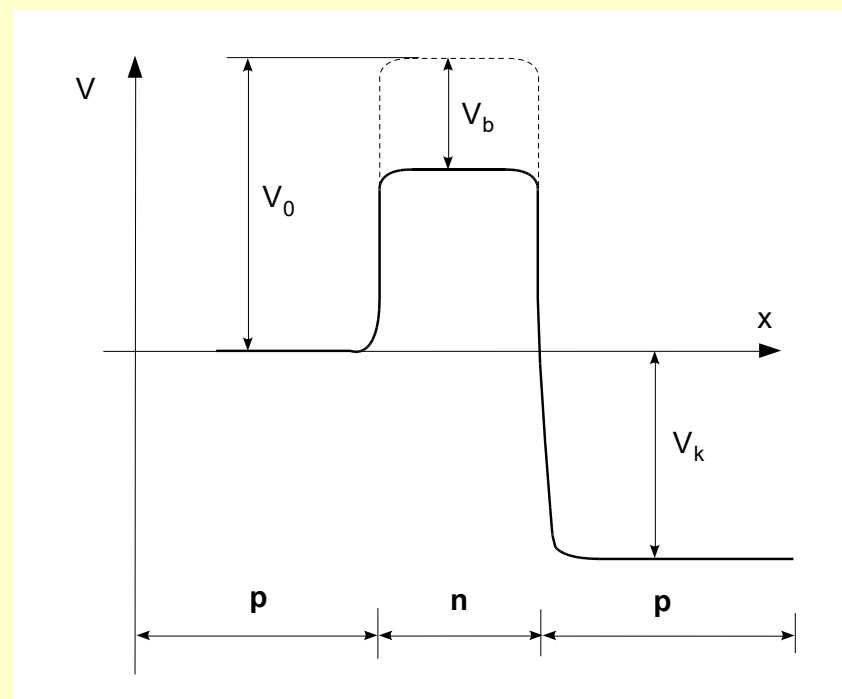
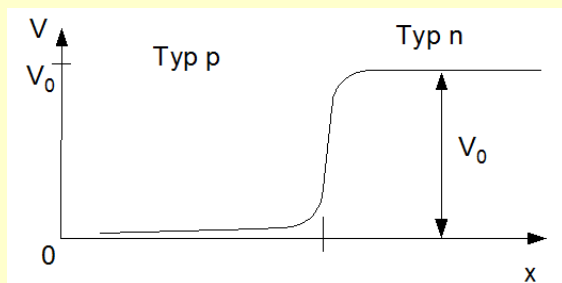
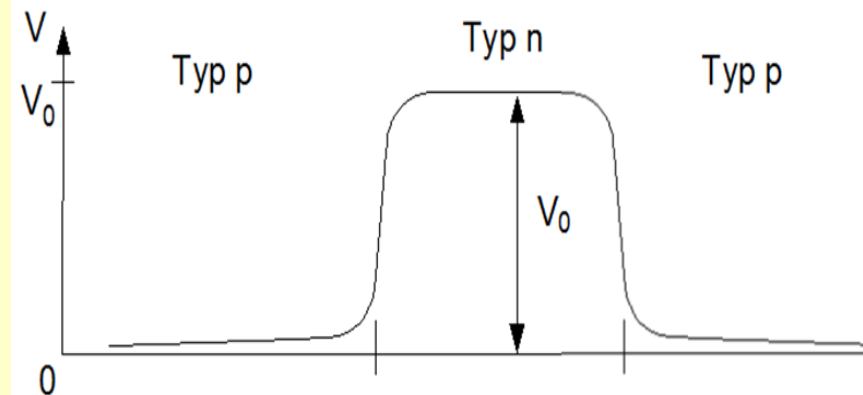
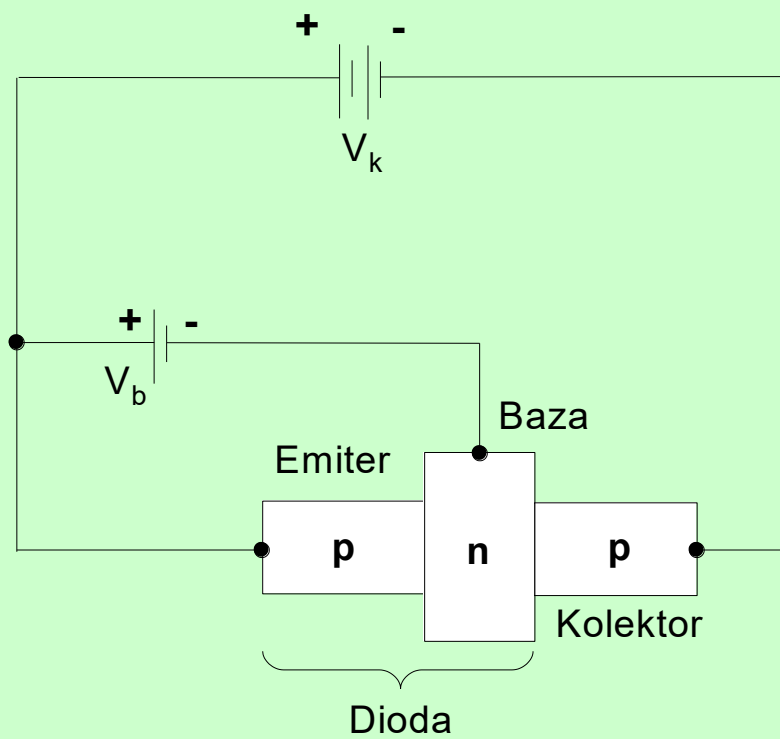


Dioda zasilana w kierunku przewodzenia napięciem na tyle dużym, że elektrony przewodnictwa w trakcie zderzeń wytwarzają pary $e^- \leftrightarrow d^+$

Każdy akt rekombinacji $\rightarrow$ wysyłane fotony (GeAs $\rightarrow$ światło czerwone).
Wydajność zamiany energii elektronu na światło widzialne = 100% (podobnie działa laser na ciele stałym).

Wskaźniki cyfrowe w kalkulatorach, sygnalizatory w urządzeniach $\rightarrow$ diody emitujące światło (LED: Light Emission Diodes).

Tranzystor p-n-p

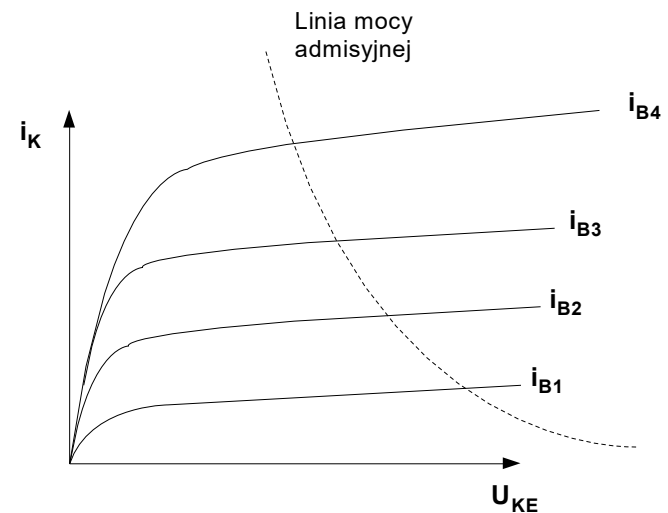
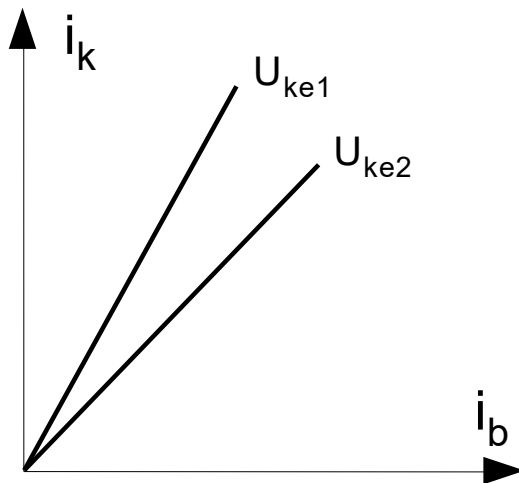
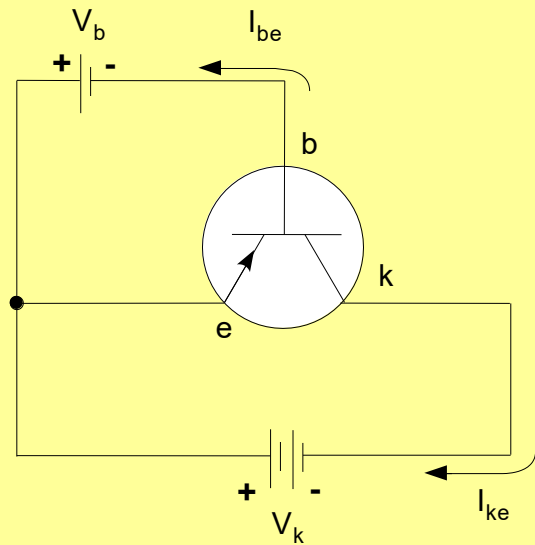


Tranzystor jako wzmacniacz

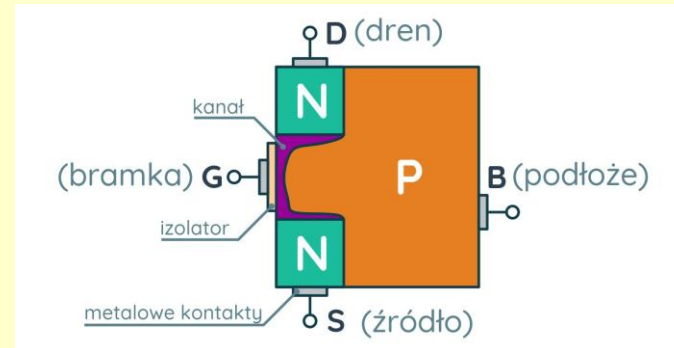
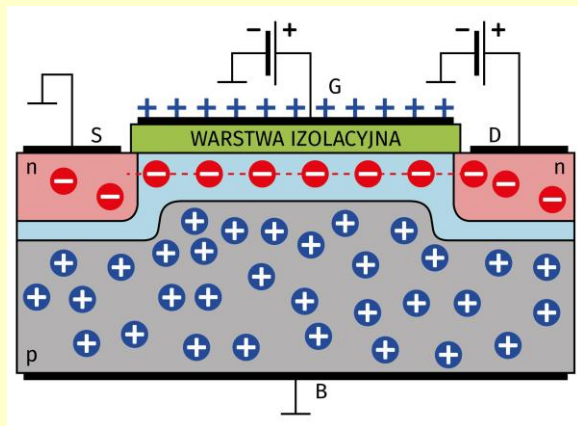
Współczynnik wzmocnienia prądowego β :

$$\beta = \frac{I_k}{I_b}$$

Typowo, jego wartość wynosi około 100.



Tranzystor MOSFET (*Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor*) to tranzystor sterowany napięciem



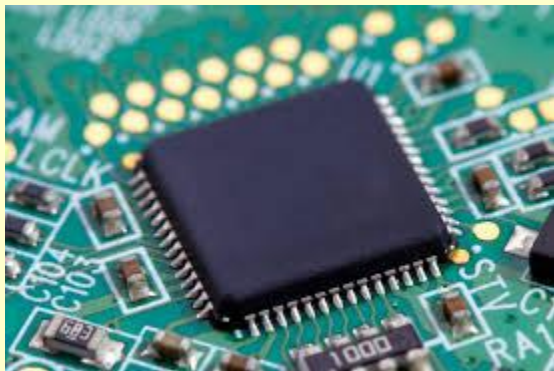
Brak napięcia na bramce: $V_{GS} = 0V$ — tranzystor wyłączony i prąd praktycznie nie płynie.

Napięcie bramka–źródło przekroczy napięcie progowe: $V_{GS} > V_{TH}$ — elektrony zaczynają przepływać od źródła (S) do drenu (D)

Najważniejsze cechy MOSFET-a

- ✓ bardzo mały prąd sterujący bramki
- ✓ duża szybkość działania
- ✓ wysoka sprawność
- ✓ możliwość sterowania dużą mocą
- ✓ idealny do układów cyfrowych i energoelektroniki

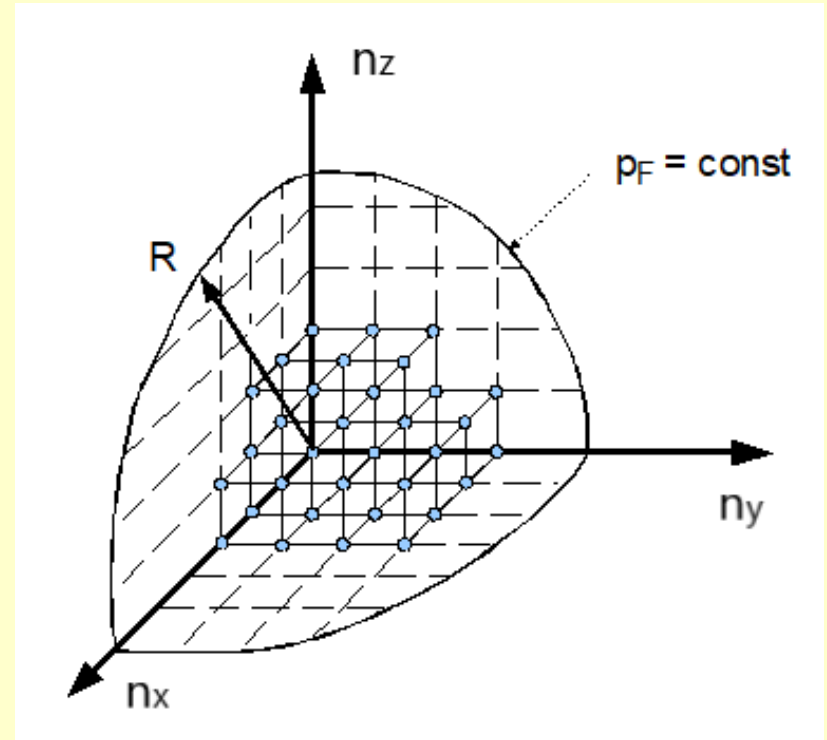
Elektronika o wysokim stopniu integracji – **układy scalone**



DODATEK – wyliczenie energii Fermiego

$$p_F = p_{x_F} = n_{x(F)} \frac{h}{2l}$$

$$n_{x(F)} = \frac{2lp_F}{h}$$



Promień sfery Fermiego wynosi:

$$R = n_{x(F)}$$

$$R = \frac{2lp_F}{h}$$

Całkowita liczba stanów zajętych:

$$\frac{N}{2} = \frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1}{6} \pi \left(\frac{2l}{h} p_F \right)^3$$

bo: $(R = \frac{2lp_F}{h})$

$$N = \frac{8\pi l^3 p_F^3}{3h^3}$$

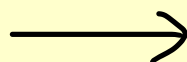
$$N = \frac{8\pi V p_F^3}{3h^3}$$

Koncentracja elektronów:

$$n' = \frac{N}{V}$$

$$n' = \frac{8\pi p_F^3}{3h^3}$$

$$p_F = \left(\frac{3h^3}{8\pi} n' \right)^{\frac{1}{3}}$$



$$p_F = \frac{h}{2} \left(\frac{3}{\pi} n' \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$E_k = \frac{p_F^2}{2m}$$

$$p_F = \frac{h}{2} \left(\frac{3}{\pi} n' \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$E_{k(F)} = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} n' \right)^{\frac{2}{3}}$$