

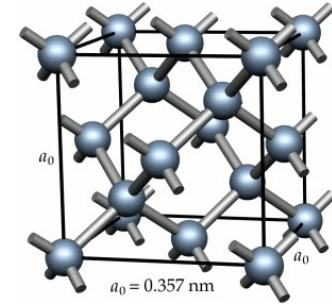


AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Przewodnictwo elektryczne ciał stałych

Własności elektryczne ciał stałych

Komputery, kalkulatory, telefony komórkowe są elektronicznymi urządzeniami półprzewodnikowymi wykorzystującymi wiedzę na temat ciał stałych.



Ciała stałe klasyfikuje się pod względem własności elektrycznych na podstawie następujących wielkości fizycznych:

1. rezystywność (opór właściwy) ρ (ohm·m) w temperaturze pokojowej
2. temperaturowy współczynnik rezystancji TWR lub α (K⁻¹)

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

3. koncentracja nośników ładunku n (m⁻³) zdefiniowana jako liczba nośników w jednostce objętości

Własności elektryczne ciał stałych

Na podstawie pomiarów jedynie przewodnictwa elektrycznego w temperaturze pokojowej stwierdzamy, że istnieją materiały, które praktycznie nie przewodzą prądu elektrycznego – są to **izolatory**

Izolator ma bardzo dużą rezystywność. Dla przykładu, diament ma rezystywność 10^{24} razy większą od miedzi.

Aby podzielić pozostałe materiały (te, które nie są izolatorami) należy posłużyć się wynikami pomiarów ρ , α i n :

metale i półprzewodniki

- $\rho(\text{półprzewodników}) \gg \rho(\text{metali})$
- α (półprzewodników) jest duże i ujemne (rezystancja półprzewodnika maleje z temperaturą a dla metalu rośnie)
- $n(\text{półprzewodników}) \ll n(\text{metali})$

Półprzewodniki w układzie okresowym

						VIIIA	
			III-V			2	
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	He 4.003
		5	6	7	8	9	10
		B	C	N	O	F	Ne
		10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.183
		13	14	15	16	17	18
		Al	Si	P	S	Cl	Ar
		26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948
IB	IIB						
29	30	31	32	33	34	35	36
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80
47	48	49	50	51	52	53	54
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
107.870	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30
79	80	81	82	83	84	85	86
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)	(210)	(222)
			II-VI				
			I-VII				

Grupa III-V

Grupa II-VI

Grupa I-VII

Własności elektryczne ciał stałych

Cu – typowy metal, Si – typowy półprzewodnik

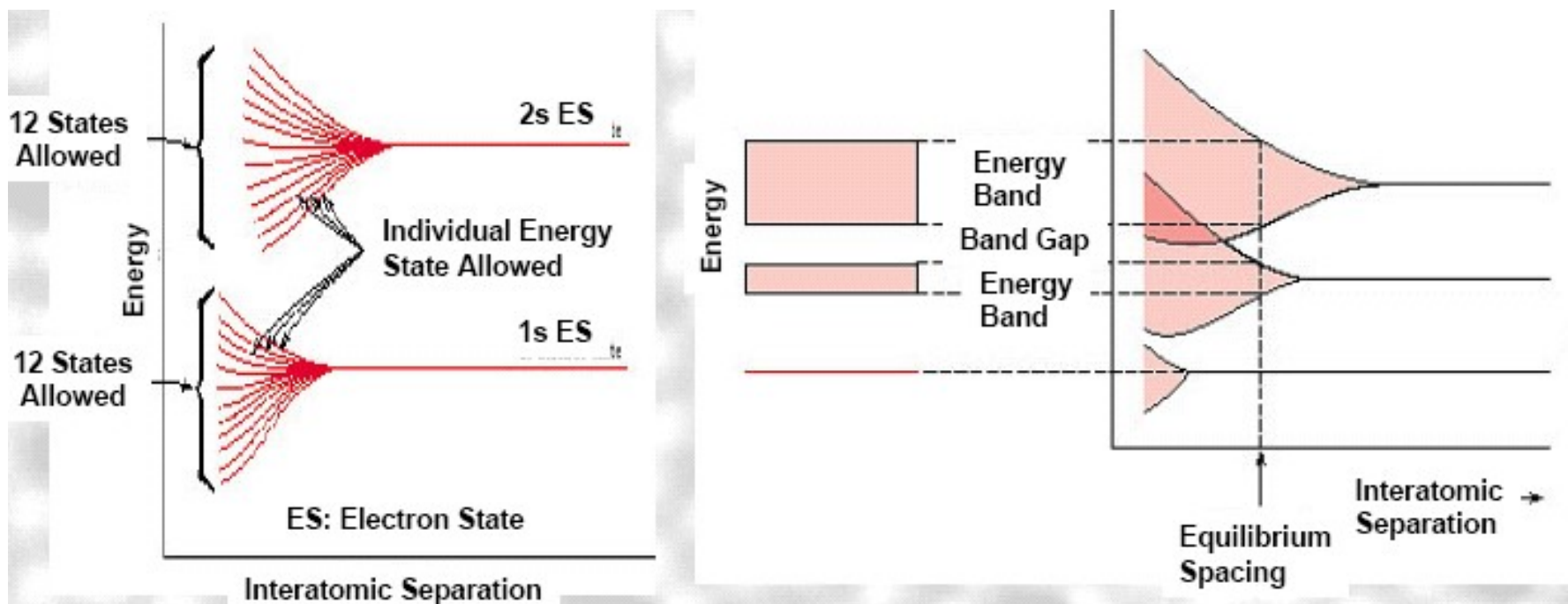
Własność	Jednostka	Cu	Si
Rodzaj przewodnika		metal	półprzewodnik
Rezystywność, ρ	ohm·m	$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^3$
TWR, α	K ⁻¹	$+4 \cdot 10^{-3}$	$-70 \cdot 10^{-3}$
Koncentracja nośników ładunku	m ⁻³	$9 \cdot 10^{28}$	$1 \cdot 10^{16}$



AGH

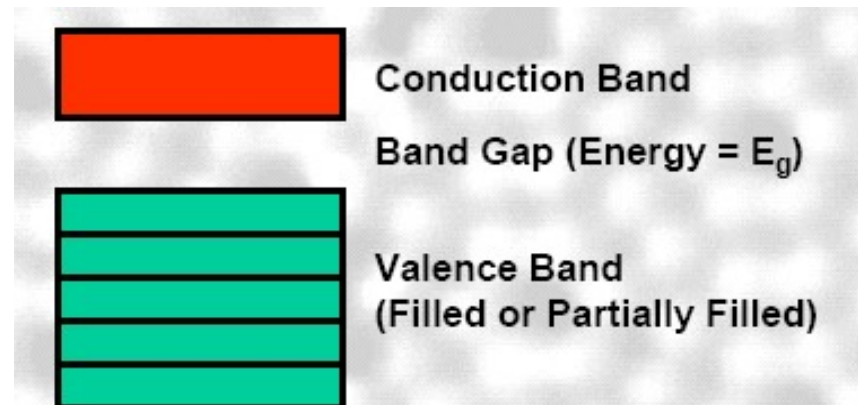
Struktura pasmowa

Izolowany atom ma dobrze zdefiniowane **poziomy elektronowe**. Podczas tworzenia ciała stałego, odległość między atomami maleje, poziomy **rozszerzają się** (dla N atomów każdy poziom rozszerza się na N podpoziomów).



Struktura pasmowa

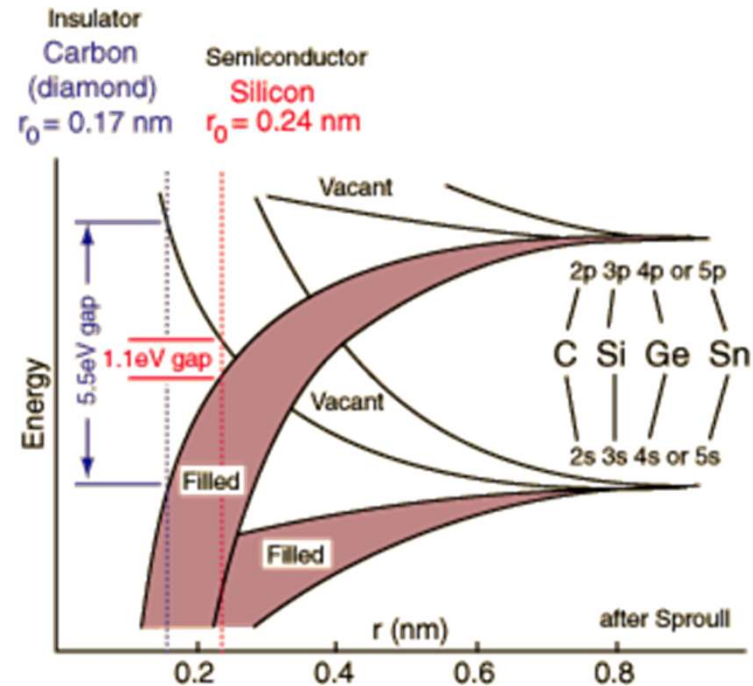
Indywidualne poziomy energetyczne ciała stałego tworzą **pasma energetyczne**, sąsiednie pasma są rozdzielone **przerwą energetyczną** (zakres energii, której nie może posiadać elektron)



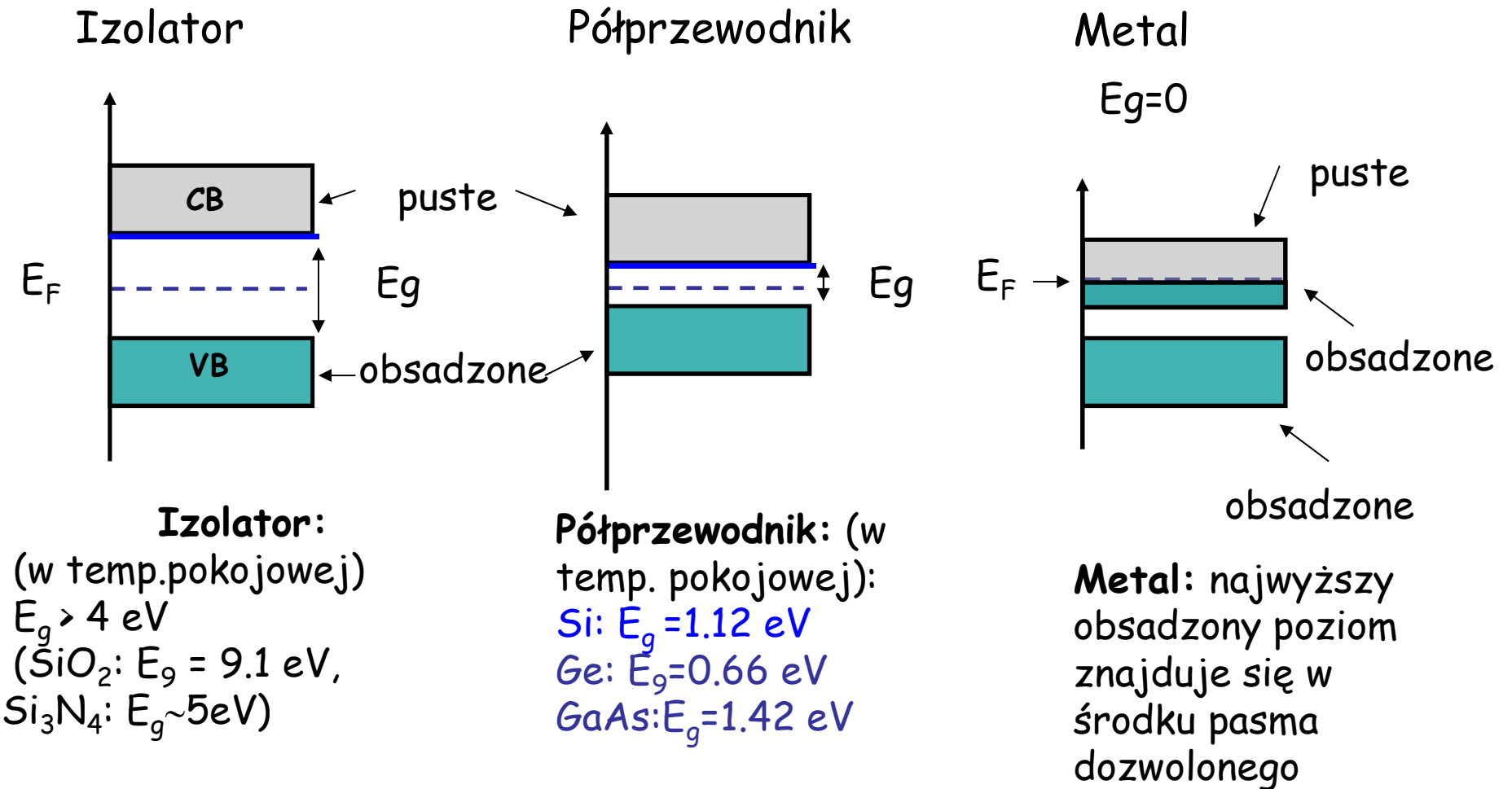
Struktura pasmowa

Typowe wartości przerwy energetycznej sięgają kilku eV. Ze względu na to, że liczba atomów N jest rzędu 10^{24} , pojedyncze poziomy energetyczne w paśmie są bardzo bliskie.

stała sieci (Å)		E_g (eV)
3.46	C 2p ²	6
5.42	Si 3p ²	1.1
5.62	Ge 4p ²	0.72
6.46	Sn 5p ²	0.08
	Pb 6p ²	



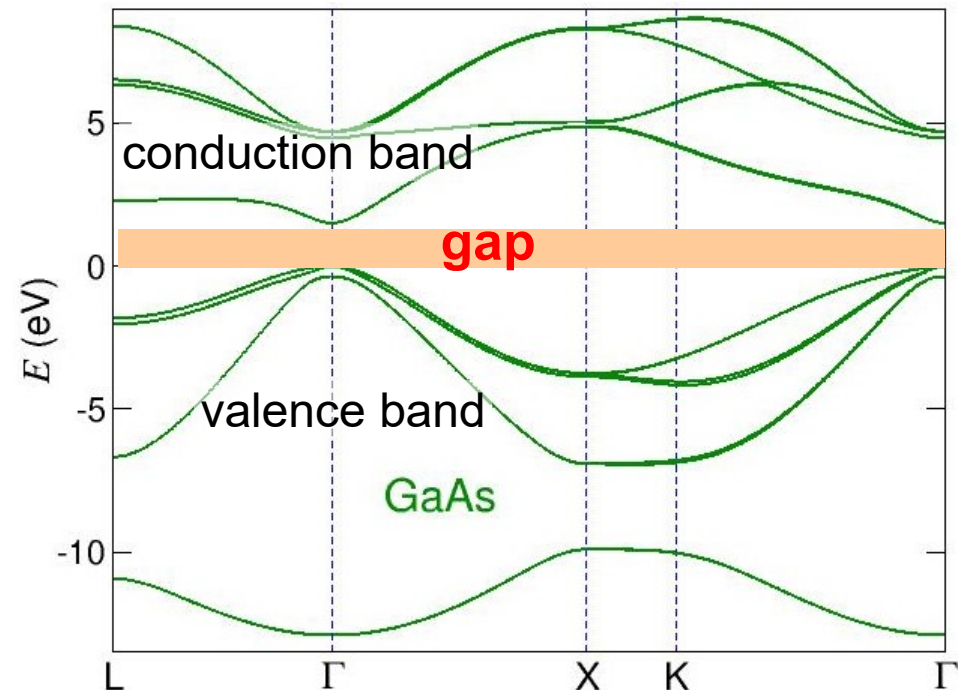
Struktura pasmowa



Niedomieszkowane (samoistne) półprzewodniki:

Występuje **przerwa energetyczna** E_g w pobliżu energii Fermiego

przewodnictwo elektryczne występuje tylko wtedy, gdy elektrony są wzbudzone z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (np., termicznie, optycznie)



Przykładowa struktura energetyczna półprzewodnika; zależność $E(k)$

Półprzewodniki samoistne

Niedomieszkowane (samoistne) półprzewodniki:

Występuje taka sama koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa i dziur w paśmie walencyjnym

$$n_e = n_h \sim e^{-E_g/2k_B T}$$

$$E_g \uparrow \rightarrow n_e \downarrow$$

$$\text{Si: } E_g = 1.12 \text{ eV} \quad n_e = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

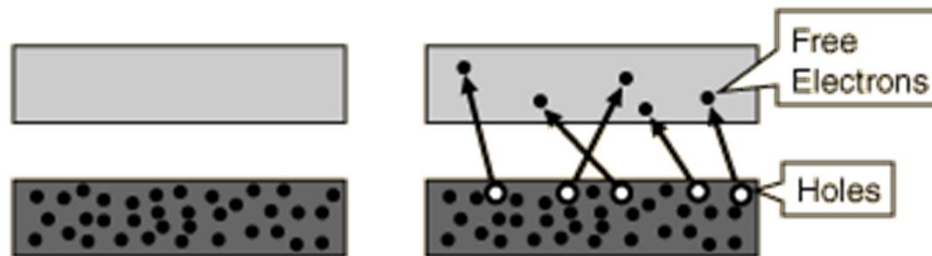
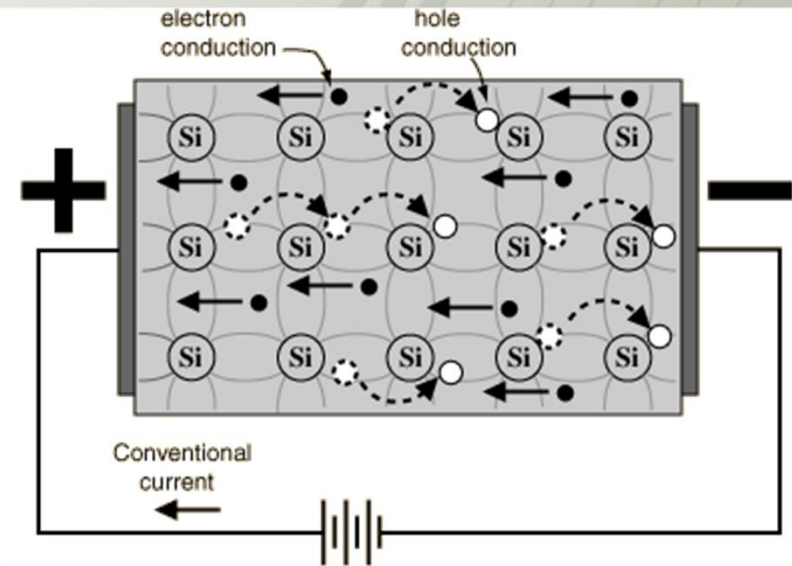
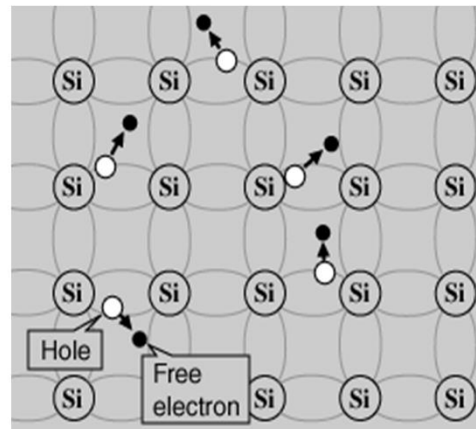
$$\text{Ge: } E_g = 0.66 \text{ eV} \quad n_e = 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

Efektywna gęstość stanów



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

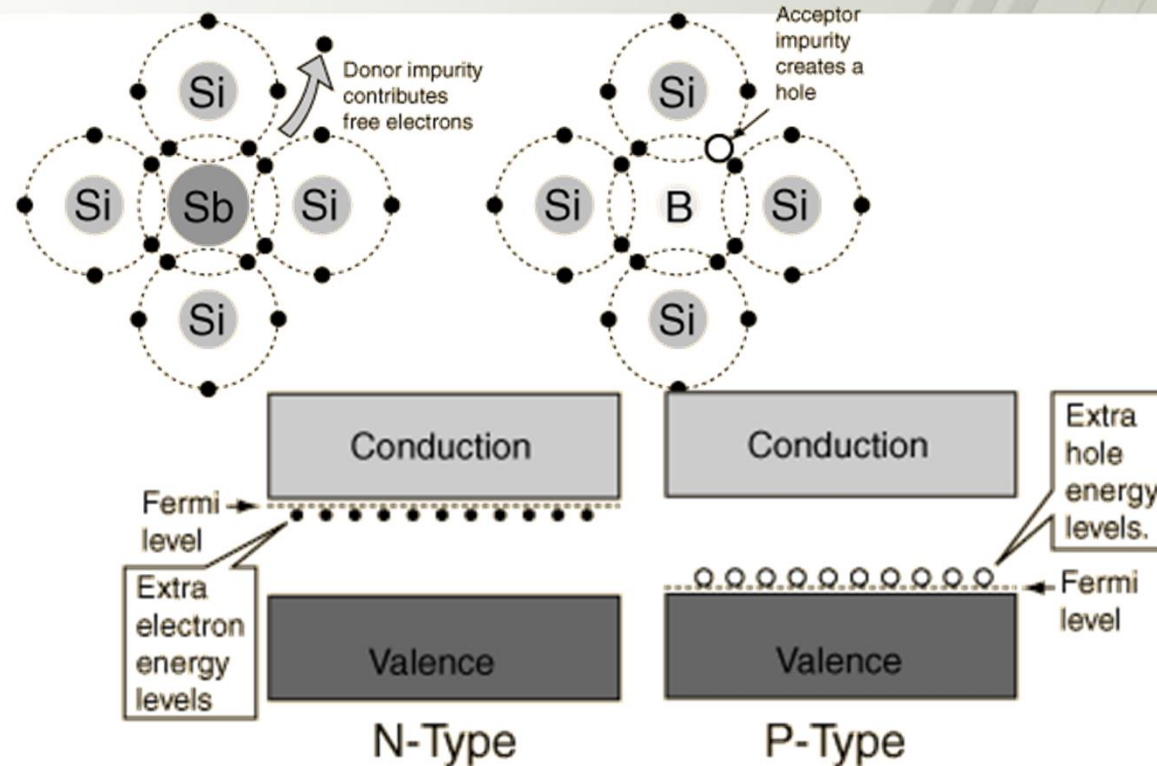
Mechanizm przewodnictwa w półprzewodnikach samoistnych



Jeżeli koncentracja jest za mała należy domieszkować materiał półprzewodnikowy

Domieszkowanie

B	C $2p^2$	N
Al	Si $3p^2$	P
Ga	Ge $4p^2$	As
In	Sn $5p^2$	Sb
Tl	Pb $6p^2$	Bi



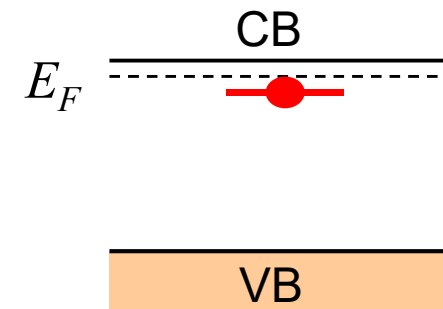
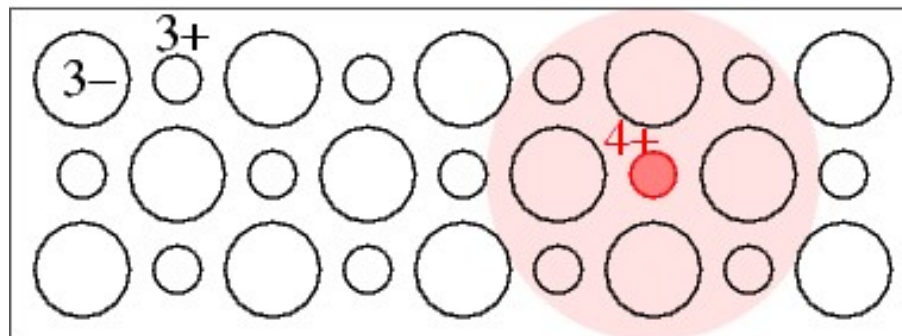
- domieszka akceptorowa-jeżeli wartościowość atomu domieszki jest mniejsza niż atomu macierzystego
- domieszka donorowa – w przeciwnym przypadku

Przykłady domieszkowania

Przykład 1: zastępuje się Ga przez Si w GaAs

Si ma o jeden elektron walencyjny *więcej* → wprowadza dodatkowy elektron: **donor**

Si⁴⁺ słabo wiąże elektron : powstaje **płytki poziom donorowy**

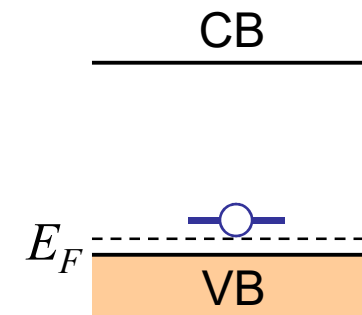
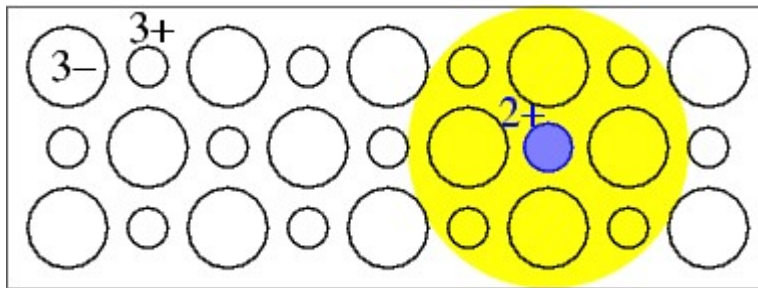


Przykłady domieszkowania

Przykład 2: zastępuje się Ga przez Zn w GaAs

Zn ma o jeden elektron walencyjny *mniej*
 → wprowadza dodatkową dziurę: **akceptor**

Zn^{2+} słabo wiąże dziurę: powstaje **płytki poziom akceptorowy**

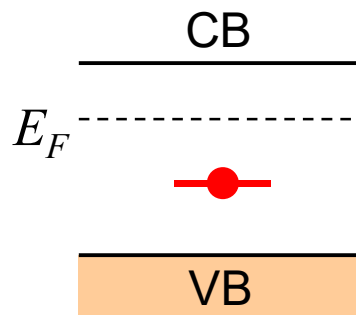


Zalety domieszkowania

- energia wzbudzenia zmniejsza się
- przewodnictwo występuje w niższej temperaturze

Domieszkowanie i inne defekty

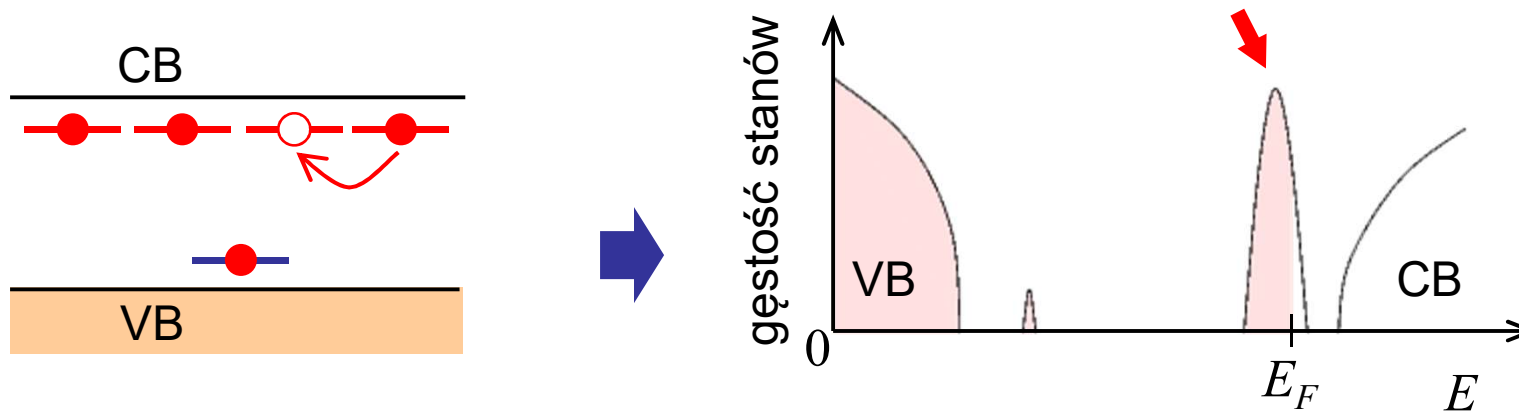
- poziomy domieszkowe mogą występować głęboko w paśmie wzbronionym :
 - głębokie poziomy** , np. Te in GaAs
- zarówno płytkie jak i głębokie poziomy mogą być związane z macierzystymi defektami: wakansjami, atomami międzywęzłowymi
 - native defects**: vacancies, interstitials...
- jeżeli występują zarówno donory jak i akceptory to koncentracja nośników zmniejsza się, występuje **kompensacja**



Zanieczyszczenia

Silne domieszkowanie:

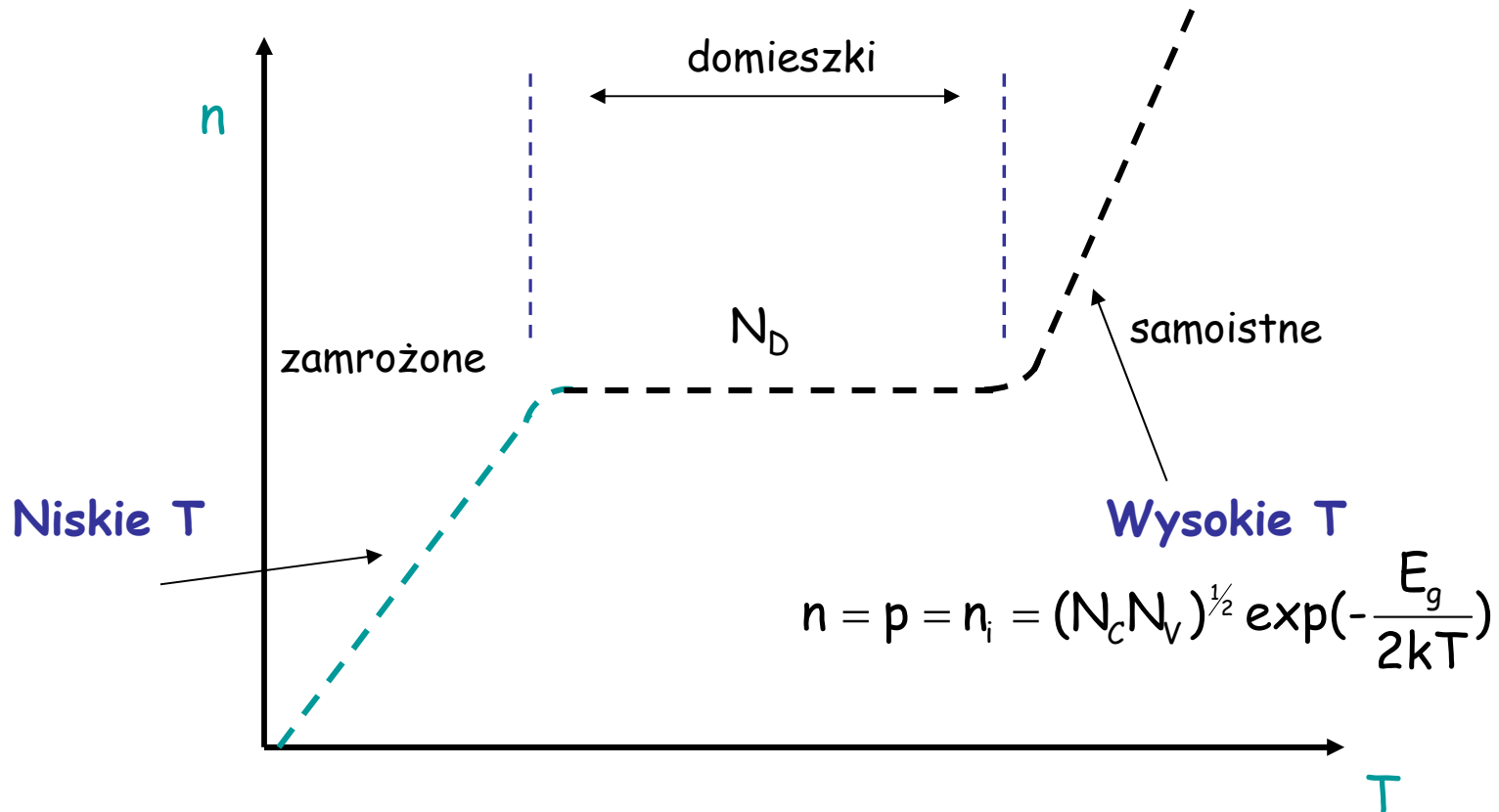
stany domieszkowe nakładają się → tworzy się **pasmo domieszkowe**



Pasmo domieszkowe może przekrywać się z pasmem walencyjnym **VB** lub pasmem przewodnictwa **CB**

Przewodnictwo elektryczne σ

$$\sigma = ne\mu$$

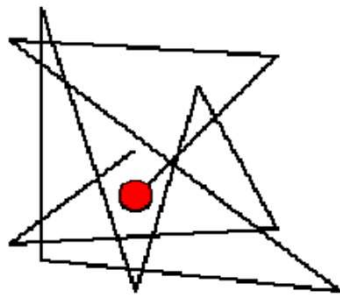


Ruchliwość

Ruchliwość μ - prędkość dryfu v_d podzielona przez wartość zewnętrznego pola elektrycznego E :

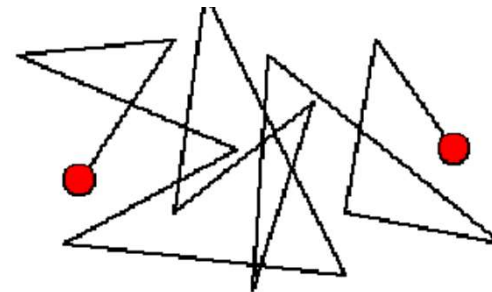
$$\mu = v_d / E \text{ (cm}^2/\text{Vs)}$$

$E=0$



Chaotyczny ruch nośników ładunku
Zderzenia z jonami

$E \neq 0$



dryf nośników ładunku w kierunku pola elektrycznego

Ruchliwość i rozpraszanie

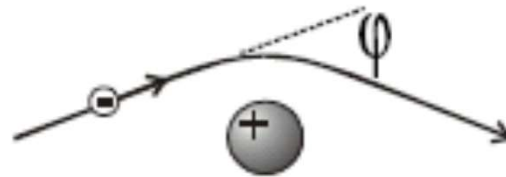
- rozpraszanie na fononach – drgania sieci krystalicznej
- rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach
- rozpraszanie na obojętnych zanieczyszczeniach
- rozpraszanie na dyslokacjach i innych defektach strukturalnych

$$\tau_f \sim T^{-\zeta}, \zeta \in \frac{3}{2} \div 1$$

τ_f - średni czas pomiędzy zderzeniami (rozpraszanie na fononach) maleje ze wzrostem temperatury T

Rozpraszanie na zjonizowanych domieszkach

Wynika z oddziaływania elektrostatycznego pomiędzy nośnikami ładunku i zjonizowanymi domieszkami



φ maleje z prędkością v_{th} , stąd średni czas rośnie z temperaturą

$$\tau_d \sim T^{\frac{3}{2}}$$



AGH

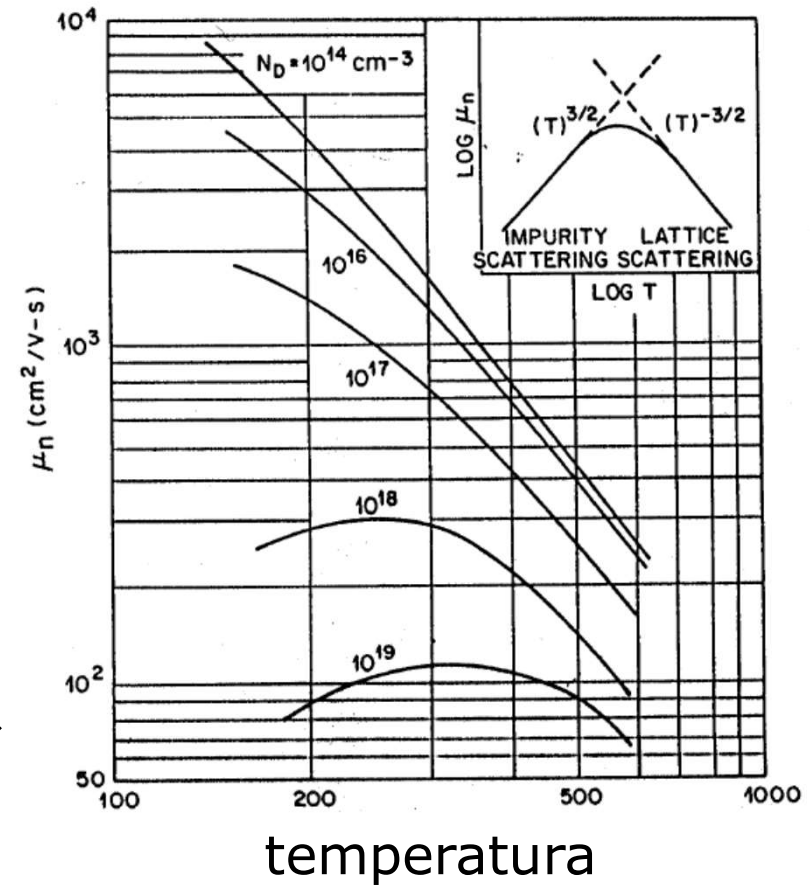
Reguła Matthiessena

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*} \quad \frac{1}{\mu} = \sum_M \frac{1}{\mu_M}$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{latt}} + \frac{1}{\mu_{dop}}$$

$$\mu_{latt} \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

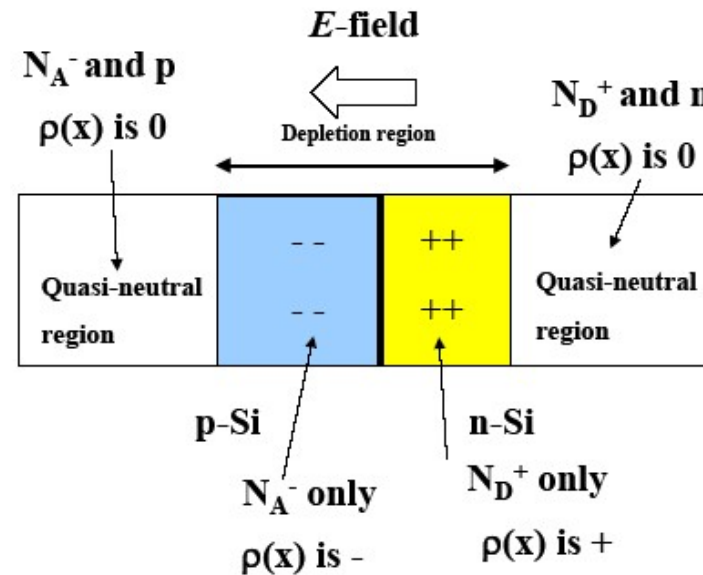
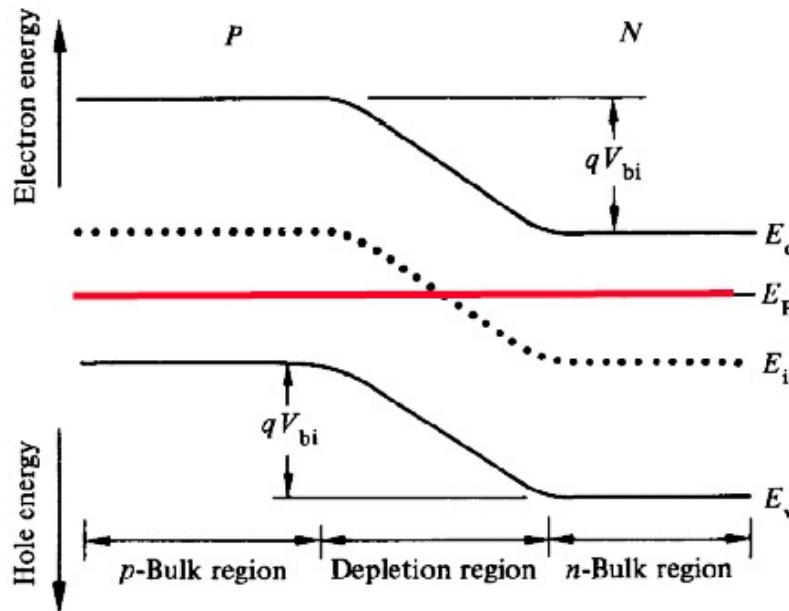
$$\mu_{dop} \sim T^{\frac{3}{2}}$$



Złącze p-n

Złącze p-n to pojedynczy kryształ półprzewodnika, w którym jeden obszar domieszkowany jest tak, aby powstał półprzewodnik typu n, a drugi, sąsiadujący z nim obszar domieszkowany jest tak, aby powstał półprzewodnik typu p.

Thermal Equilibrium



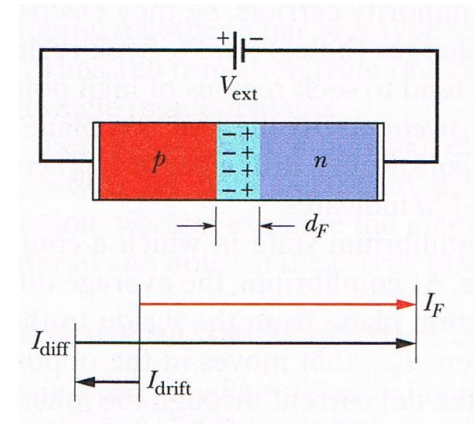
Złącze p-n

Dyfuzja nośników **większościowych** (elektronów w obszarze n, dziur w p) stanowi prąd dyfuzji, I_{diff} który zależy od wartości i znaku zewnętrznego potencjału V_{ext} .

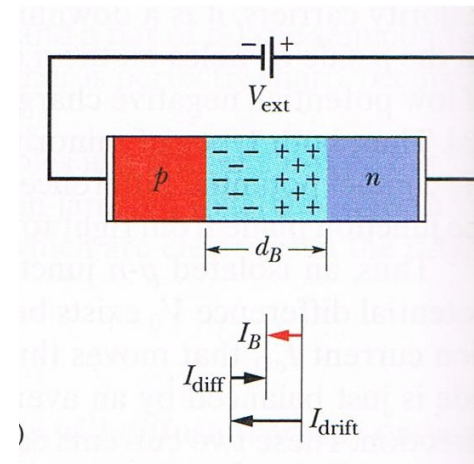
Nośniki **mniejszościowe** (dziury w obszarze n, elektrony w p) tworzą prąd dryfu (unoszenia), I_{drift} który jest niezależny od zewnętrznego potencjału V_{ext} .

Zewnętrzny potencjał wpływa na wysokość bariery potencjału na złączu i szerokość obszaru **zubożonego**.

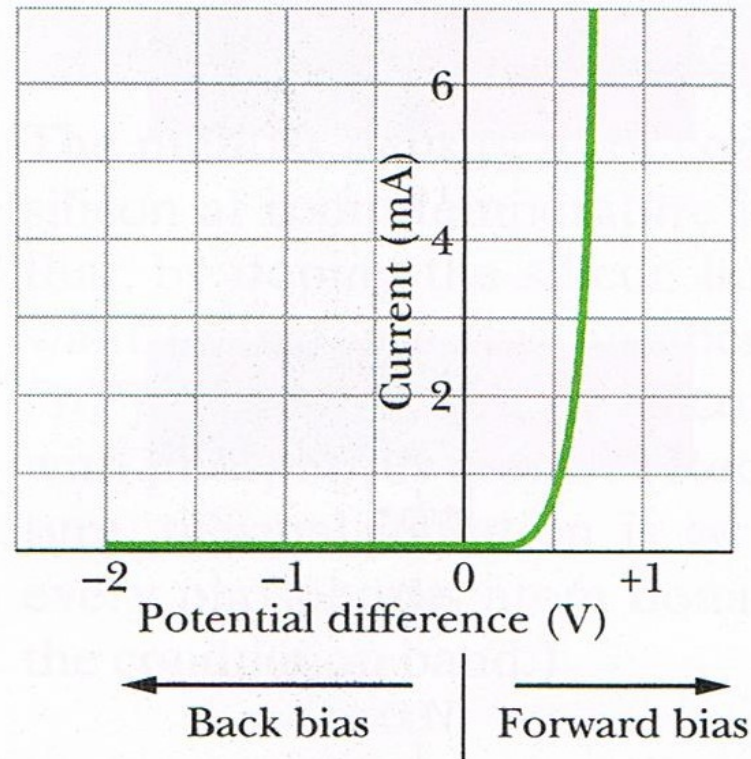
forward-bias



back-bias



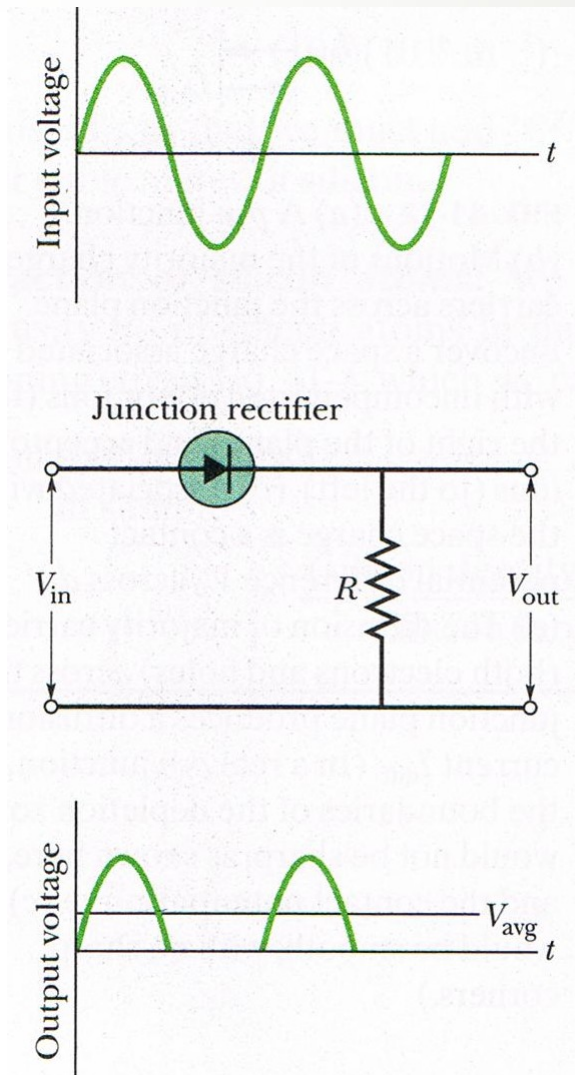
Złącze p-n



Charakterystyka prąd-napięcie złącza p-n ; spolaryzowane w kierunku przewodzenia (forward-biased) przewodzi prąd elektryczny i praktycznie nie przewodzi prądu gdy jest spolaryzowane w kierunku zaporowym (back-biased)

Zastosowanie półprzewodników

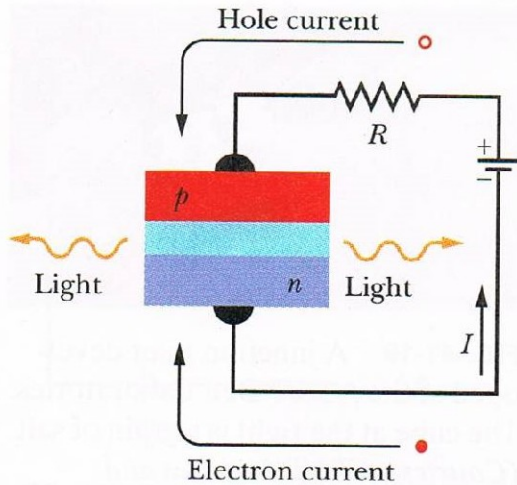
Złącze prostujące



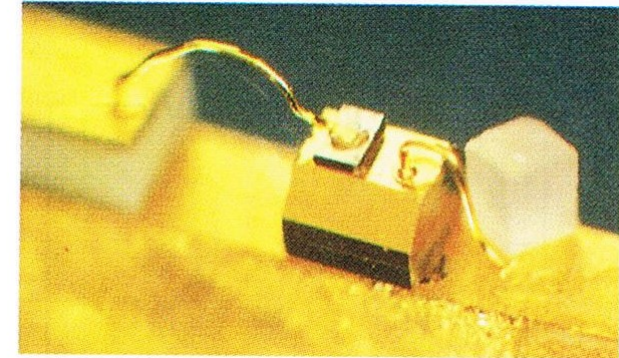
Sinusoidalnie zmienne napięcie wejściowe jest przekształcane w „obcięte” do połowy napięcie wejściowe.

Złącze działa jak przełącznik, który dla jednego znaku napięcia wejściowego jest zamknięty (opór zerowy) a dla drugiego jest otwarty (opór nieskończony).

Dioda świecąca (light-emitting diode LED)



LED wymaga dużej liczby elektronów w paśmie przewodnictwa i dużej liczby dziur w paśmie walencyjnym, tj. silnie domieszkowanego złącza p-n oraz prostej przerwy energetycznej (np. GaAs)



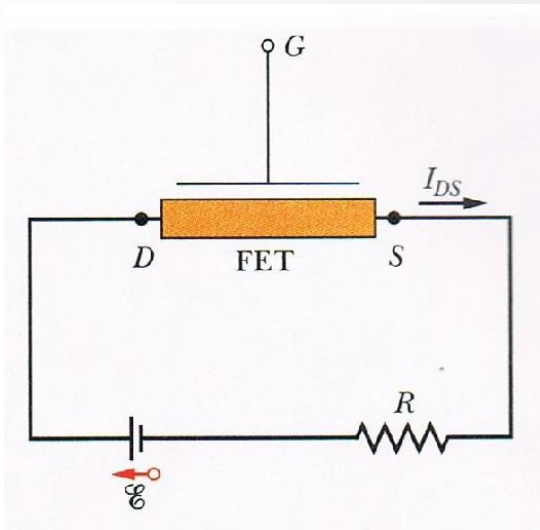
Laser złączowy wykonany w AT&T Bell Lab; rozmiar porównywalny z ziarnkiem soli

LED jest spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączem p-n; elektrony są wstrzykiwane do obszaru typu n a dziury do p. Światło jest emitowane z wąskiego obszaru zubożonego podczas rekombinacji elektronu z dziurą.

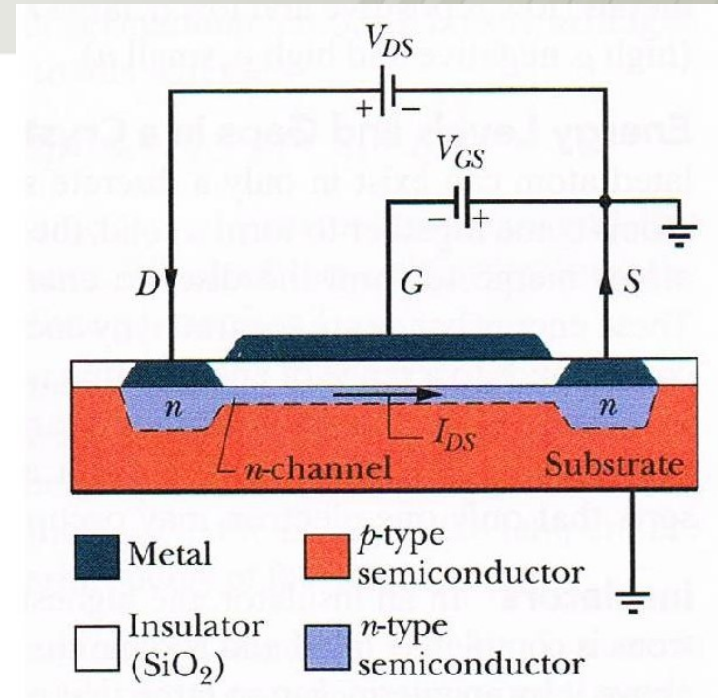
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_g}$$

Akcja laserowa wymaga **inwersji obsadzeń** i wnęki Fabry-Perota (zwierciadła na przeciwległych ścianach złącza p-n)

Tranzystor



Obwód zawierający tranzystor polowy (**field-effect transistor FET**); elektrony poruszają się od źródła S do drenu D. Wartość prądu I_{DS} jest kontrolowana przez pole elektryczne, które jest zależne od potencjału podanego na bramkę G



Szczególny rodzaj znany jako MOSFET. Tworzy się kanał typu n, który przewodzi prąd; zmieniając napięcie V_{GS} można przełączać tranzystor pomiędzy stanami ON i OFF.