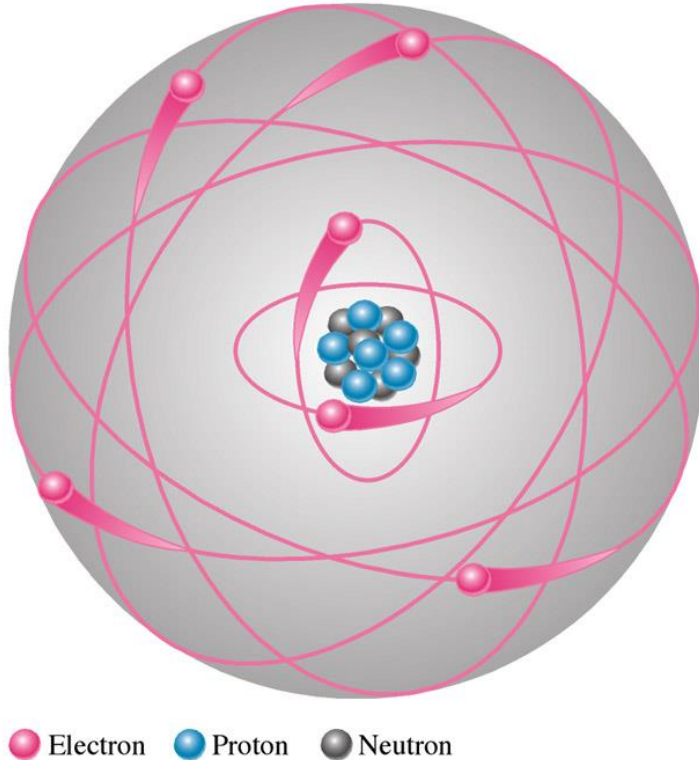


Teoria pasmowa ciał stałych

Zastosowanie półprzewodników

Model atomu Bohra



Niels Bohr - 1915

- elektrony krążą wokół jądra
- jądro jest zbudowane z:
 - i) dodatnich protonów
 - ii) neutralnych neutronów

Liczba atomowa = liczbie protonów w jądrze

Kolejność atomów w tablicy układu okresowego wynika z liczby atomowej

Model atomu Bohra



Postulaty Bohra

- Elektrony poruszają się wokół jądra po orbitach stacjonarnych.
- Atom emituje promieniowanie, gdy elektron przechodzi z jednej orbity stacjonarnej na drugą.
- Częstotliwość promieniowania jest dana wzorem

$$hf = E_m - E_n$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$

gdzie E_m, E_n oznaczają energie tych stanów.

- Moment pędu elektronu jest skwantowany

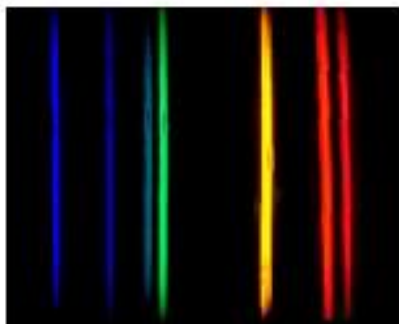
$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

Atomu wodoru

$$E_n = -13.6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

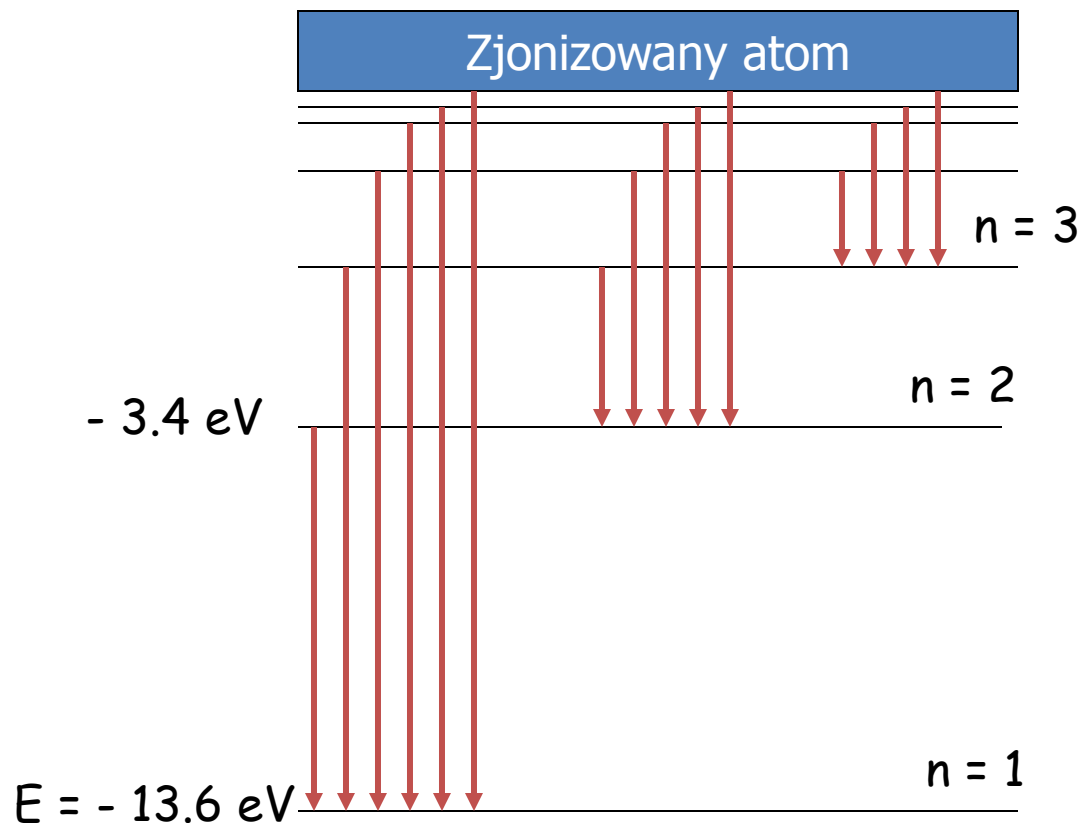
n- główna liczba kwantowa

$n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots;$



1 2 3 4 5 6 7

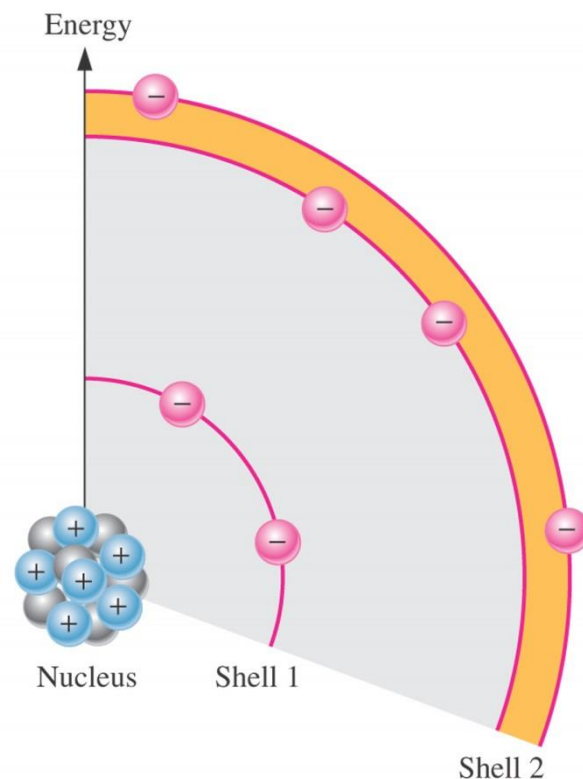
Widmo helu



Budowa atomu

Powłoki i orbity

- Orbity grupują się w powłoki (ang. shells)
- Różnice energii pomiędzy poziomami w obrębie powłoki są \ll od różnic energii pomiędzy powłokami
- Energia elektronu rośnie ze wzrostem odległości od jądra



Półprzewodniki, przewodniki i izolatory

- Atom może być przedstawiony jako powłoka walencyjna i rdzeń
- Rdzeń składa się z wewnętrznych powłok i jądra

Atom węgla:

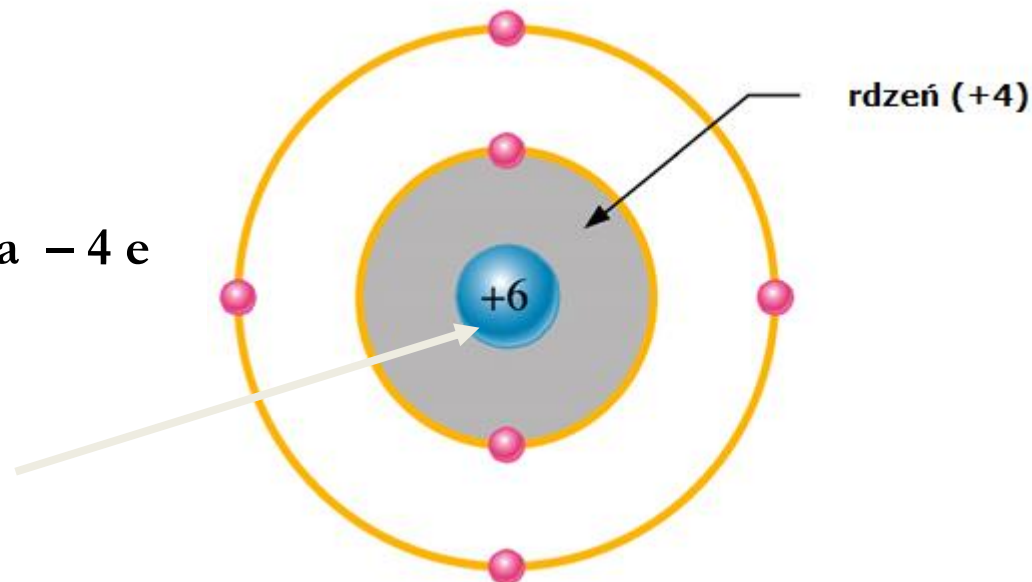
-powłoka walencyjna – 4 e

-wewnętrzna – 2 e

Jądro:

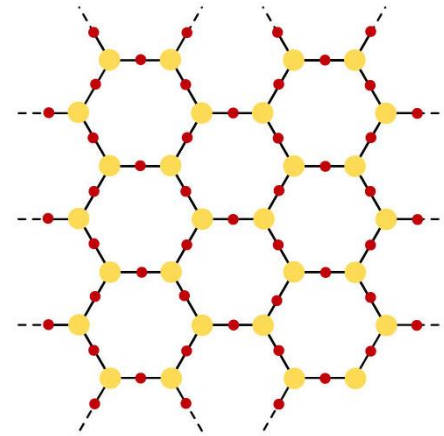
-6 protonów

-6 neutronów



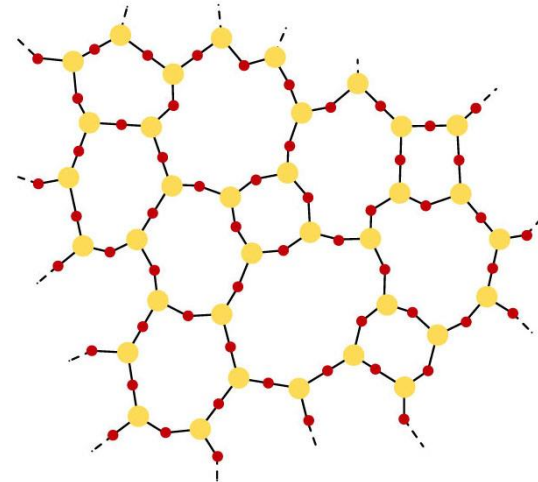
Kryształy

Struktura krystaliczna



(a)

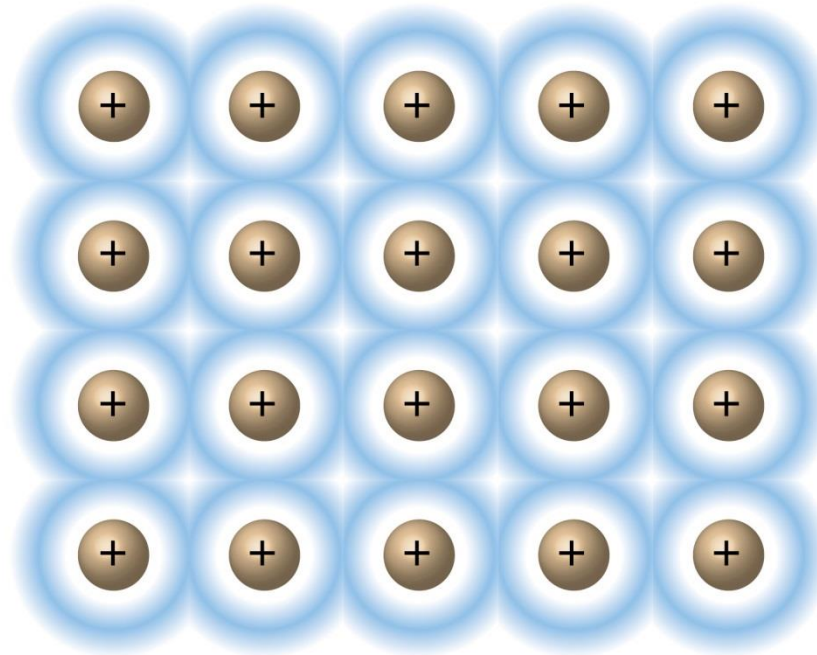
Struktura amorficzna



(b)

Przewodniki

- **material przewodzący prąd elektryczny**
- **najlepsze przewodniki są jednoatomowe (Cu, Ag, Au, Al)**
- **jeden elektron walencyjny słabo związany z atomem – swobodny elektron**



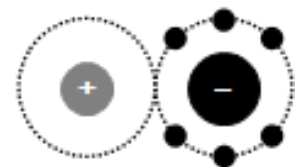
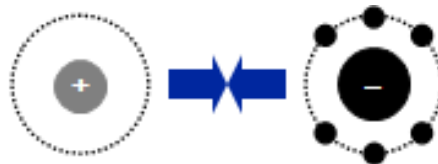
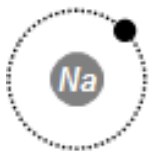
Półprzewodniki i izolatory

Półprzewodnik

- materiał, który przewodzi prąd elektryczny lepiej niż izolator i gorzej niż przewodnik
- powszechnie używane półprzewodniki: krzem(Si), german Ge)
- te półprzewodniki posiadają 4 elektrony walencyjne

Izolator

- materiał nie przewodzący prądu elektrycznego
- elektrony walencyjne są mocno związane z atomem, brak swobodnych elektronów, np. NaCl

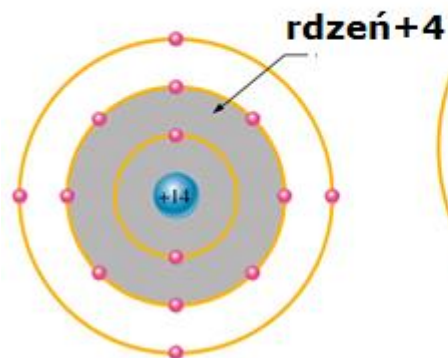


Półprzewodniki, przewodniki i izolatory

Porównanie atomu półprzewodnika i przewodnika

Atom Si:

- 4 elektrony walencyjne
- półprzewodnik
- Konfiguracja elektronowa: 2:8:4



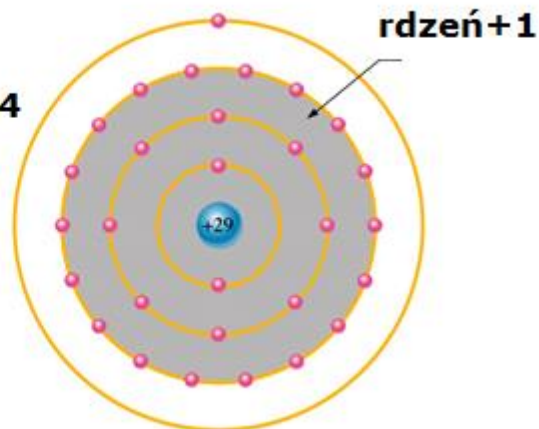
14 protonów

14 jąder

10 elektronów na
powłokach
wewnętrznych

Atom Cu:

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

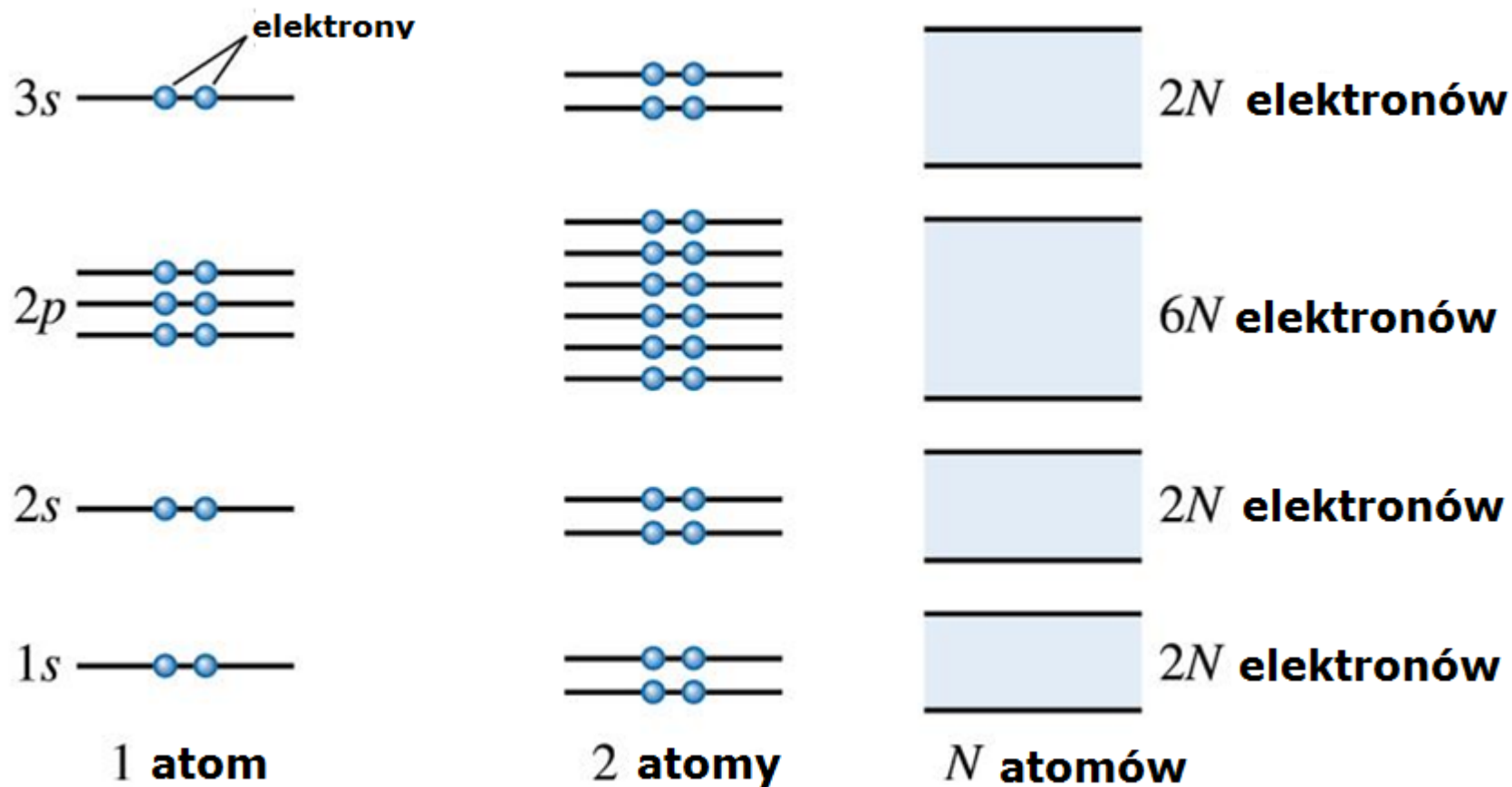


29 protonów

29 jąder

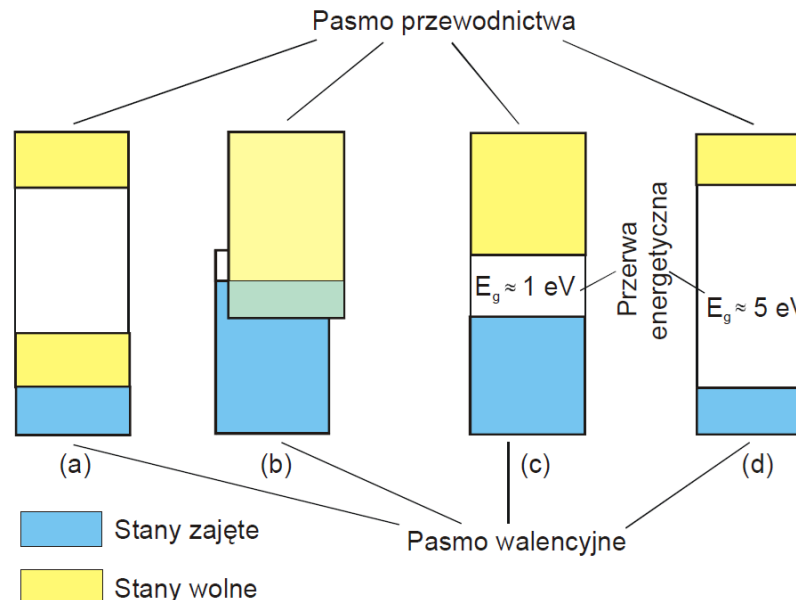
28 elektronów na
powłokach
wewnętrznych

Rozszczepienie poziomów energet. w kryształe



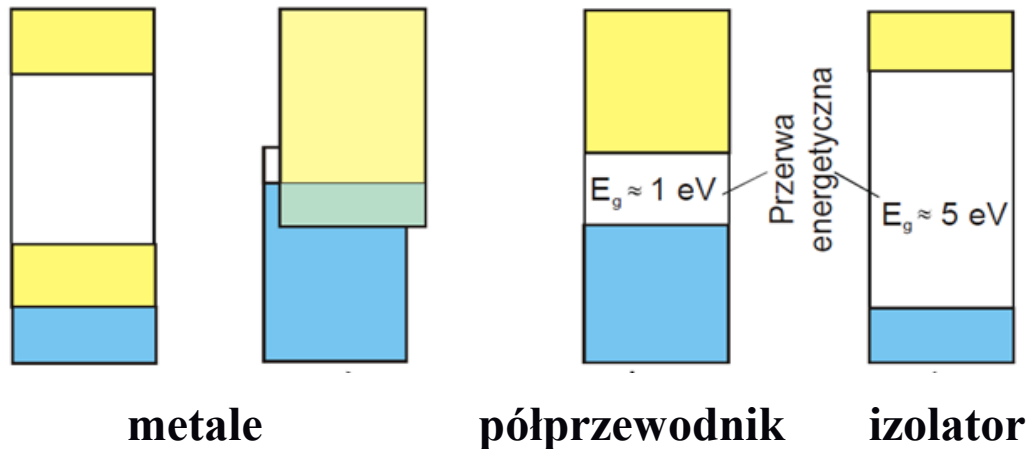
Metale, izolatory, półprzewodniki

- Zbliżenie atomów w kryształach prowadzi do rozszczepienia poziomów energetycznych. Istotnemu rozszczepieniu ulegają stany elektronów walencyjnych.
- Rozszczepione poziomy grupują się w pasma
- Najwyższe pasmo obsadzone elektronami w niemetalach nazywa się pasmem walencyjnym.
- Sąsiednie wyższe pasmo nazywa się pasmem przewodnictwa.
- Obszar energii zawarty pomiędzy pasmami, niedozwolony dla elektronów nazywa się przerwą wzbronioną.



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 p , że elektron znajdzie się w pasmie przewodnictwa);

$$p_{\text{prawdop.}} \sim e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad k = 1.38 \cdot 10^{23} \text{ J/K}$$

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

Elektronovolt (eV)

Bardzo użyteczna jednostka energii w fizyce ciała stałego

1eV to energia potrzebna do przeniesienia elektronu w polu elektrycznym między punktami o różnicy potencjałów równej 1V

Aby zamienić 1eV na 1J korzystamy z równania:

$$1eV = 1.6 \cdot 10^{-19} C \cdot V = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

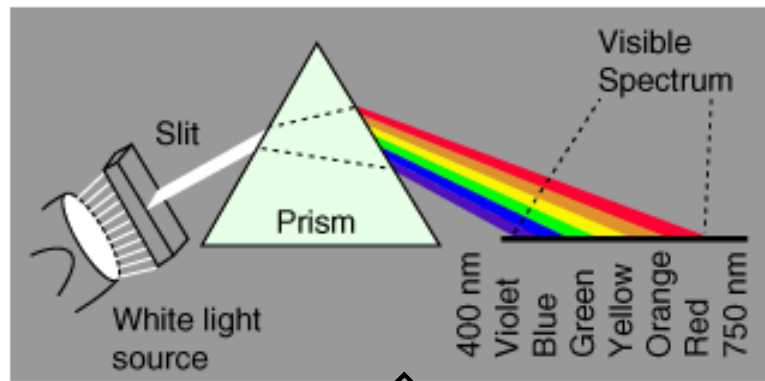
Aby obliczyć jakiej długości fali λ odpowiada foton o energii E , wyrażonej w eV, korzystamy z równania:

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E(eV)}$$

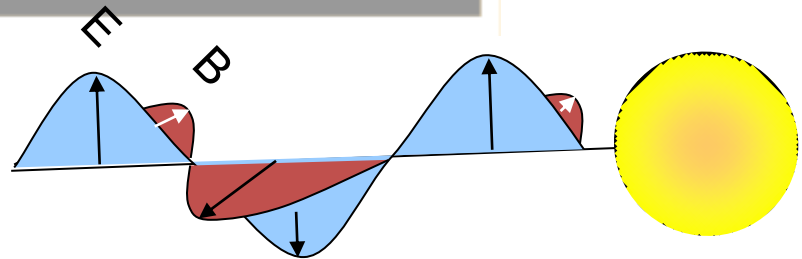
$$\lambda(nm) = \frac{1240}{E(eV)}$$

Promieniowanie słoneczne

Światło widzialne – długość fali $0.38\mu\text{m} < \lambda < 0.76\mu\text{m}$



- Fala elektromagnetyczna



- Strumień fotonów $E_F = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

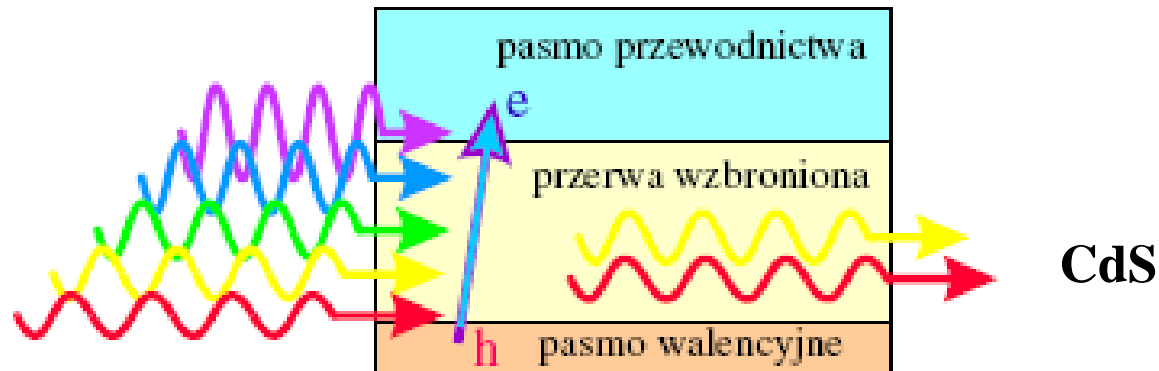
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Krawędź absorpcji

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

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

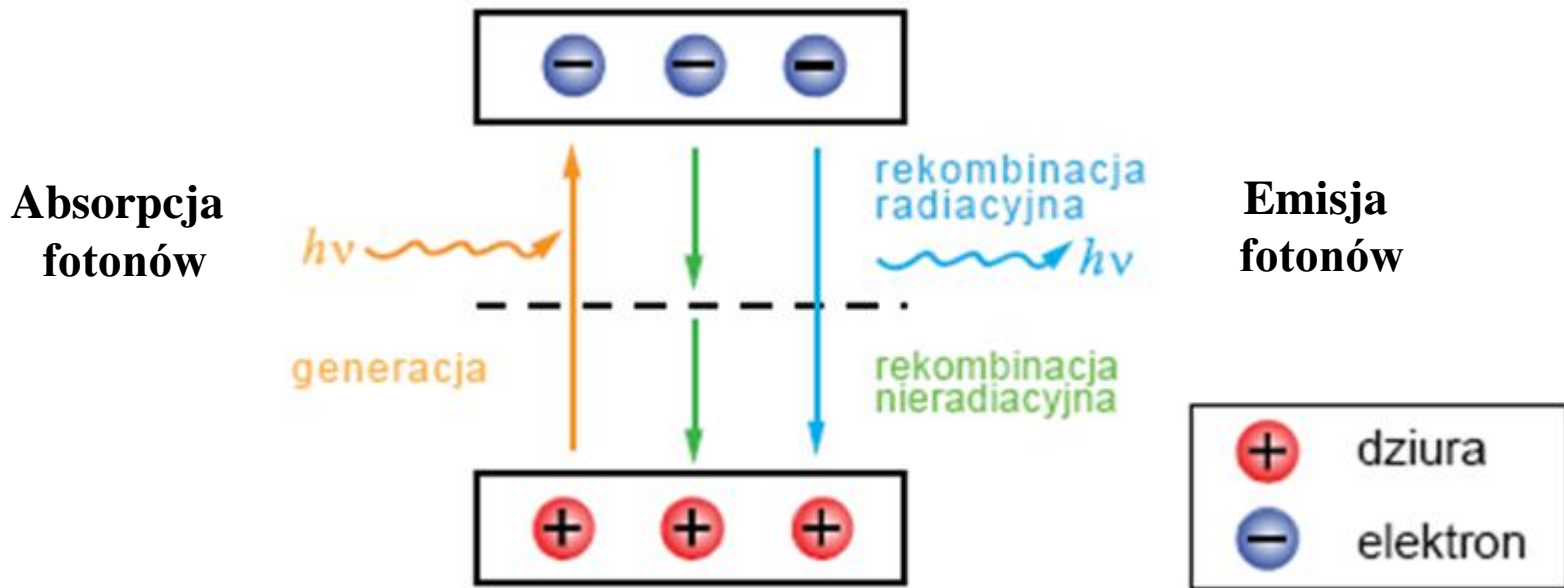
$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$$



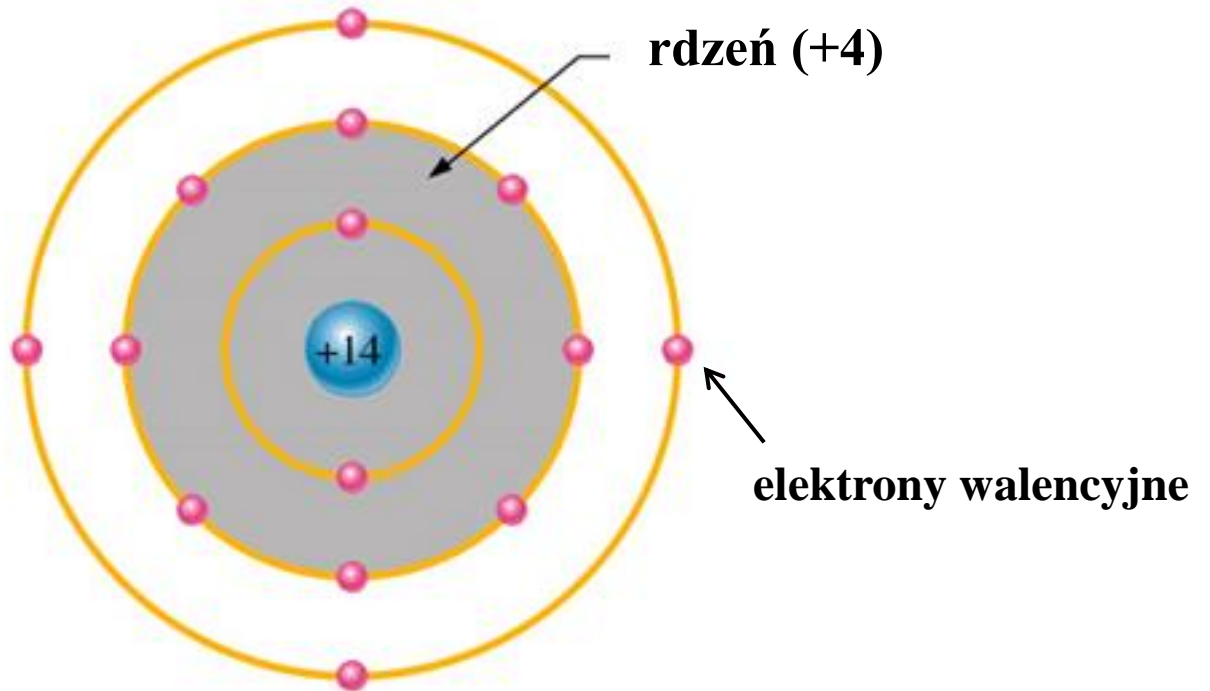
Półprzewodniki - elektrony i dziury

W półprzewodnikach występuje absorpcja światła, gdy energia fotonu jest większa od przerwy wzbronionej półprzewodnika:

$$E_F = h\nu \geq E_g$$



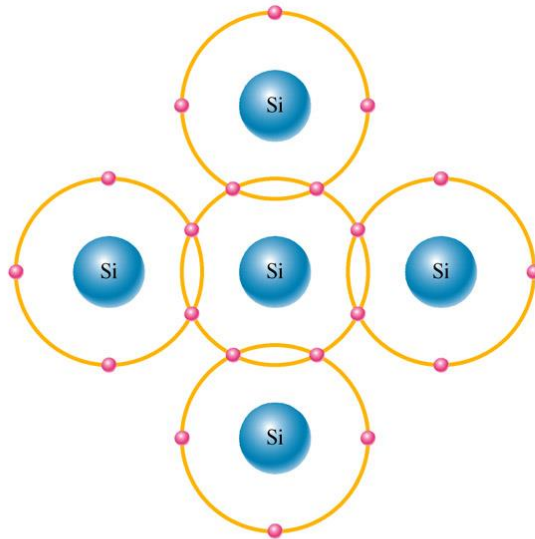
Atom krzemu



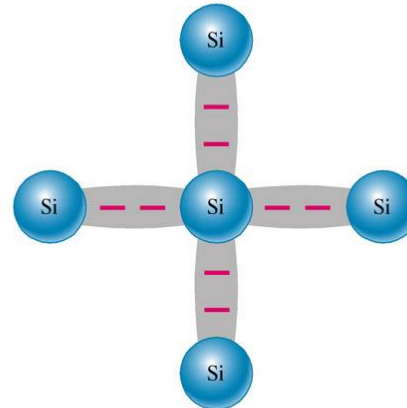
Liczba atomowa Si wynosi 14.

4 elektrony walencyjne znajdują się na ostatniej orbicie

Kryształ krzemu – wiązanie kowalencyjne

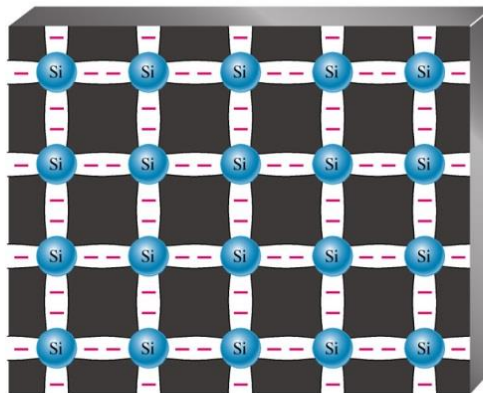


(a) The center atom shares an electron with each of the four surrounding atoms, creating a covalent

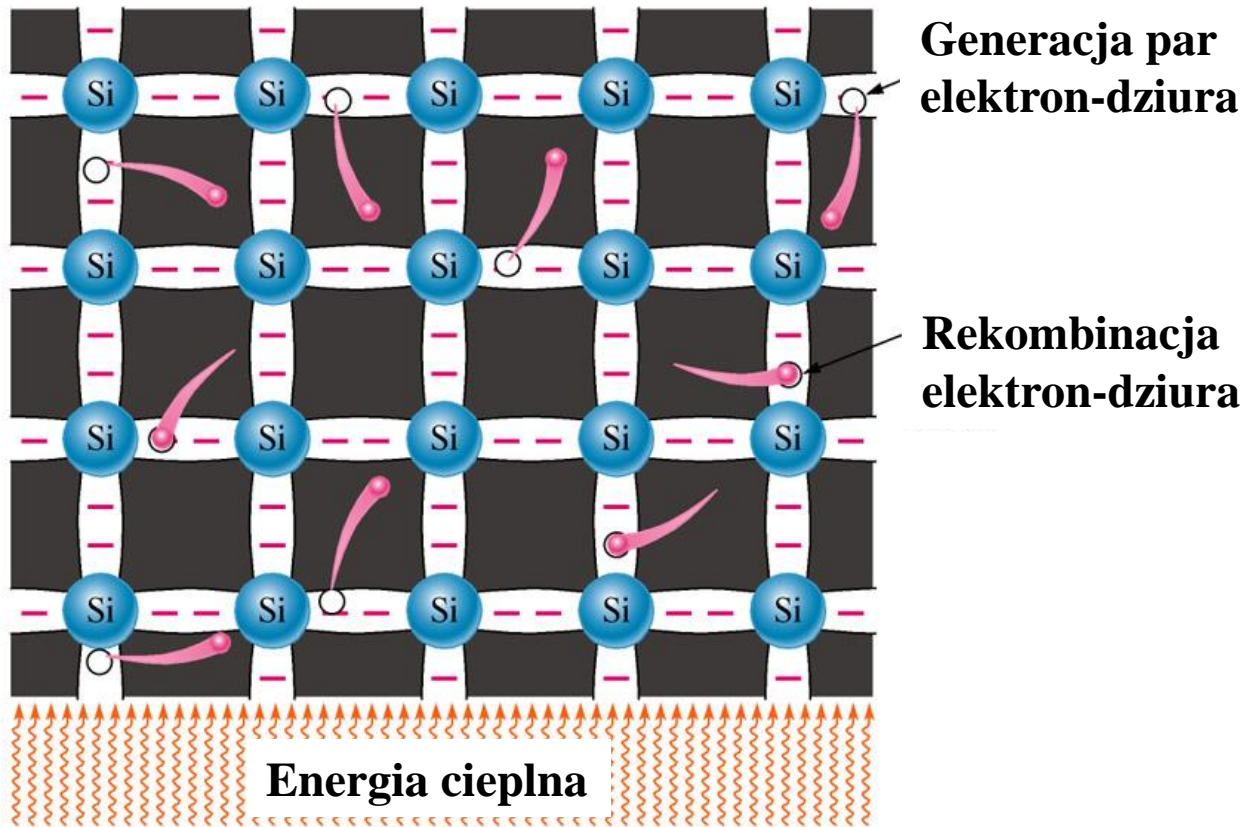


(b) Bonding diagram. The red negative signs represent the shared valence electrons.

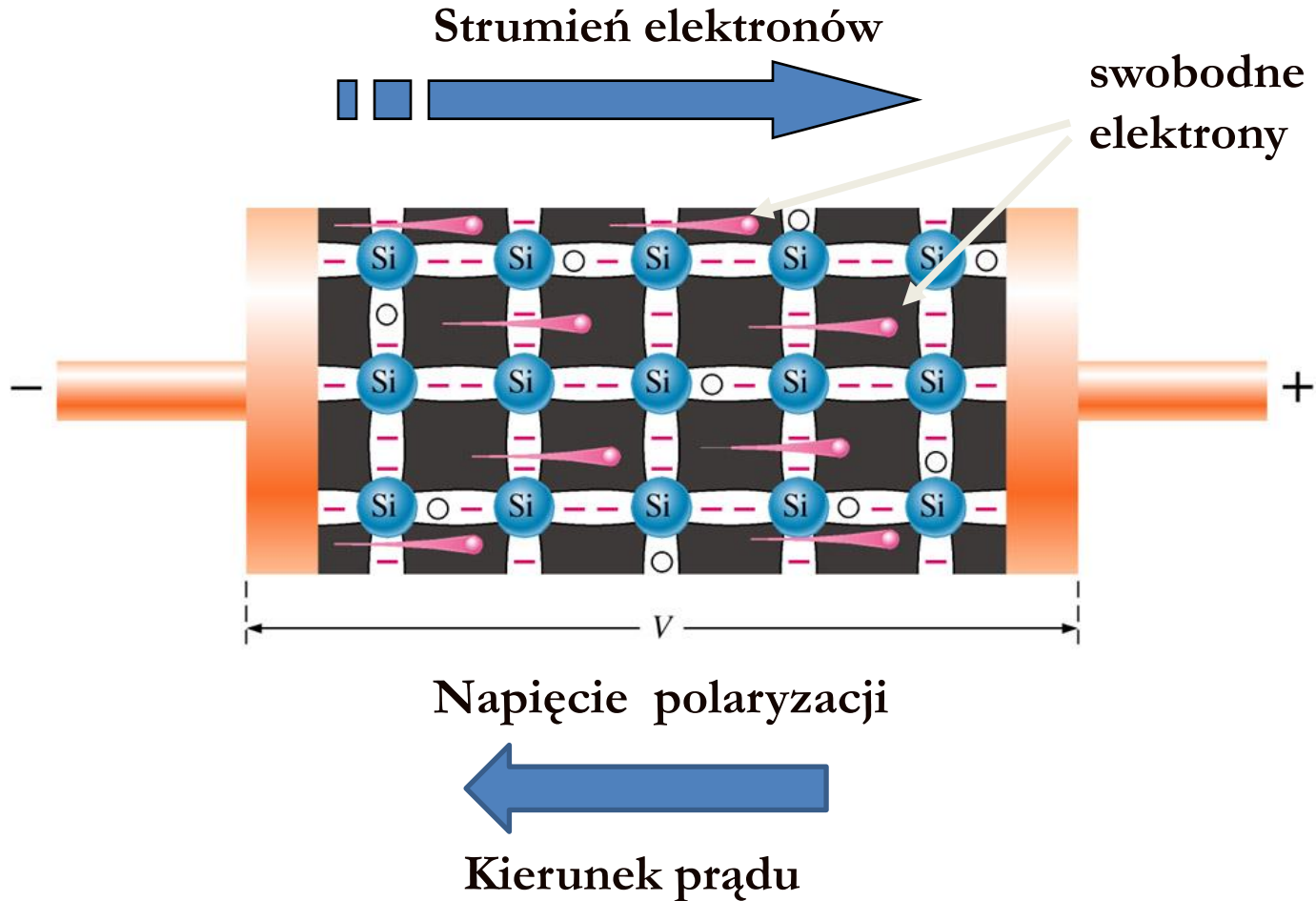
Centralny atom dzieli się elektronami z swoimi sąsiadami



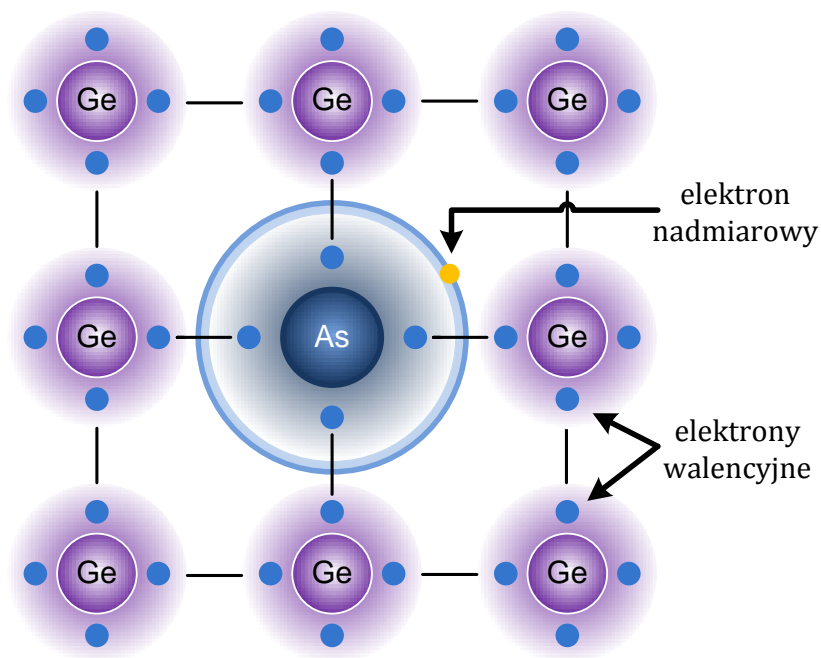
Kryształ krzemu w temperaturze pokojowej



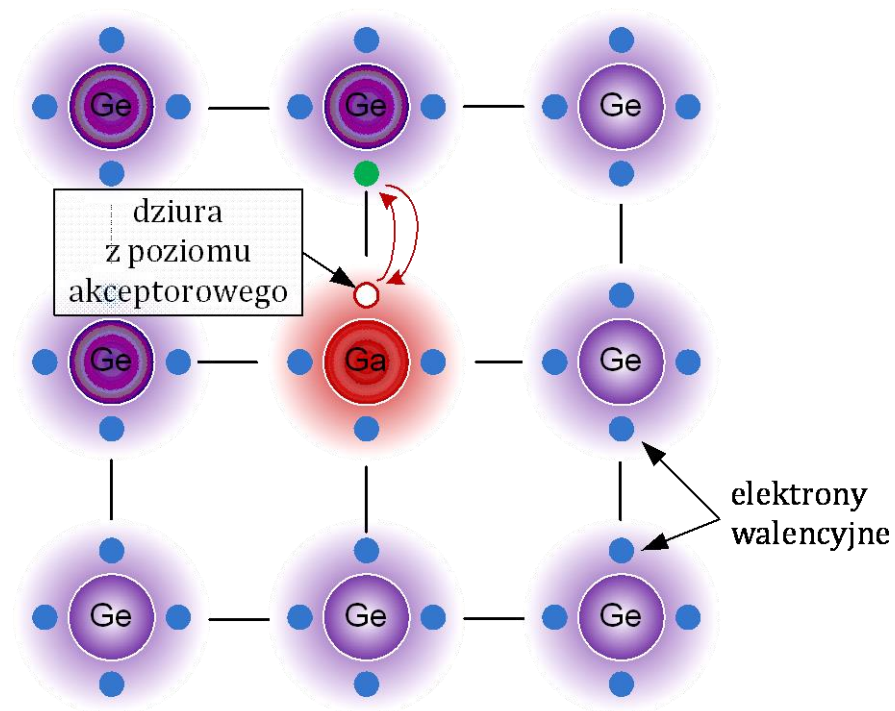
Przepływ prądu w półprzewodniku



Półprzewodniki domieszkowe

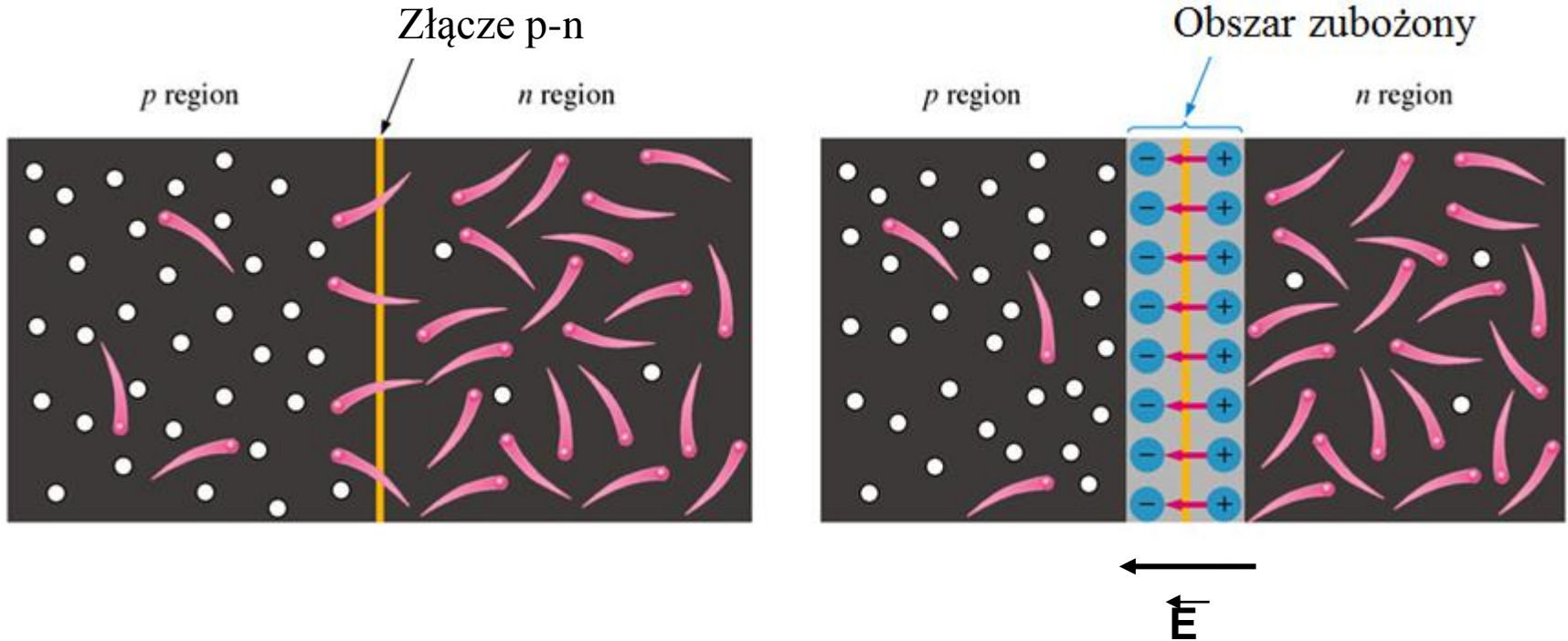


Typu n



Typu p

Złącze p-n



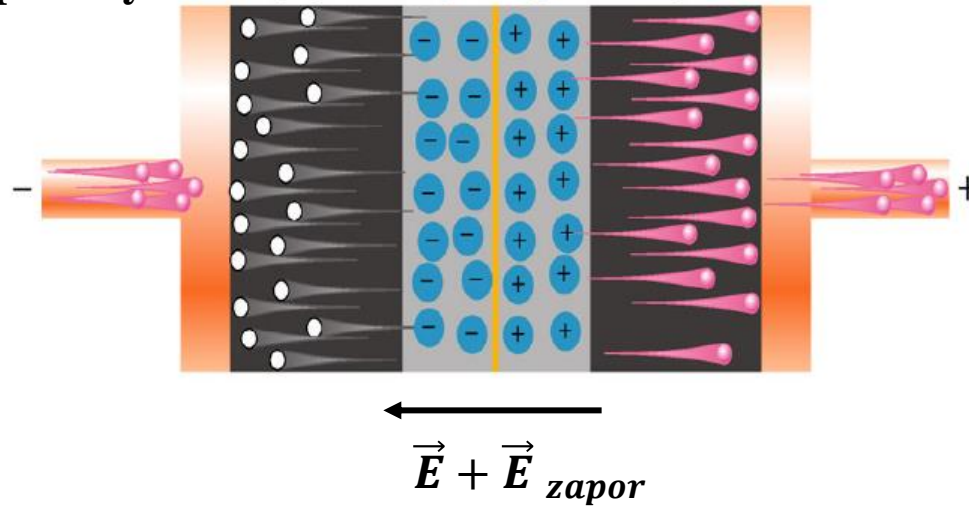
Tworzy się złącze p-n

Złącze po utworzeniu

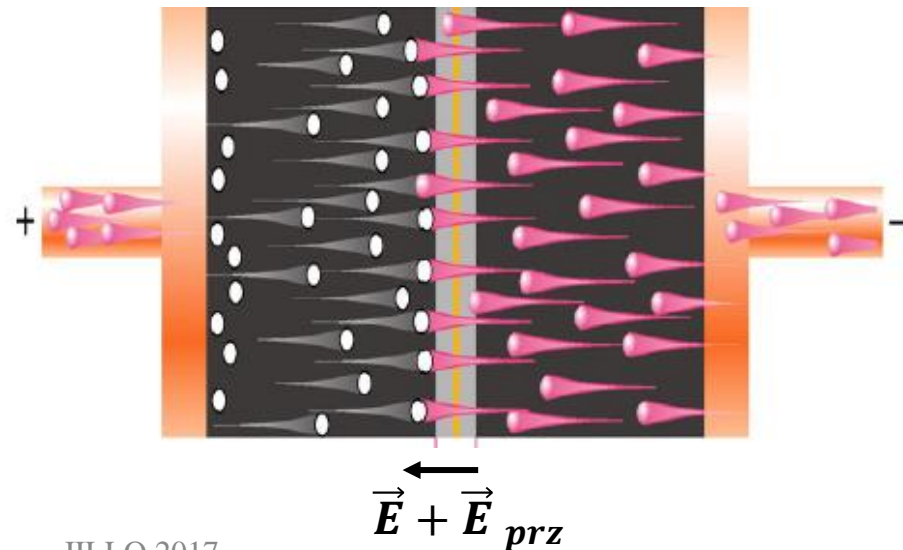
Pole elektryczne na styku dwóch półprzewodników powoduje, że prąd łatwo płynie w jednym kierunku a przepływ w drugim kierunku jest utrudniony.

Polaryzacja złącza p-n

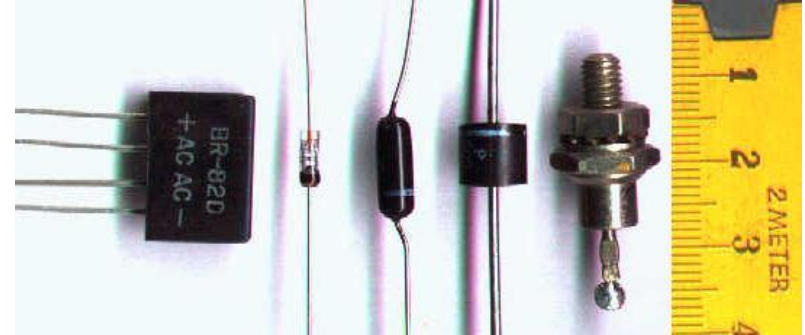
- W kierunku zaporowym



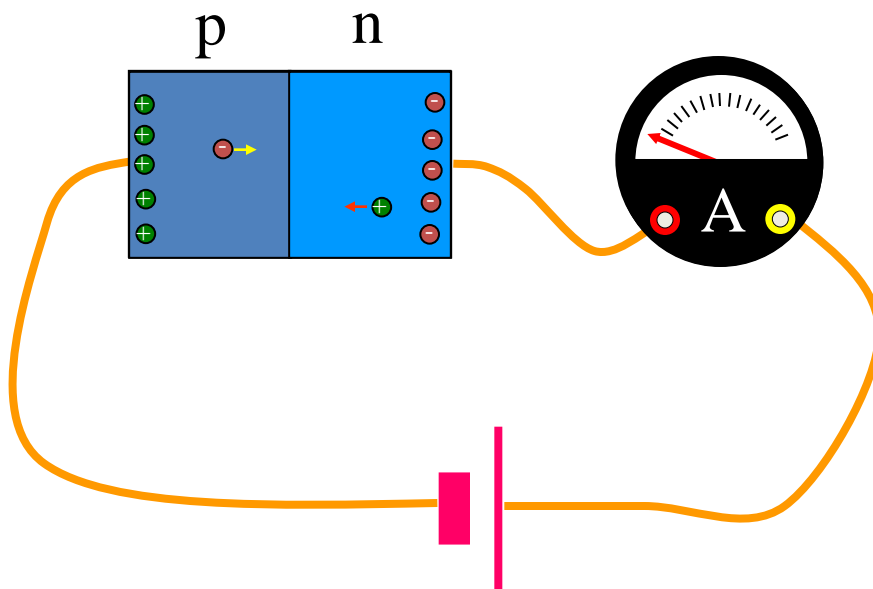
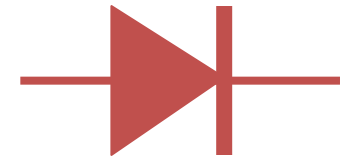
- W kierunku przewodzenia



Złącze p-n dioda półprzewodnikowa

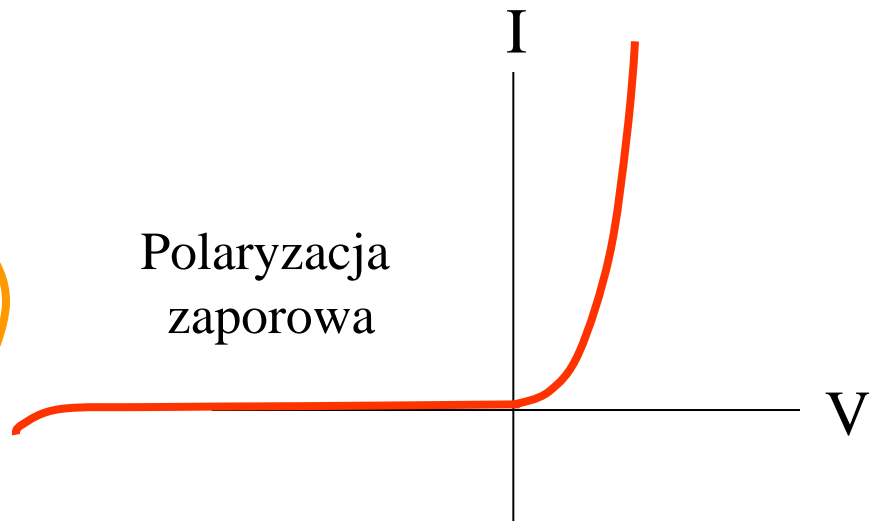


Charakterystyka I-V - nieliniowa



Polaryzacja w kier.
przewodzenia

Polaryzacja
zaporowa



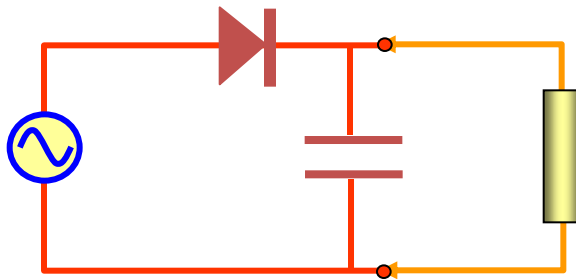
Zastosowanie półprzewodników

- **Elektronika: podstawowe elementy (diody, tranzystory) układów dyskretnych i scalonych**
- **Teleinformatyka**
- **Emiterzy światła: diody elektroluminescencyjne (LED), lasery półprzewodnikowe**
- **Czujniki światła: fotorezystory, fotodiody, kamery CCD, i CMOS**
- **Źródła energii: ogniwa słoneczne**
- **Motoryzacja: hallotrony (czujniki położenia i prędkości obrotowej wału korbowego oraz wału rozrządu)**
- **I wiele innych**

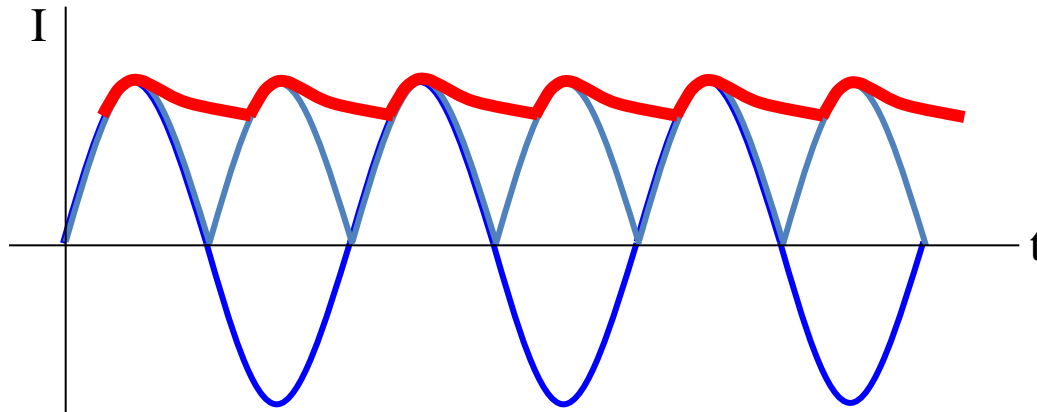
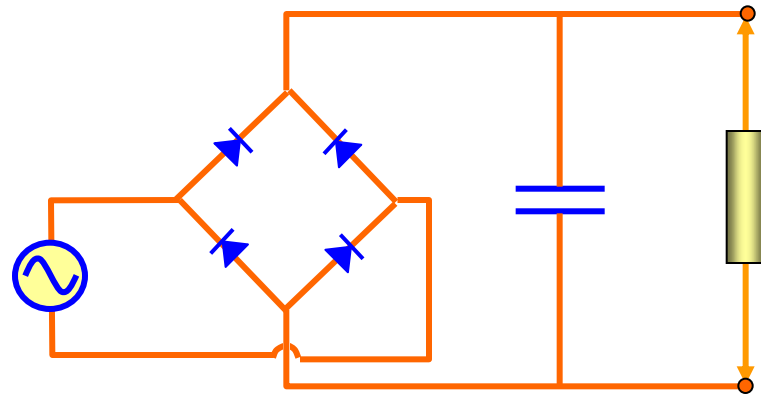
Prostownik

Jest to układ, który zamienia prąd przemienny na prąd stały

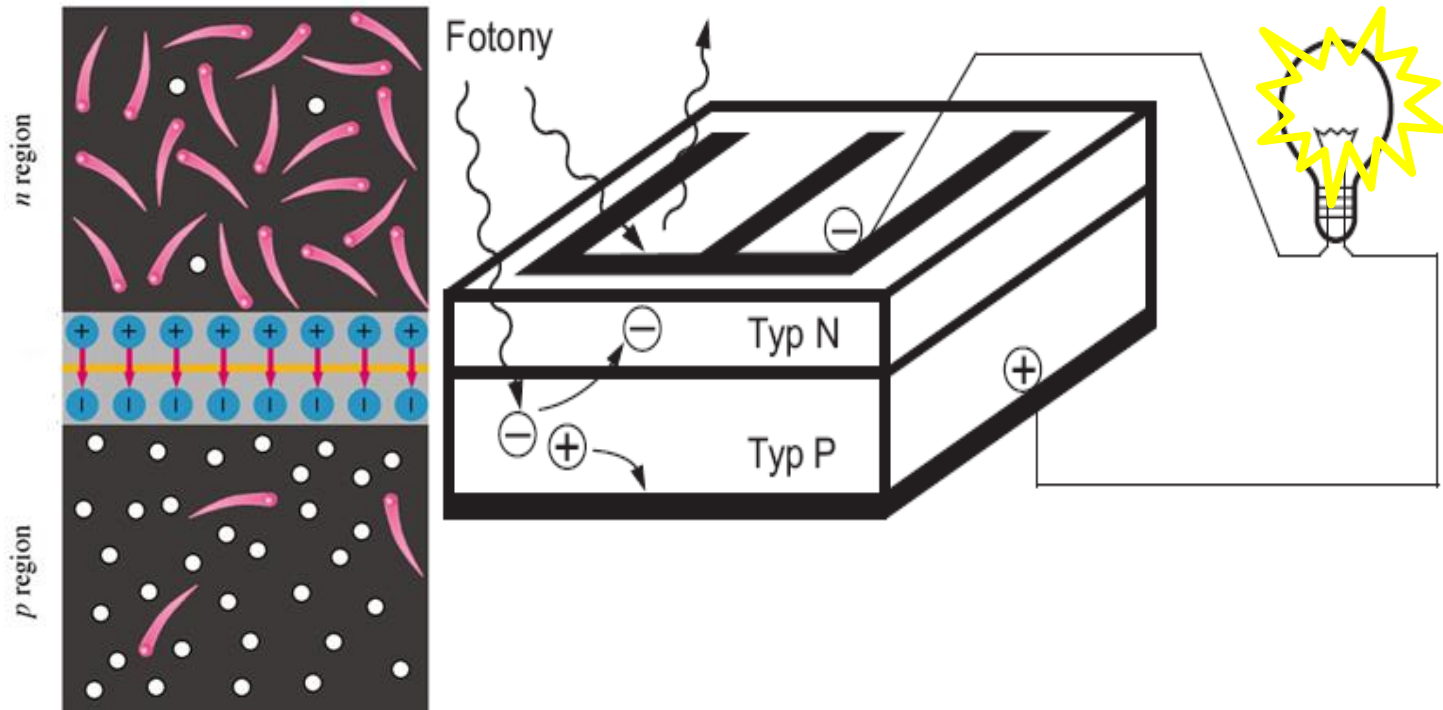
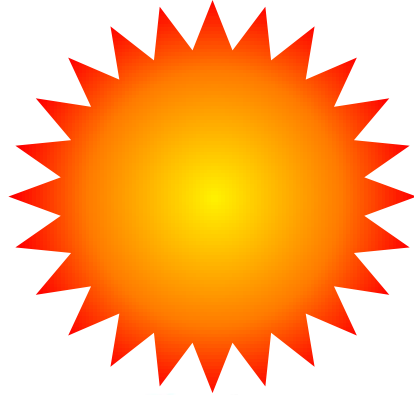
a) jednopółwkowy



b) dwupółwkowy



Efekt fotowoltaiczny



Bateria słoneczna i fotodioda

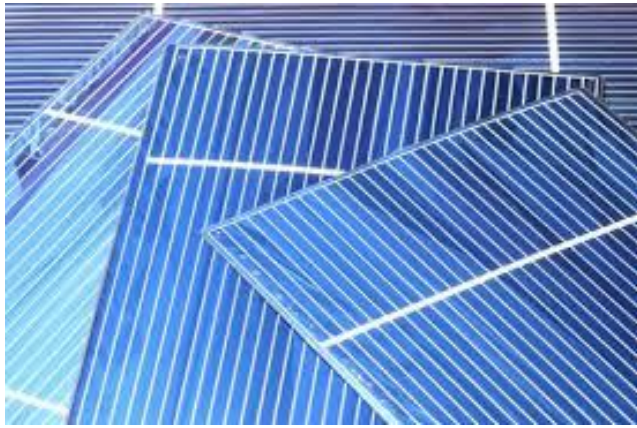
Ogniwo słoneczne i fotodioda działają w oparciu o efekt fotowoltaiczny:

- światło jest absorbowane dla

$$h\nu \geq E_g$$

- tworzą się pary elektron-dziura, które są separowane przez pole w złączu i transportowane przez złącze





Fotowoltaika

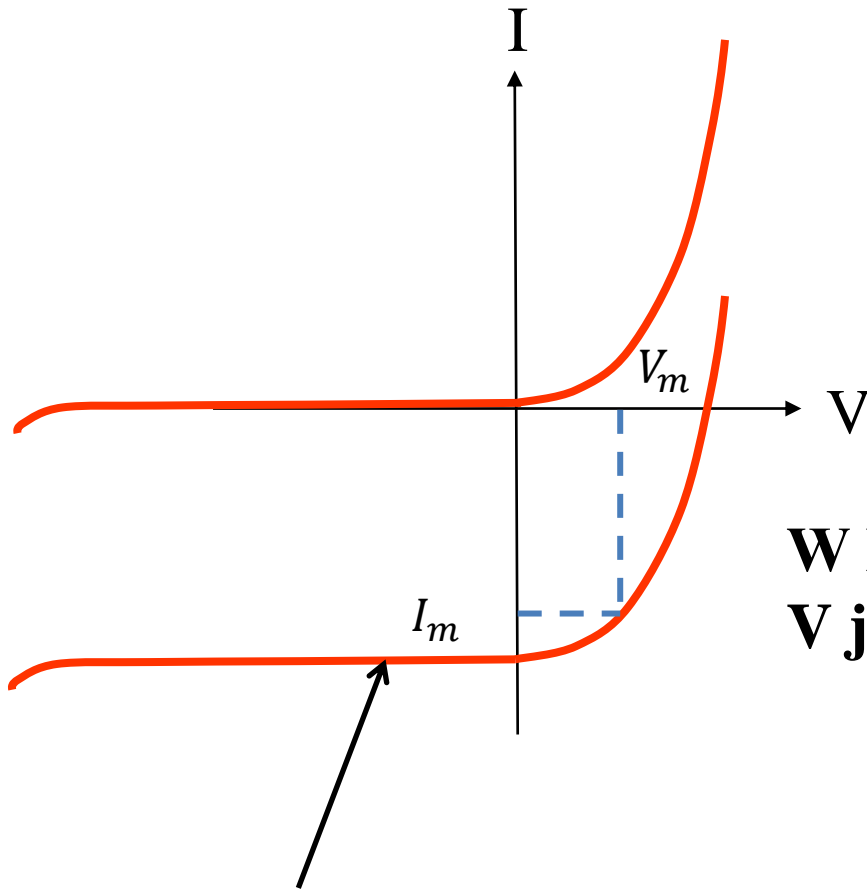


Jest to metoda wytwarzania energii elektrycznej poprzez konwersję promieniowania słonecznego bezpośrednio na prąd elektryczny. Konwersja odbywa się w półprzewodnikach, w których zachodzi efekt fotowoltaiczny.

Podstawowym elementem fotowoltaicznym jest ogniwo, z którego wykonuje się panele (zestaw wielu ogniw) i matryce paneli.



Sprawność ogniwa



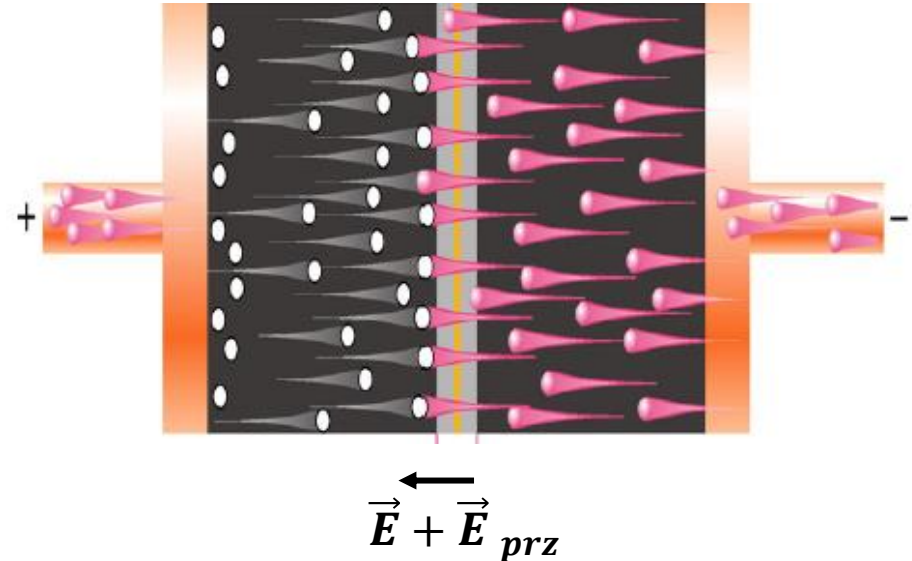
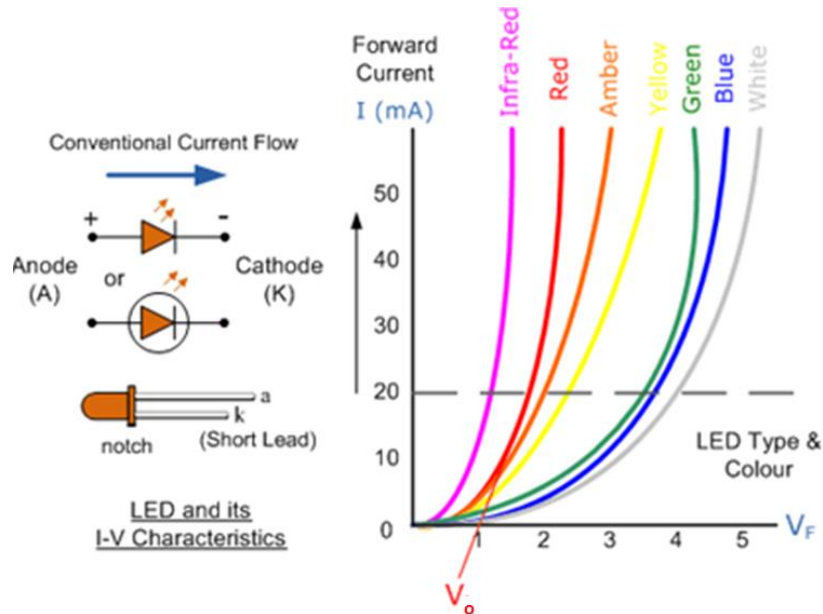
$$\eta = \frac{I_m V_m}{\Phi}$$

W IV ćwiartce charakterystyki I-V jest generowana moc:

Po oświetleniu

$$**P = IU < 0**$$

Dioda elektroluminescencyjna (LED) i laser półprzewodnikowy



- Złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia
- Elektrony i dziury w obszarze złącza rekombinują promieniście
- Emisja spontaniczna
- Laser – emisja wymuszona

Mechanika kwantowa

Stan elektronu charakteryzowany jest poprzez:

energię, wartość momentu pędu, rzut momentu pędu

oraz wartość rzutu własnego momentu pędu

<u>nazwa</u>	<u>symbol</u>	<u>wartość</u>
główna liczba kwantowa	n	1, 2, 3, ...
poboczna liczba kwantowa	l	0, 1, 2, ... $n-1$
magnetyczna liczba kwantowa	m_l	od $-l$ do $+l$
spinowa liczba kwantowa	m_s	$\pm 1/2$