Urządzenia półprzewodnikowe I

Prof. dr hab. Ewa Popko

ewa.popko@pwr.edu.pl
https://popko.wppt.pwr.edu.pl

p.231a A-1

Zawartość wykładu

Wy 1	**Rodzaje ciał stałych. Półprzewodniki.**	**2h**
Wy 2	**Koncentracja elektronów w metalu.**	**2h**
Wy 3	**Teoria pasmowa ciał stałych. Masa efektywna.**	**2h**
Wy4	**Koncentracja równowagowa elektronów i dziur w półprzewodnikach samoistnych i domieszkowanych**	**2h**
Wy 5	**Złącze p-n w stanie równowagi termodynamicznej. Równanie Poissona.**	**2h**
Wy 6	**Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n. Równanie Shockley'a. Pojemność złącza p-n.**	**2h**
Wy 7	**Efekt Zenera, jonizacja zderzeniowa. Dioda Zenera i dioda lawinowa.**	**2h**
Wy 8	**Złącze metal-półprzewodnik: prostujące i omowe. Charakterystyka I-V diody Schottky'ego. Heterostruktury.**	**2h**
Wy 9	**Tranzystor polowy i bipolarny**	**2h**
Wy10	**Dioda elektroluminescencyjna**	**2h**
Wy11	**Laser półprzewodnikowy**	**2h**
Wy12	**Efekt fotowoltaiczny i fotoprzewodnictwa. Detektory fotonowe.**	**4h**
Wy13	**Detektory termiczne.**	**2h**
Wy14	**Test zaliczeniowy**	**2h**
Razem		**30h**

Literatura

LITERATURA PODSTAWOWA:

1. Materiały do wykładu, dostępne poprzez internet: https://popko.wppt.pwr.edu.pl/

2. Fizyka dla Szkół Wyższych t. 3, wyd. Openstax https://cnx.org/contents/u2KTPvIK@8.12:tyRWlTJ7@2/Wst%C4%99p

3. J.Hennel „Podstawy elektroniki półprzewodnikowej" WNT Warszawa 1995.

4. B. Ziętek, Optoelektronika, Wyd. UMK, 2004

5. E.Płaczek-Popko, „Fizyka odnawialnych źródeł energii" Skrypt DBC

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

[1] D.A.Neamen „Semiconductor Physics and Devices", ed. McGraw-Hill, 2012

[2] M.Rusek, J.Pasierbiński "Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach" WNT Warszawa 1990

Zaliczenie

Ocena słownie	Ocena	Stopień opanowania wiedzy i umiejętności skala %
bardzo dobry	5,0	90-100%
dobry plus	4,5	80-89%
dobry	4,0	70-79%
dostateczny plus	3,5	60-69%
dostateczny	3,0	50-59%
niedostateczny	2,0	0-49%

1. Obecność na wykładach - obowiązkowa.
2. Test na ostatnim wykładzie (02.02.2027).
3. Test poprawkowy po upływie ok. tygodnia od pierwszego terminu.

Pierwszy tranzystor

1925 - tranzystor Lilienfelda
(teoretyczny pierwowzór tranzystora polowego FET)

Julius Edgar Lilienfeld – polski fizyk pochodzenia żydowskiego, twórca tranzystora polowego.



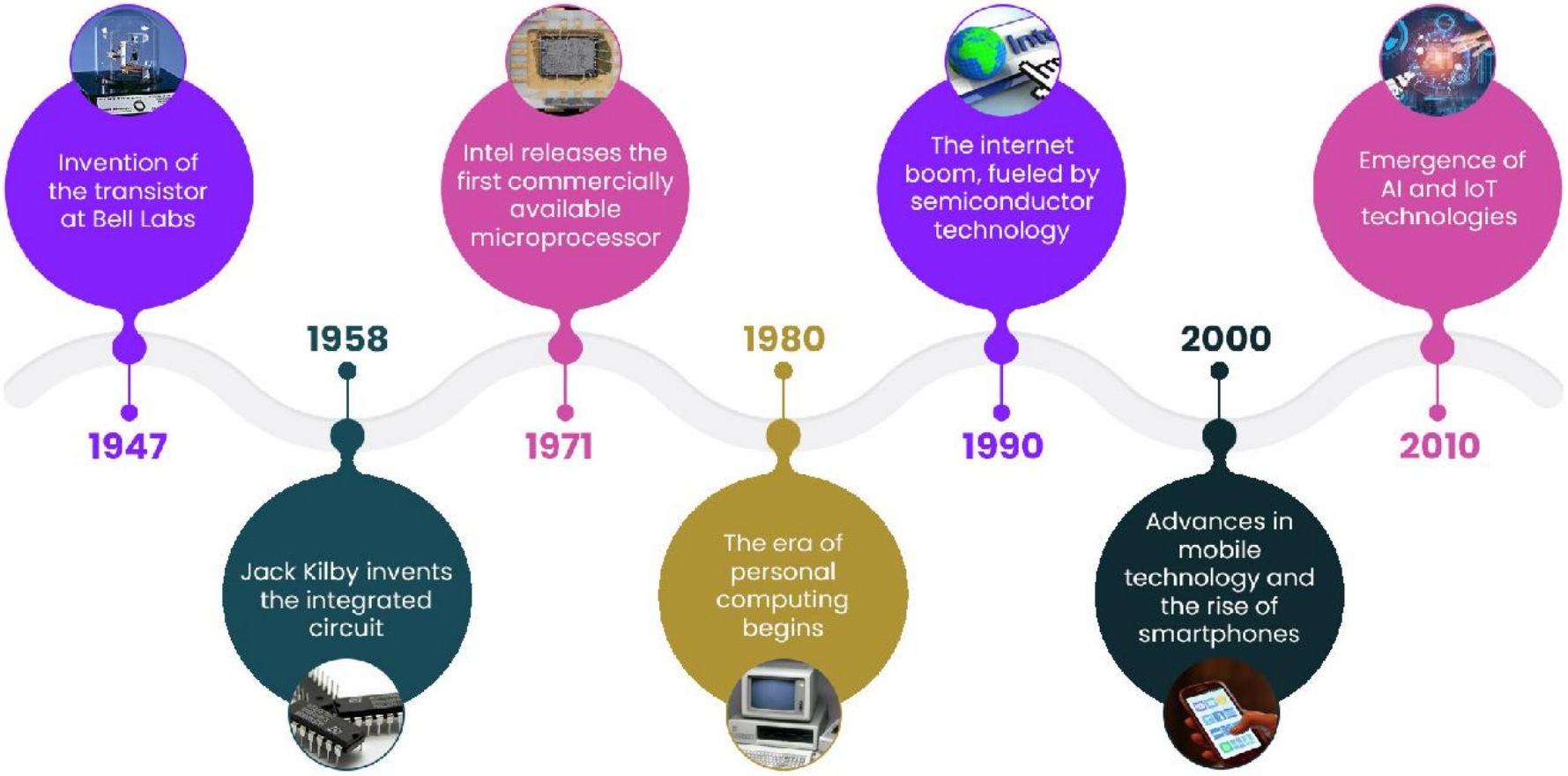
Miliardy tranzystorów w naszych urządzeniach elektronicznych to właśnie tranzystory FET.

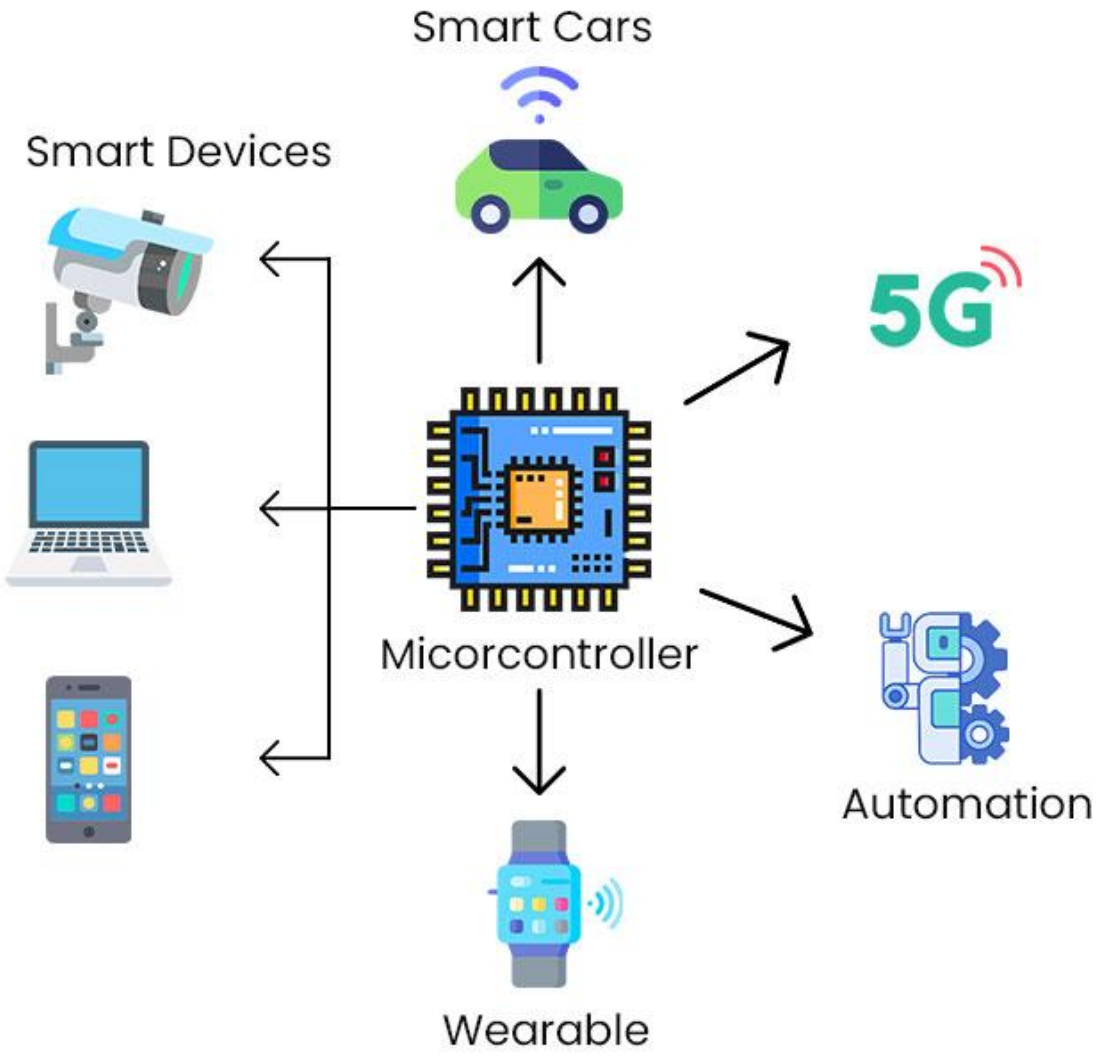


1947 – tranzystor punktowy Bell Lab.

William Shockley, John Bardeen i Walter Brattain

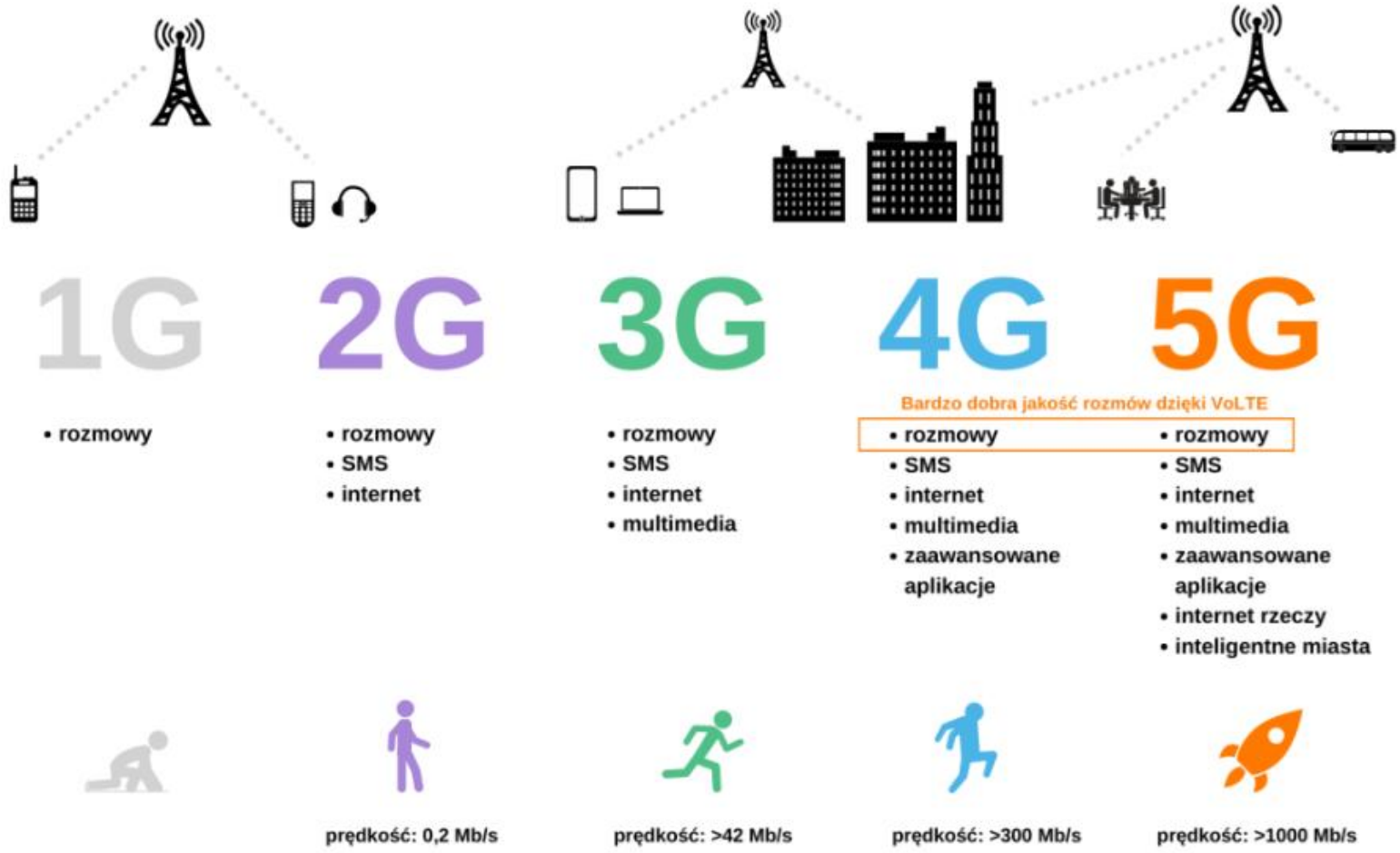
TIME-line półprzewodników





Internet rzeczy (IoT) **- sieć fizycznych urządzeń wyposażonych w czujniki i oprogramowanie, które pozwalają im gromadzić i wymieniać dane przez internet**

5G



https://www.orange.pl/poradnik/co-to-jest-5g-i-jak-dziala/

Rodzaje ciał stałych

Przewodnik

- **materiał przewodzący prąd elektryczny (Cu, Ag, Au, Al, grafen)**

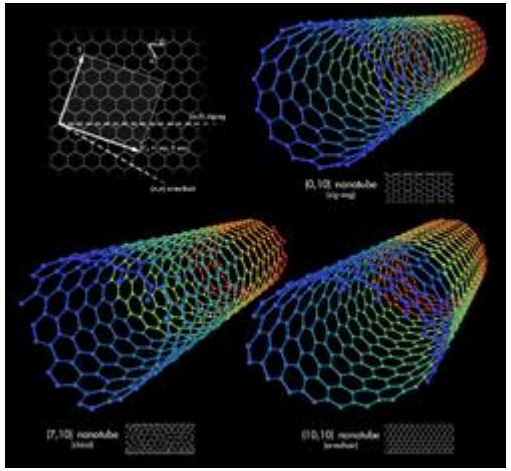
Izolator

- **materiał nie przewodzący prądu elektrycznego (np. szkło)**

Półprzewodnik

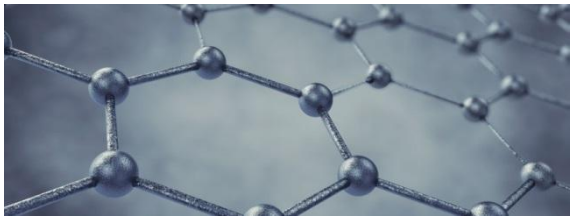
- **materiał, który przewodzi prąd elektryczny lepiej niż izolator i gorzej niż przewodnik (Si, Ge)**
- **materiał, którym można łatwo manipulować aby był dobrym przewodnikiem**
- **w półprzewodnikach prąd elektryczny może polegać na ruchu elektronów (półprzewodnik typu n) lub „dziur” – ładunków dodatnich (pólprzewodnik typu p)**

Nowe materiały

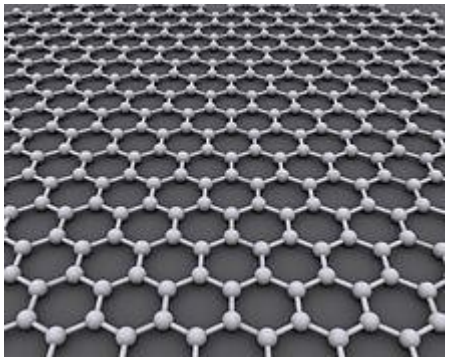


Nanorurki węglowe.

- **Wytrzymałość na rozciąganie nanorurek wielowarstwowych ~ 63 GPa (stal konstrukcyjna ~ 0,4 GPa).**
- **B. mała gęstość ~ 1,3-1,4 g/cm^3.**
- **Możliwy tranzystor jednoelektronowy**

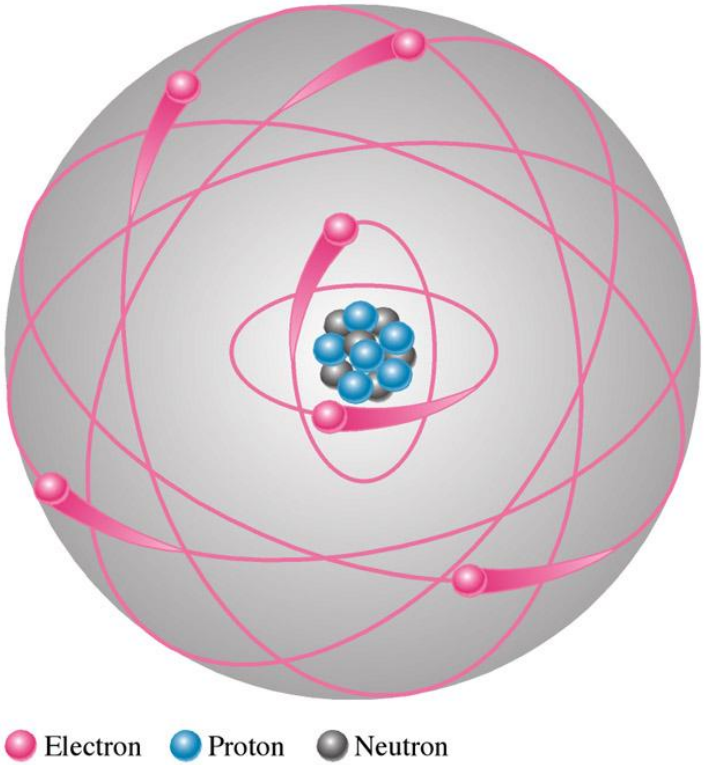


Grafen



- **Bardzo dobry przewodnik ciepła oraz elektryczności – przewodność cieplna 5000 W/mK (dla srebra– 429 W/mK).**
- **Wytrzymałość na rozciąganie - 130 GPa**
- **Przezroczysty dla światła widzialnego**

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**

$$hf = E_m - E_n \qquad h = 6.63 \cdot 10^{-34} Js$$

gdzie E_m, E_n oznaczają energie tych stanów.

- **Moment pędu elektronu jest skwantowany**

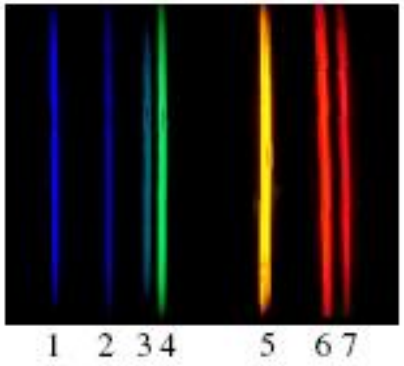
$$m_e v r = n\frac{h}{2\pi}$$

Atomu wodoru

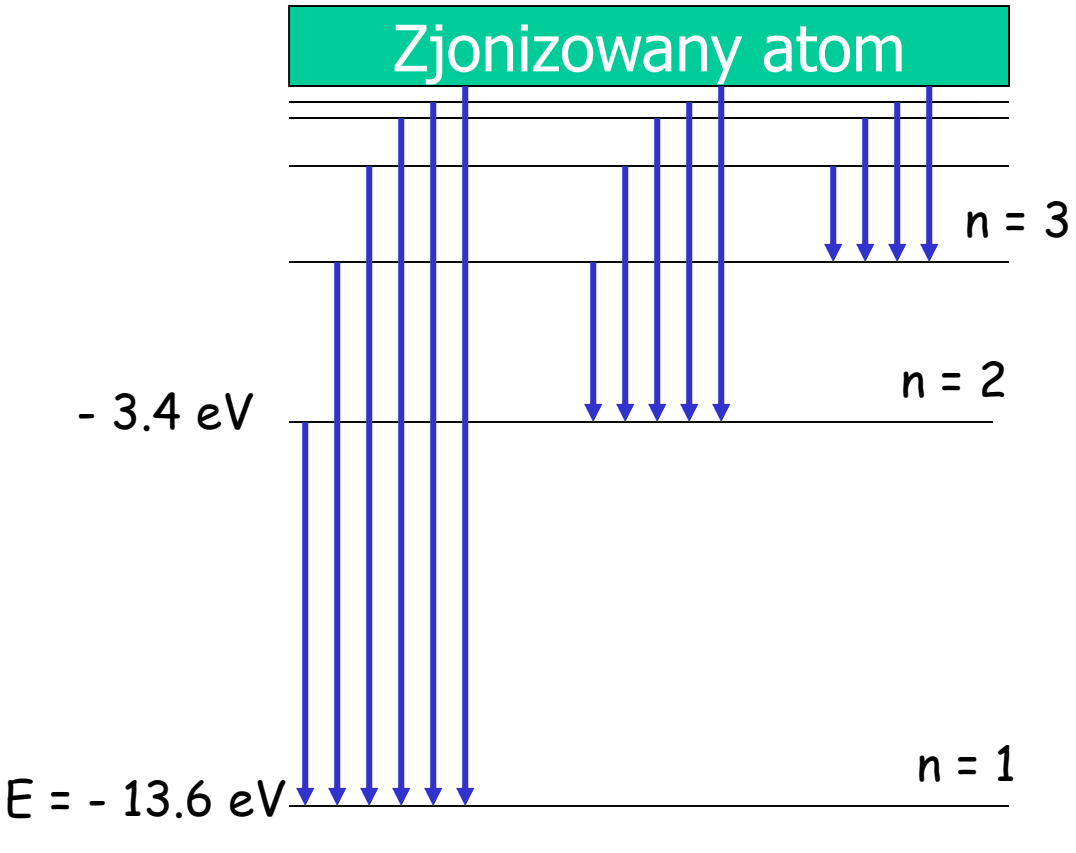
$$E_n = -13.6eV \cdot \frac{1}{n^2}$$

n- główna liczba kwantowa

n = 1,2,3,4,5,…;



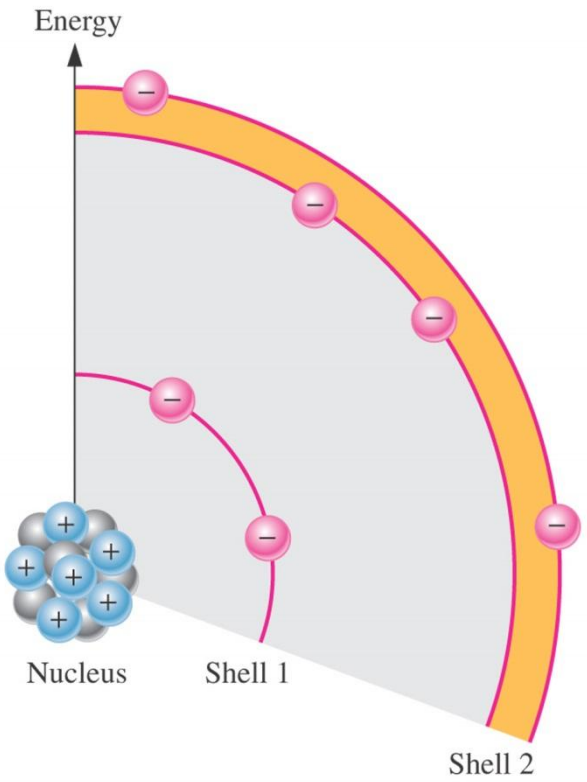
Widmo helu



Budowa atomu

Powłoki i orbity

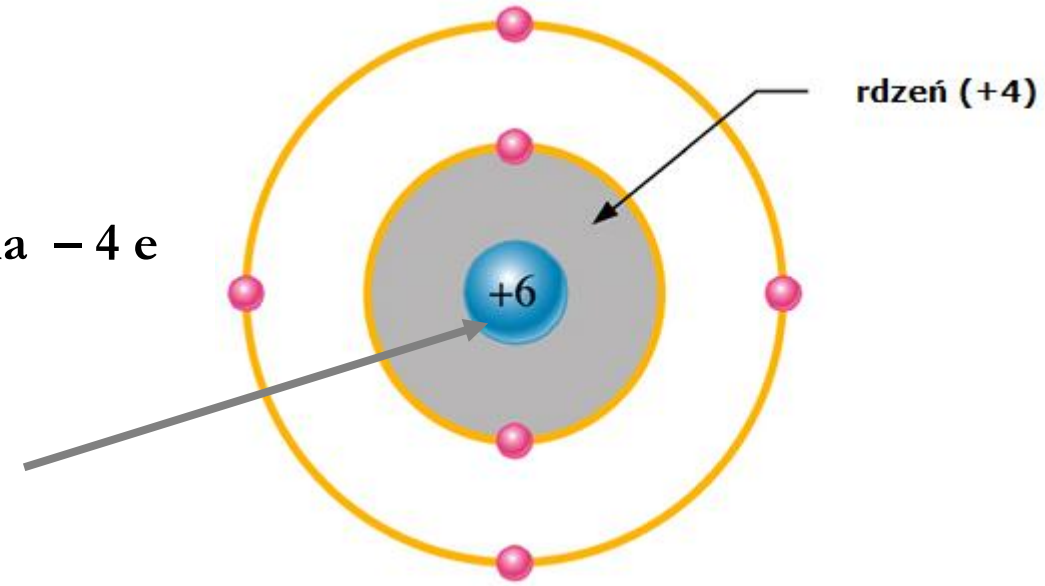
- **Orbity grupują się w powłoki (ang. shells)**
- **Różnice energii pomiędzy poziomami w obrębie powłoki są << od różnic energii pomiędzy powłokami**
- **Energia elektronu rośnie ze wzrostem odległości od jądra**



Budowa atomu

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

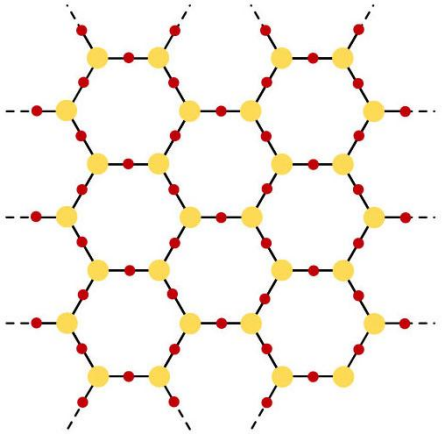
Atom węgla:
-powłoka walencyjna – 4 e
-wewnętrzna – 2 e
Jądro:
-6 protonów
-6 neutronów



- **O właściwościach atomu decydują elektrony walencyjne!**

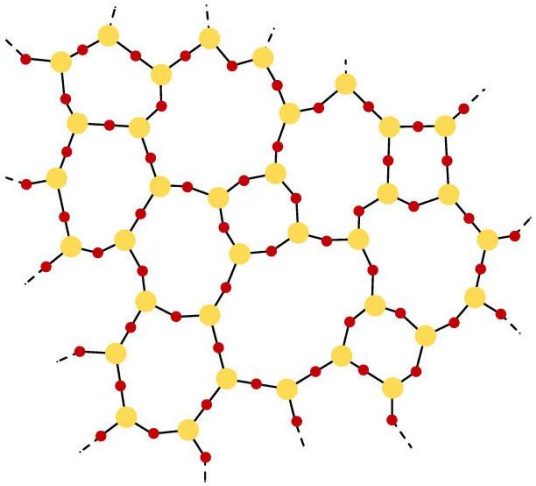
Kryształy

Struktura krystaliczna



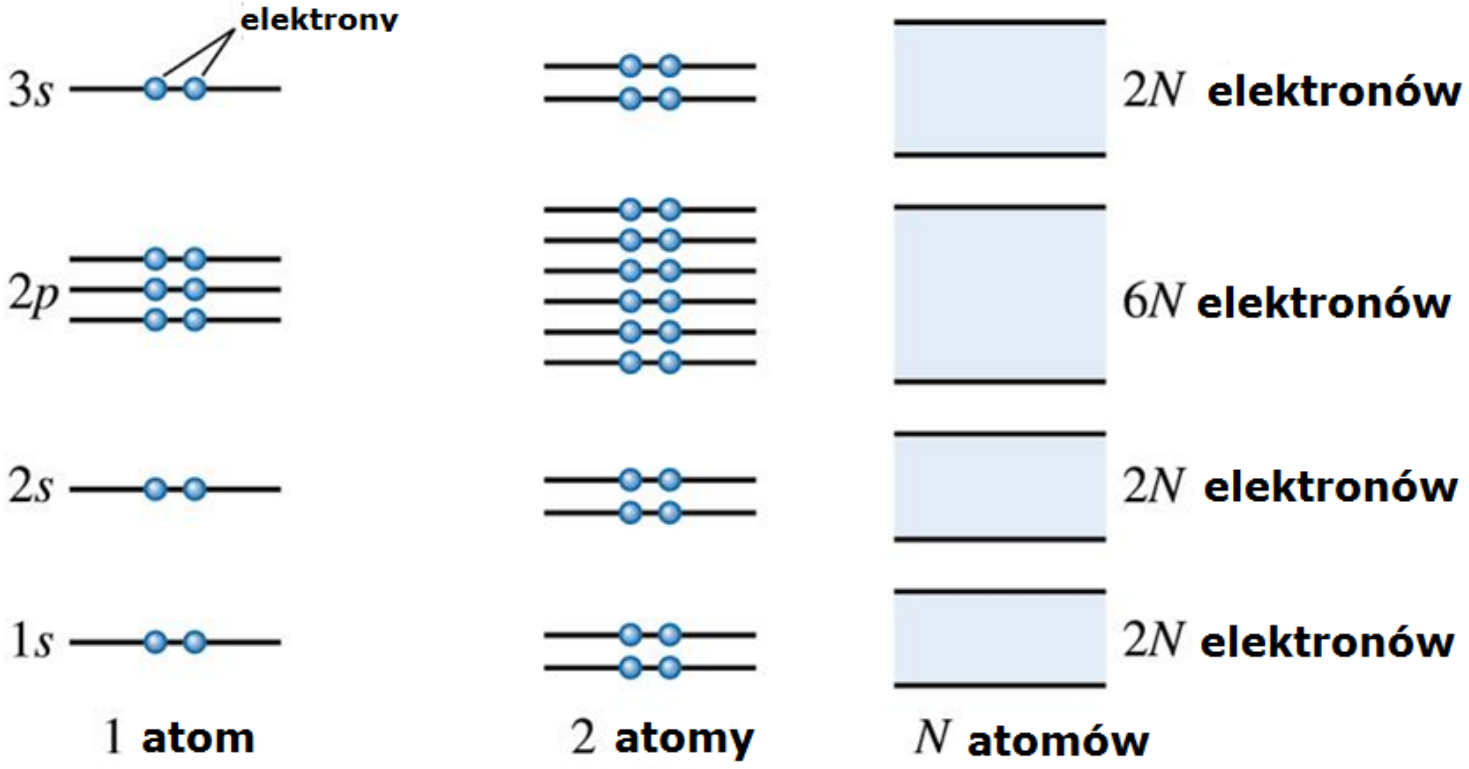
(a)

Struktura amorficzna



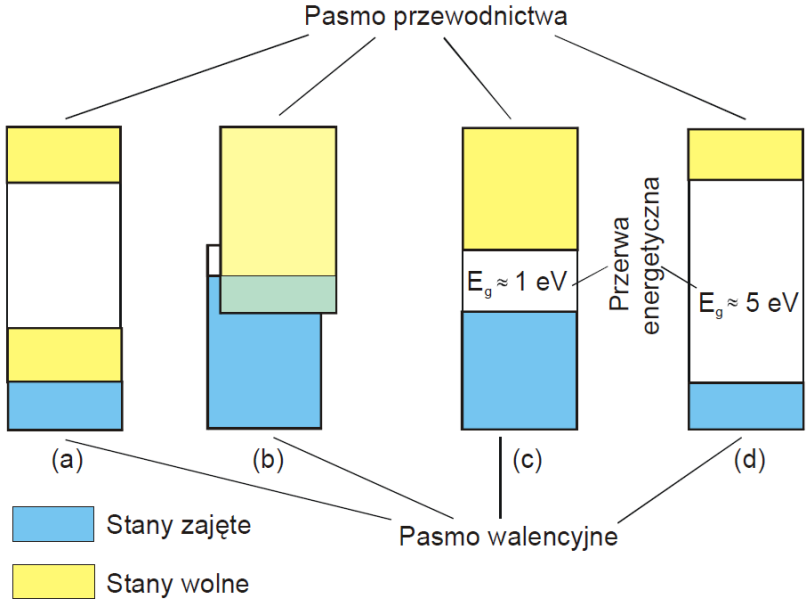
(b)

Rozszczepienie poziomów energet. w krysztale



Metale, izolatory, półprzewodniki

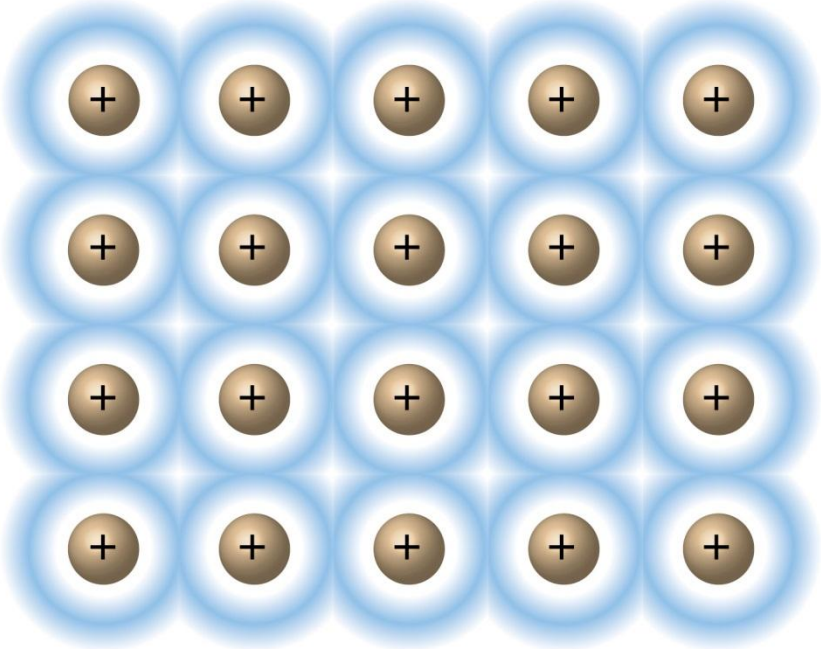
- **Zbliżenie atomów w krysztale prowadzi do rozszczepienia poziomów energetycznych. Istotnemu rozszczepieniu ulegają stany elektronów walencyjnych.**
- **Rozszczepione poziomy grupują się w pasma**
- **Najwyższe pasmo obsadzone elektronami w niemetalach nazywa się pasmem walencyjnym.**
- **Sąsiednie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



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

Przewodniki

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



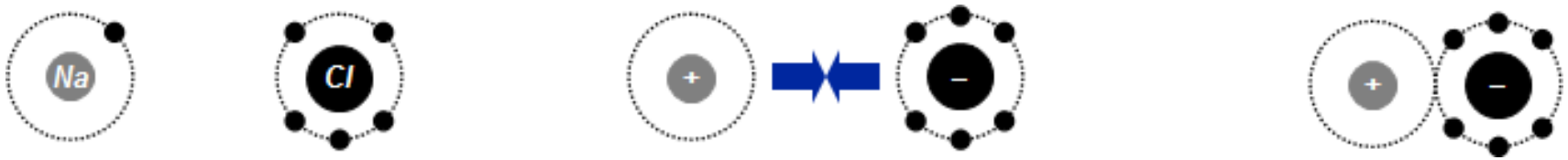
Półprzewodniki i izolatory

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

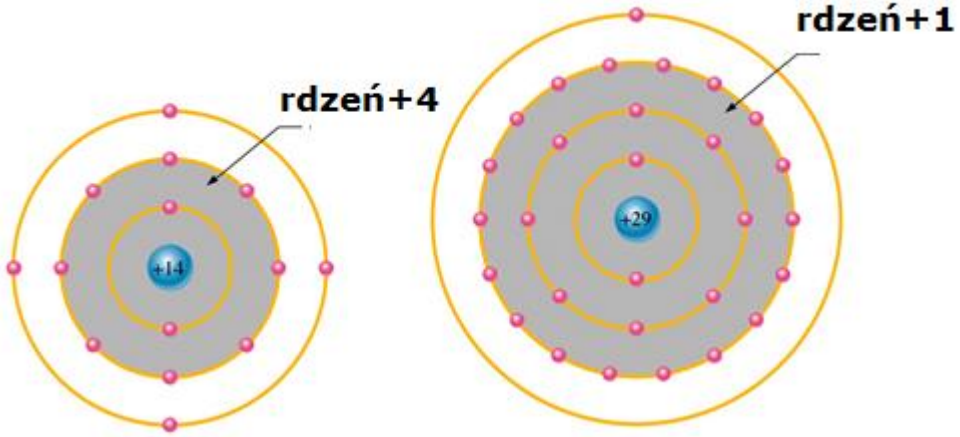
Porównanie atomu półprzewodnika i przewodnika

Atom Si:

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

Atom Cu:

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



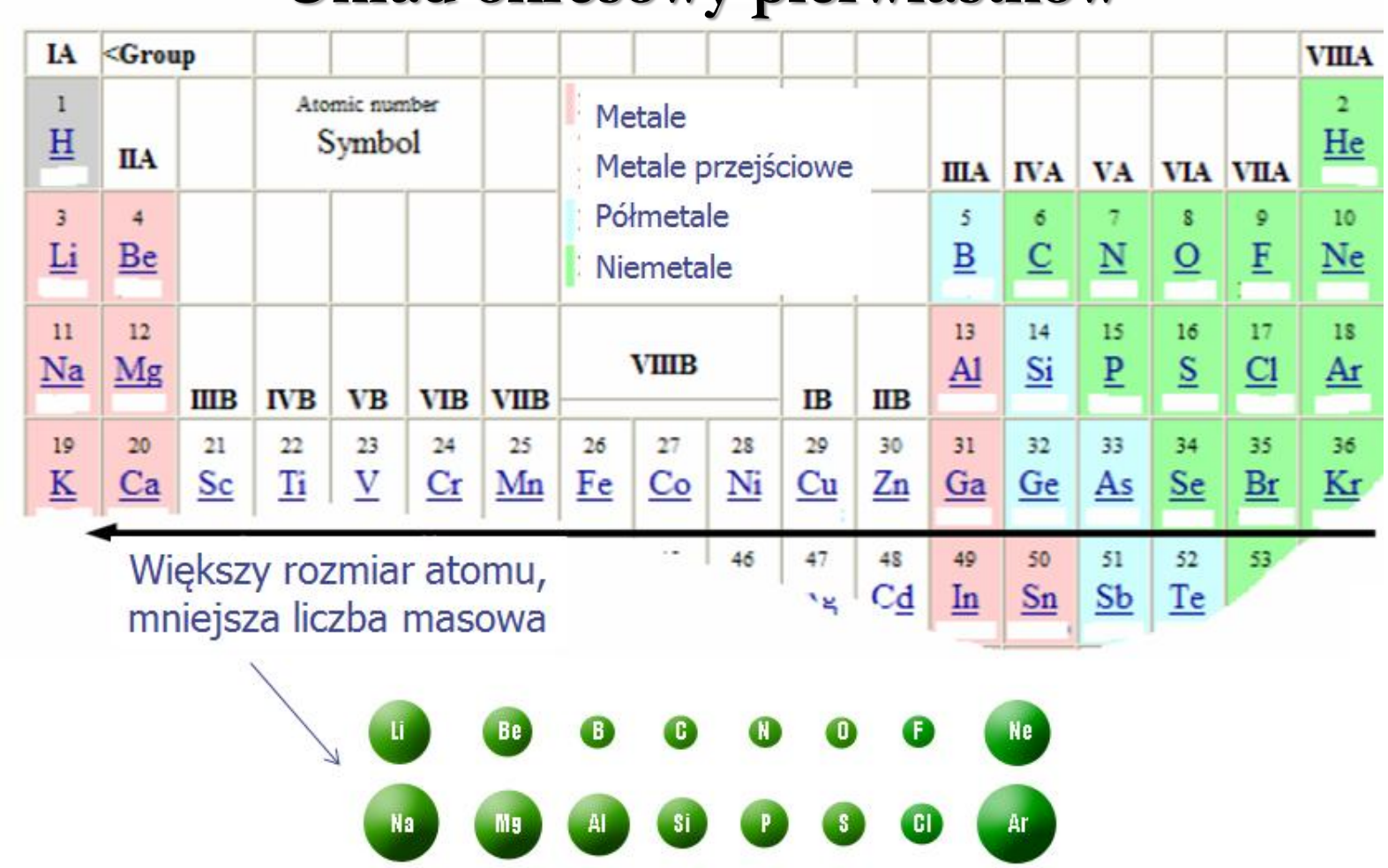
14 protonów
14 neutronów

10 elektronów na powłokach wewnętrznych

29 protonów
29 neutronów

28 elektronów na powłokach wewnętrznych

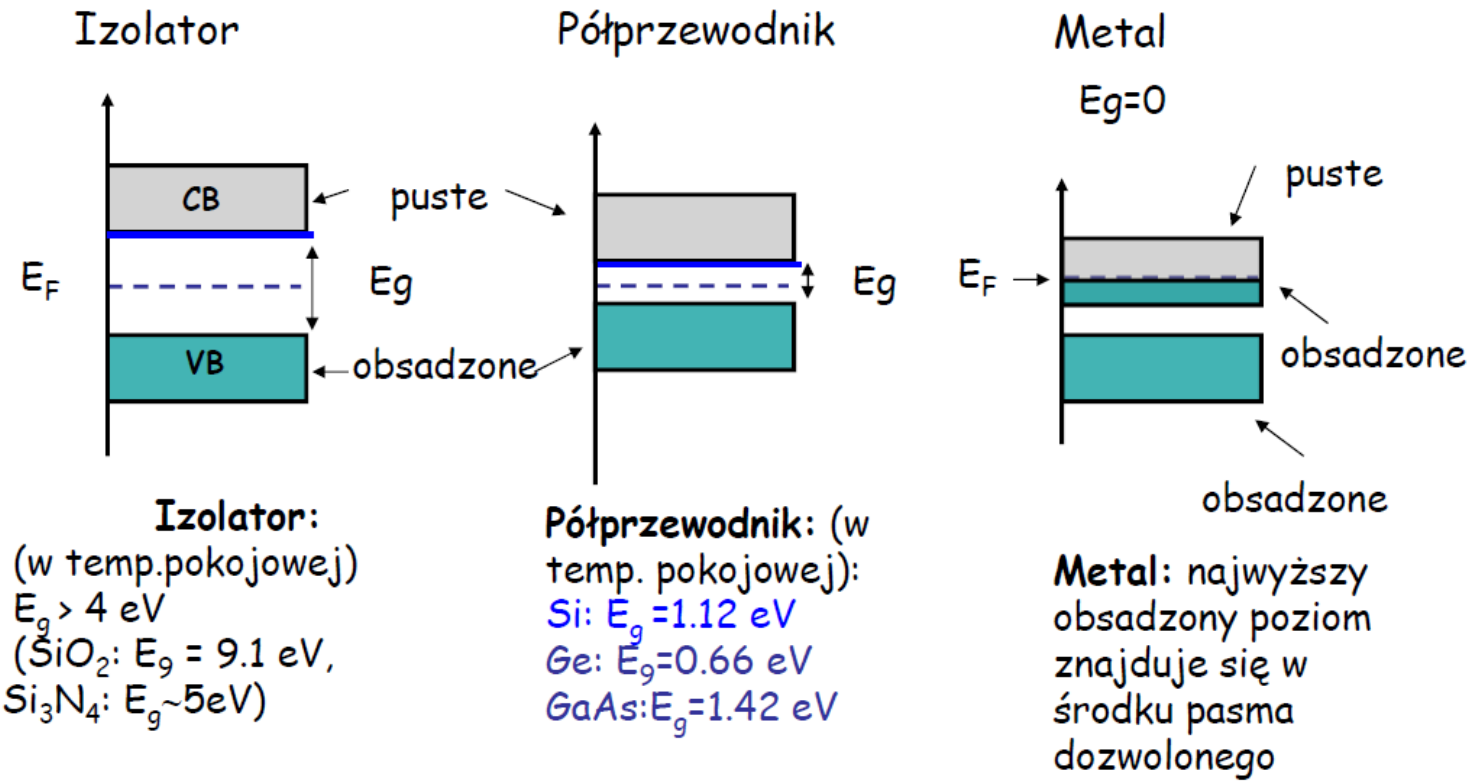
Układ okresowy pierwiastków



- ***W obrębie okresu promienie atomów zmniejszają się malejąc w danym okresie od strony lewej do prawej.*** **Wiąże się to ze wzrostem liczby protonów w jądrze, tzn. z silniejszym przyciąganiem elektronów przez jądro.**
- ***W obrębie grup promienie atomów wzrastają wraz ze wzrostem liczb atomowych.*** **Wiąże się to ze wzrostem liczby powłok elektronowych, których wpływ na wielkość średnicy atomu przewyższa wpływ wzrostu ładunku jądra, decydującego o zmniejszeniu średnicy atomu**

Półprzewodniki, przewodniki i izolatory

Struktura pasmowa



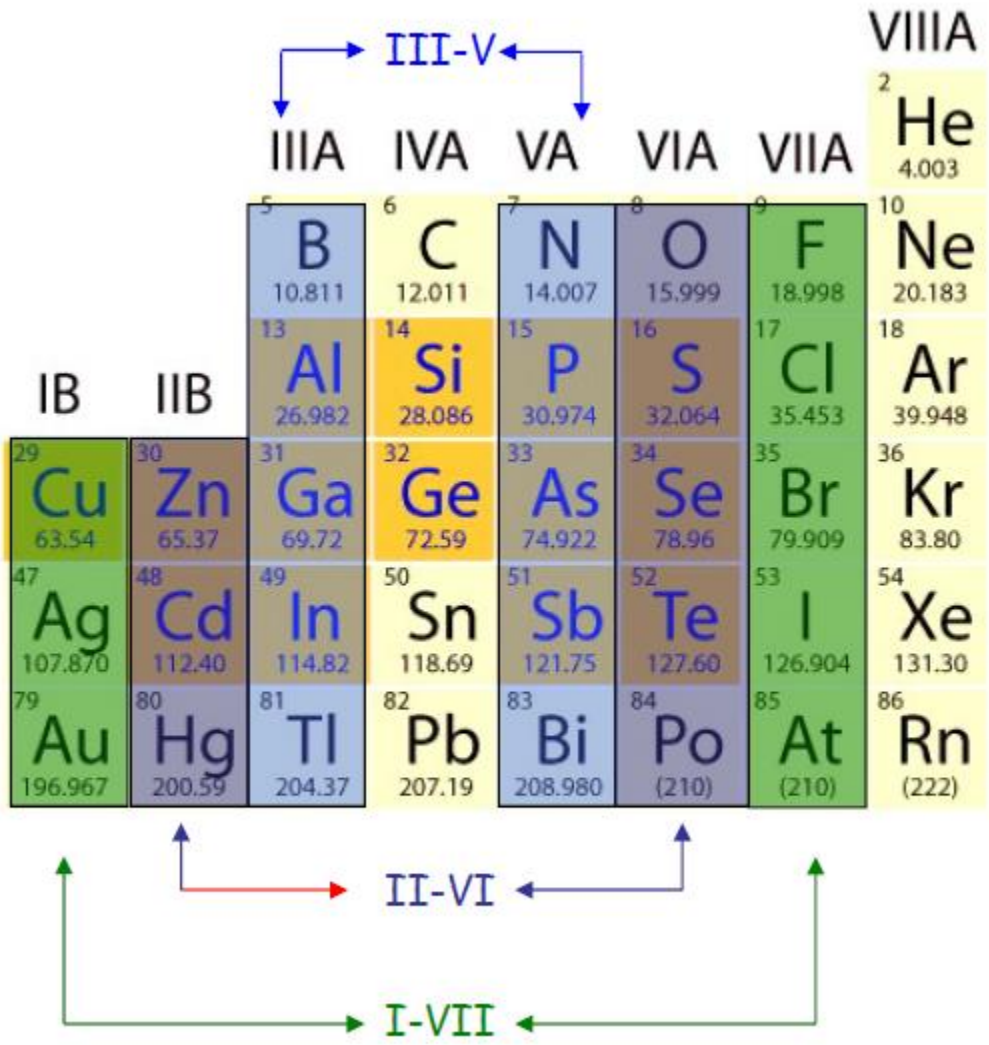
Izolator:
(w temp.pokojowej)
$E_g > 4$ eV
(SiO_2: $E_9 = 9.1$ eV,
Si_3N_4: E_g~5eV)

Półprzewodnik: (w temp. pokojowej):
Si: E_g =1.12 eV
Ge: E_9=0.66 eV
GaAs:E_g=1.42 eV

Metal: najwyższy obsadzony poziom znajduje się w środku pasma dozwolonego

1eV (elektronowolt) – energia, jaką uzyskuje elektron w polu elektrycznym o różnicy potencjałów 1V

Półprzewodniki i związki półprzewodnikowe



Grupa III-V

Groupa II-VI

Grupa I-VII

Stała sieci, konfiguracja elektronowa i przerwa wzbroniona

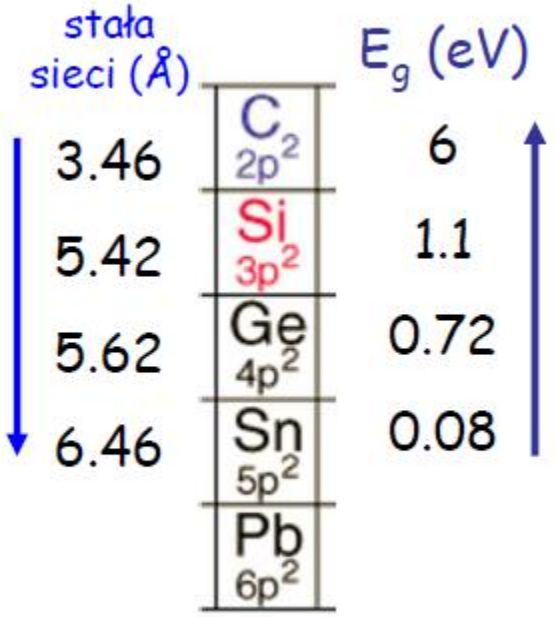


TABLE 18-1 ■ *Electrical conductivity of selected materials at* $T = 300\ K$*

Material	Conductivity ($ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$)
Superconductors	
Hg, Nb_3Sn, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, MgB_2	Infinite (under certain conditions such as low temperatures)
Metals	
Alkali metals:	
Na	2.13×10^5
K	1.64×10^5
Alkali earth metals:	
Mg	2.25×10^5
Ca	3.16×10^5
Group 3B metals:	
Al	3.77×10^5
Ga	0.66×10^5
Transition metals:	
Fe	1.00×10^5
Ni	1.46×10^5
Group 1B metals:	
Cu	5.98×10^5
Ag	6.80×10^5
Au	4.26×10^5

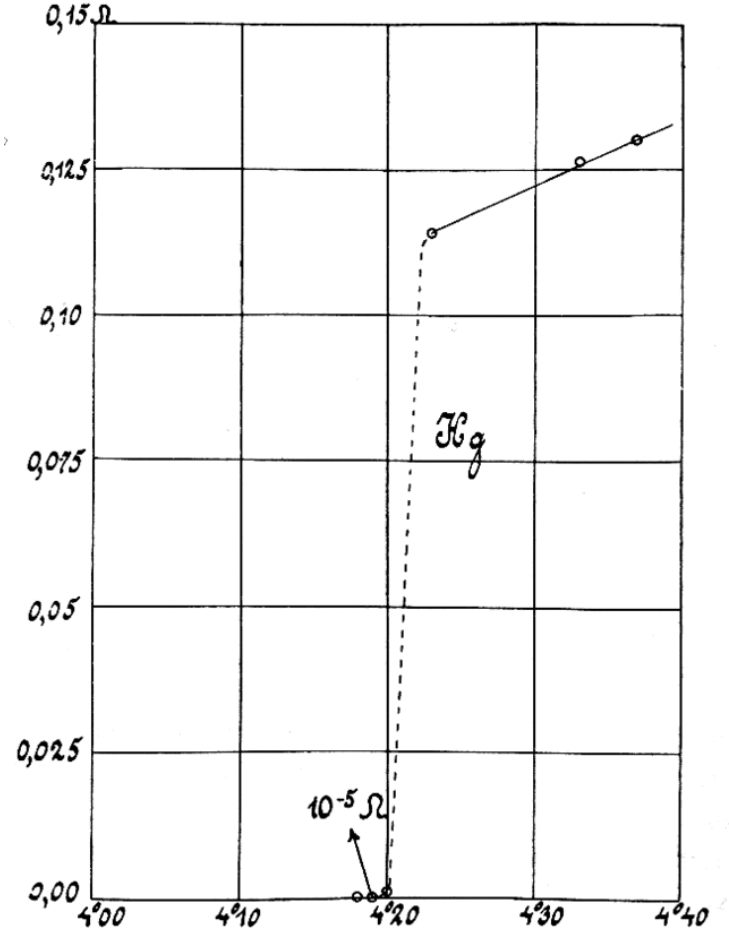
Material	Conductivity ($ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$)
Semiconductors	
Group 4B elements:	
Si	5×10^{-6}
Ge	0.02
α-Sn	0.9×10^{5}
Compound semiconductors	
GaAs	2.5×10^{-9}
AlAs	0.1
SiC	10^{-10}
Ionic Conductors	
Indium tin oxide (*ITO*)	
Yttria-stabilized zirconia (*YSZ*)	
Insulators, Linear and Nonlinear Dielectrics	
Polymers:	
Polyethylene	10^{-15}
Polytetrafluorethylene	10^{-18}
Polystyrene	10^{-17} to 10^{-19}
Epoxy	10^{-12} to 10^{-17}
Ceramics:	
Alumina (Al_2O_3)	10^{-14}
Silicate glasses	10^{-17}
Boron nitride (BN)	10^{-13}
Barium titanate ($BaTiO_3$)	10^{-14}
C (diamond)	$<10^{-18}$

** Unless specified otherwise, assumes high purity material.*

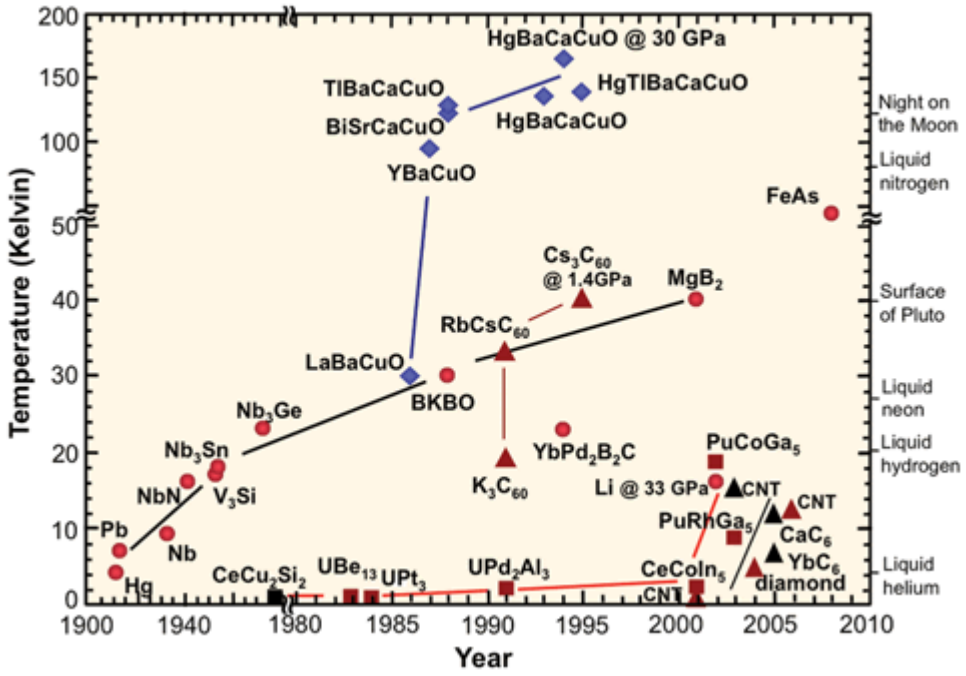
Zastosowanie półprzewodników

- **Elektronika: podstawowe elementy (diody, tranzystory) układów dyskretnych i scalonych**
- **Teleinformatyka**
- **Emitery 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**

Nadprzewodniki nisko – i wysoko - temperaturowe

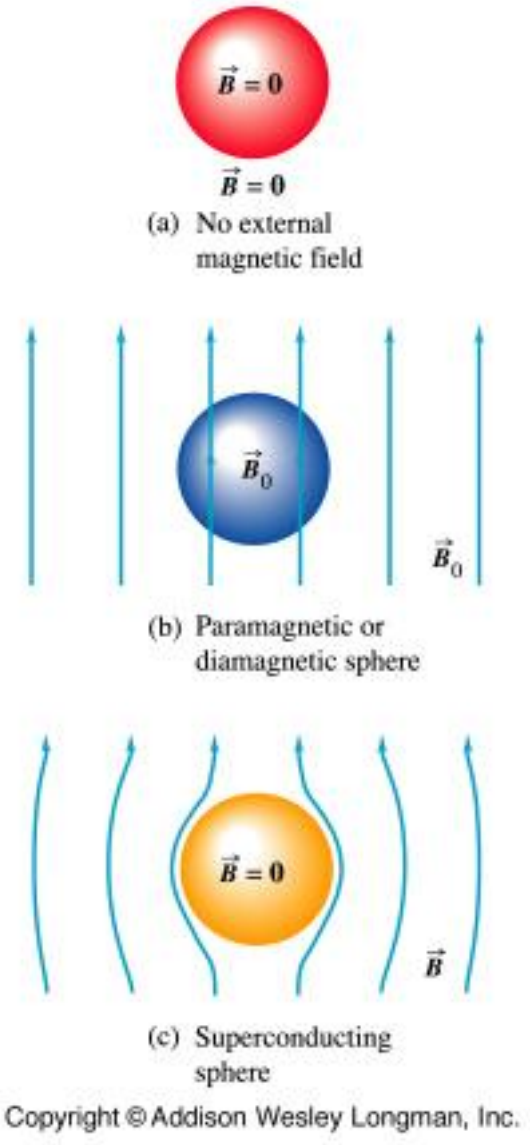


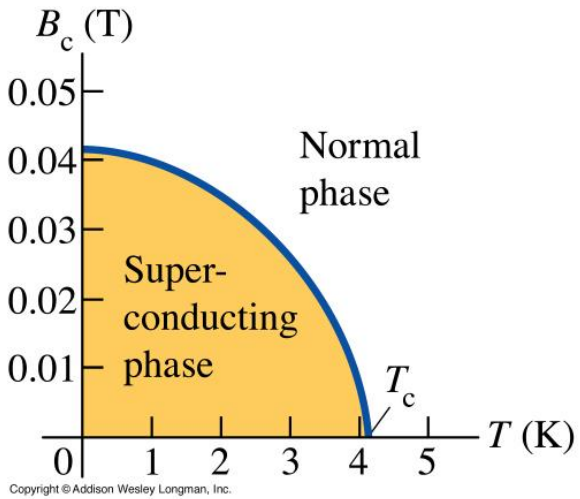
Kamerlingh Onnes 1911

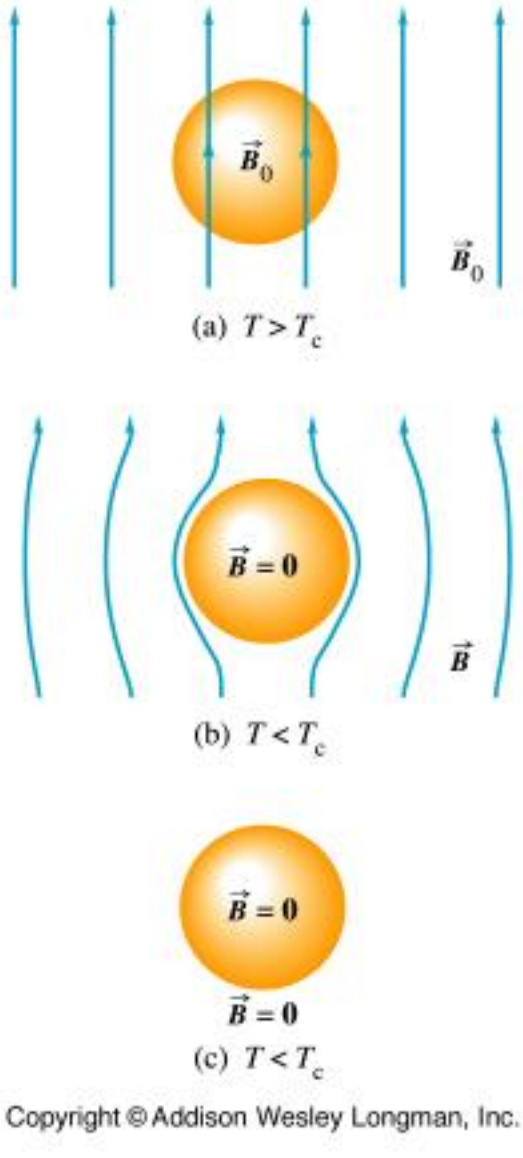


1957 teoria BCS J.Bardeen, L.Cooper, J.Schrieffer (Nobel 1972)

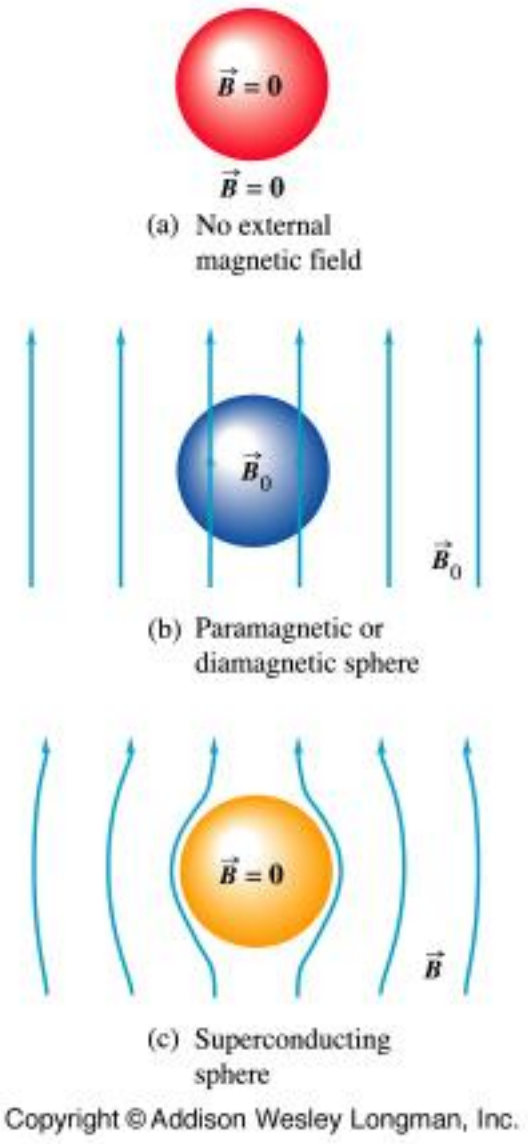
Efekt Meissnera







Efekt Meissnera



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Pole magnetyczne nie wnika do nadprzewodnika. Nadprzewodnik jest „wypychany” z pola magnetycznego.

- **Wyjaśnienie: po włączeniu pola magnetycznego, w nadprzewodniku indukują się prądy wirowe. Te prądy są źródłem pola magnetycznego, które ma zwrot przeciwny do pola zewnętrznego. Magnes i nadprzewodnik odpychają się.**

- **Próba odsunięcia od siebie magnesu i nadprzewodnika znowu wywołuje powstanie prądu wirowego skutkującego tym razem pojawieniem się pola magnetycznego, powodującego przyciąganie.**