

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. J.Hennel „Podstawy elektroniki półprzewodnikowej” WNT Warszawa 1995.
2. B. Ziętek, Optoelektronika, Wyd. UMK, 2004
3. Materiały do wykładu, dostępne poprzez internet:
<https://popko.wppt.pwr.edu.pl>
4. E.Płaczek-Popko, „Fizyka odnawialnych źródeł energii” Skrypt DBC
5. S.Kuta „Elementy i układy elektroniczne” Wyd. AGH, wyd. I 2000

- **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

Pierwszy tranzystor



Rodzaje ciał stałych

Przewodnik

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

Izolator

- materiał nie przewodzący prądu elektrycznego (np. szkło)

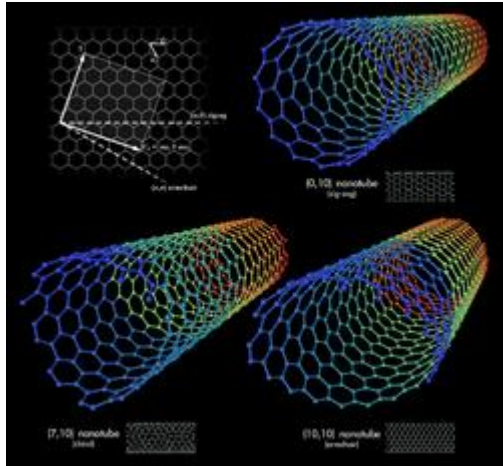
Półprzewodnik

- 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 (półprzewodnik typu p)

Nowe materiały

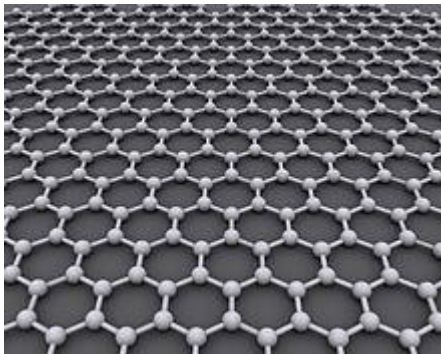
Nanorurki węglowe.

- Wytrzymałość na rozciąganie nanorurek wielowarstwowych ~ 63 GPa (stal konstrukcyjna $\sim 0,4$ GPa).
- B. mała gęstość $\sim 1,3-1,4$ g/cm³.
- Możliwy tranzystor jednoelektronowy

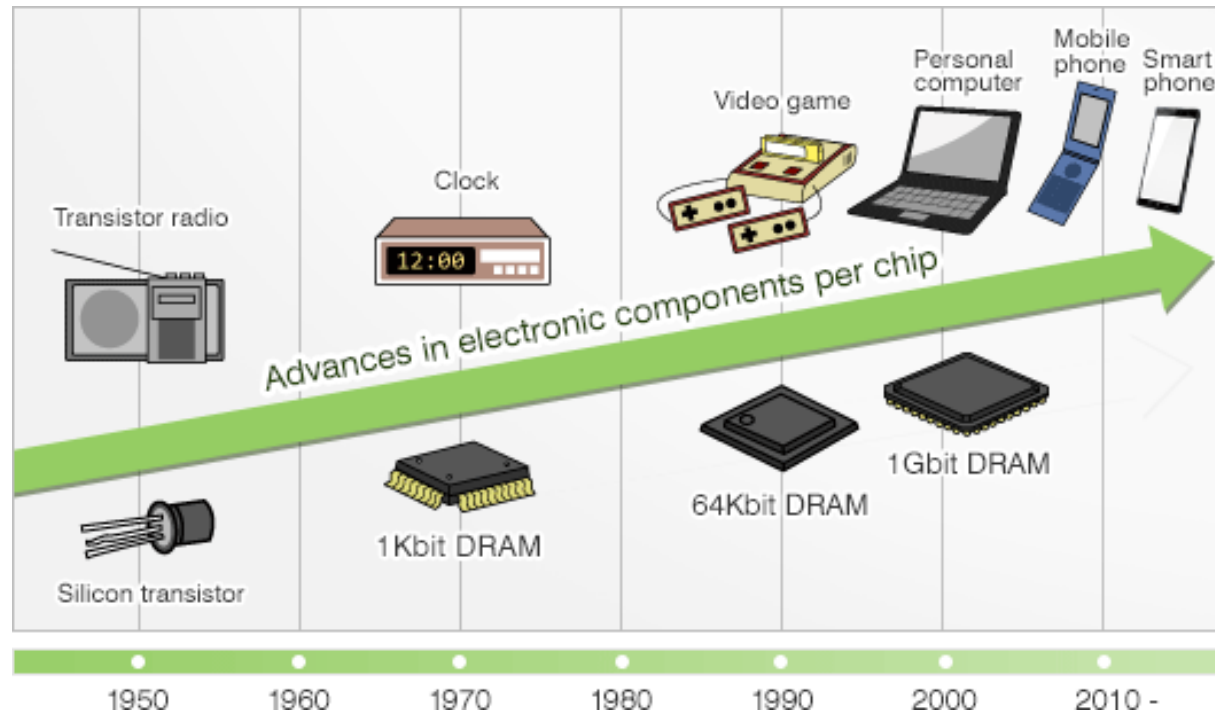


Grafen

- 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



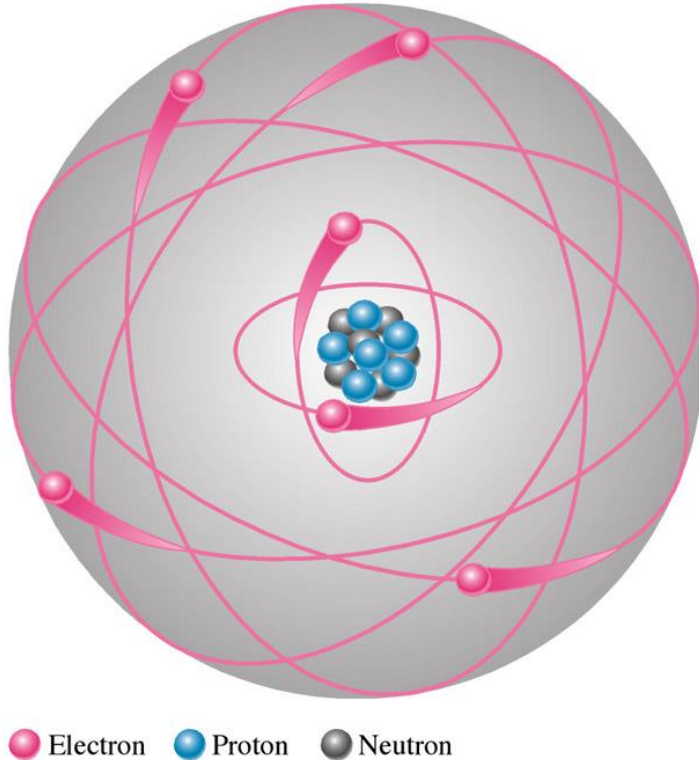
Półprzewodniki - historia



DRAM (ang. *dynamic random-access memory*) – rodzaj ulotnej pamięci półprzewodnikowej, która przechowuje każdy bit danych w oddzielnym kondensatorze wewnątrz układu scalonego.

<https://www.emergingtechbrew.com/stories/2021/10/21/a-200-year-timeline-of-the-semiconductor-industry>

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

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

gdzie E_m, E_n oznaczają energie tych stanów.

- Moment pędu elektronu jest skwantowany

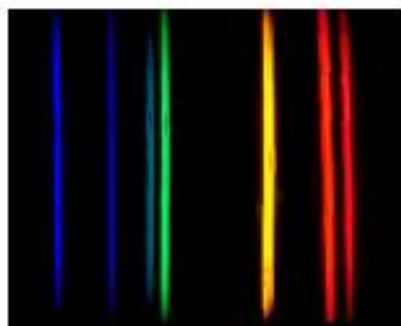
$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

Atomu wodoru

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

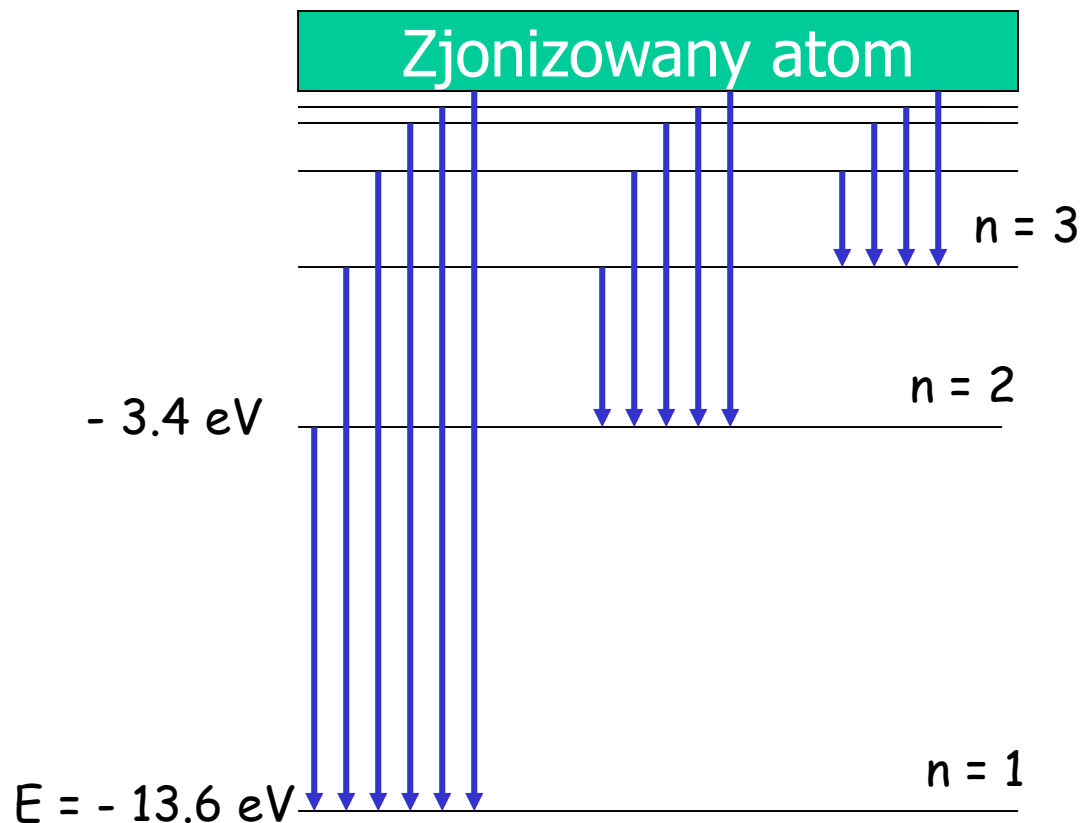
n- główna liczba kwantowa

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



1 2 3 4 5 6 7

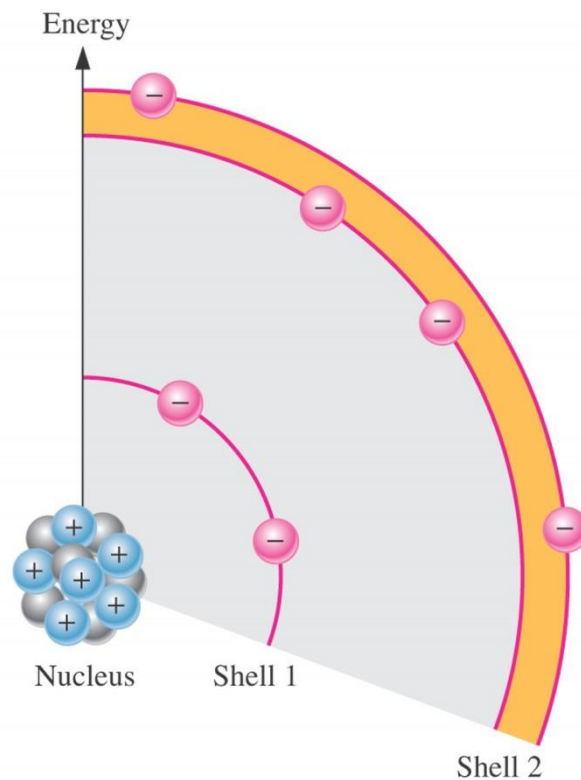
Widmo helu



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



Budowa atomu

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

Atom węgla:

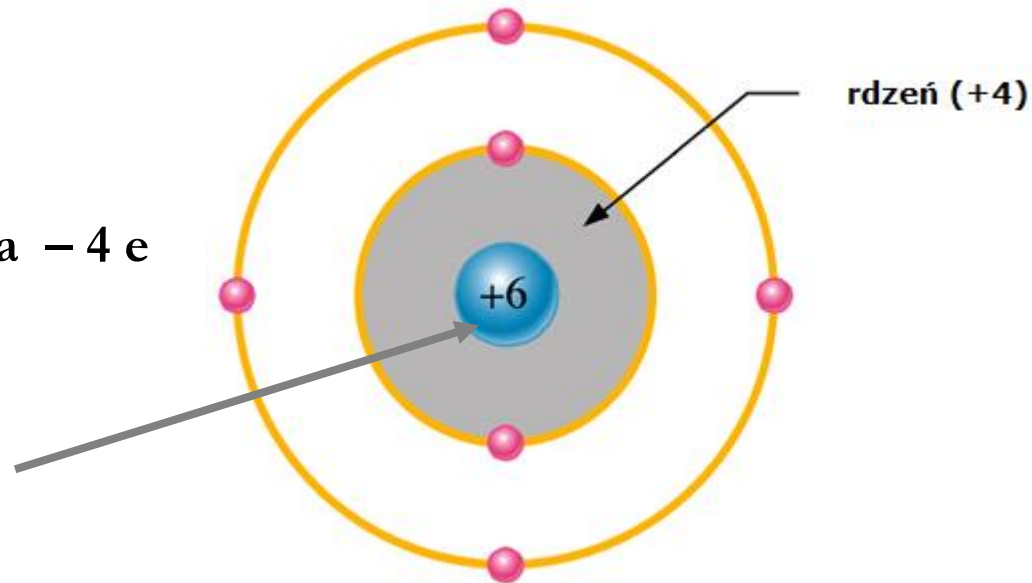
-powłoka walencyjna – 4 e

-wewnętrzna – 2 e

Jądro:

-6 protonów

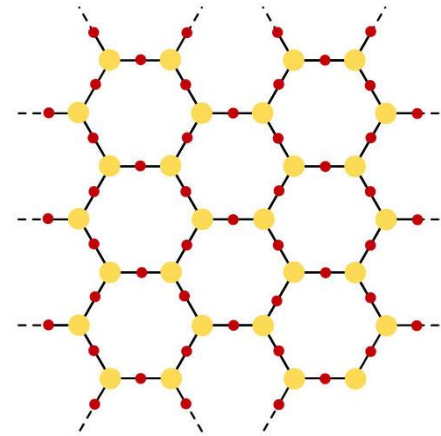
-6 neutronów



- O właściwościach atomu decydują elektrony walencyjne!

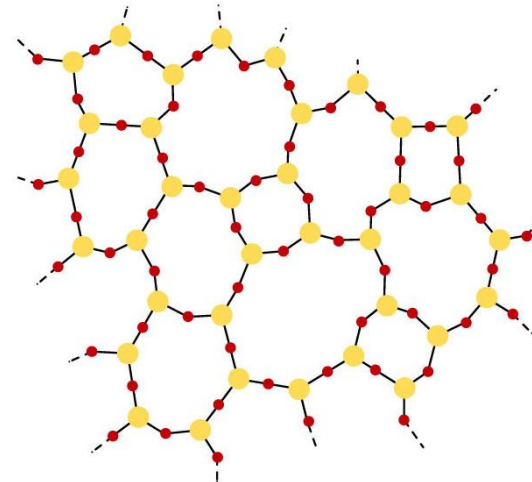
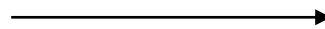
Kryształy

Struktura krystaliczna



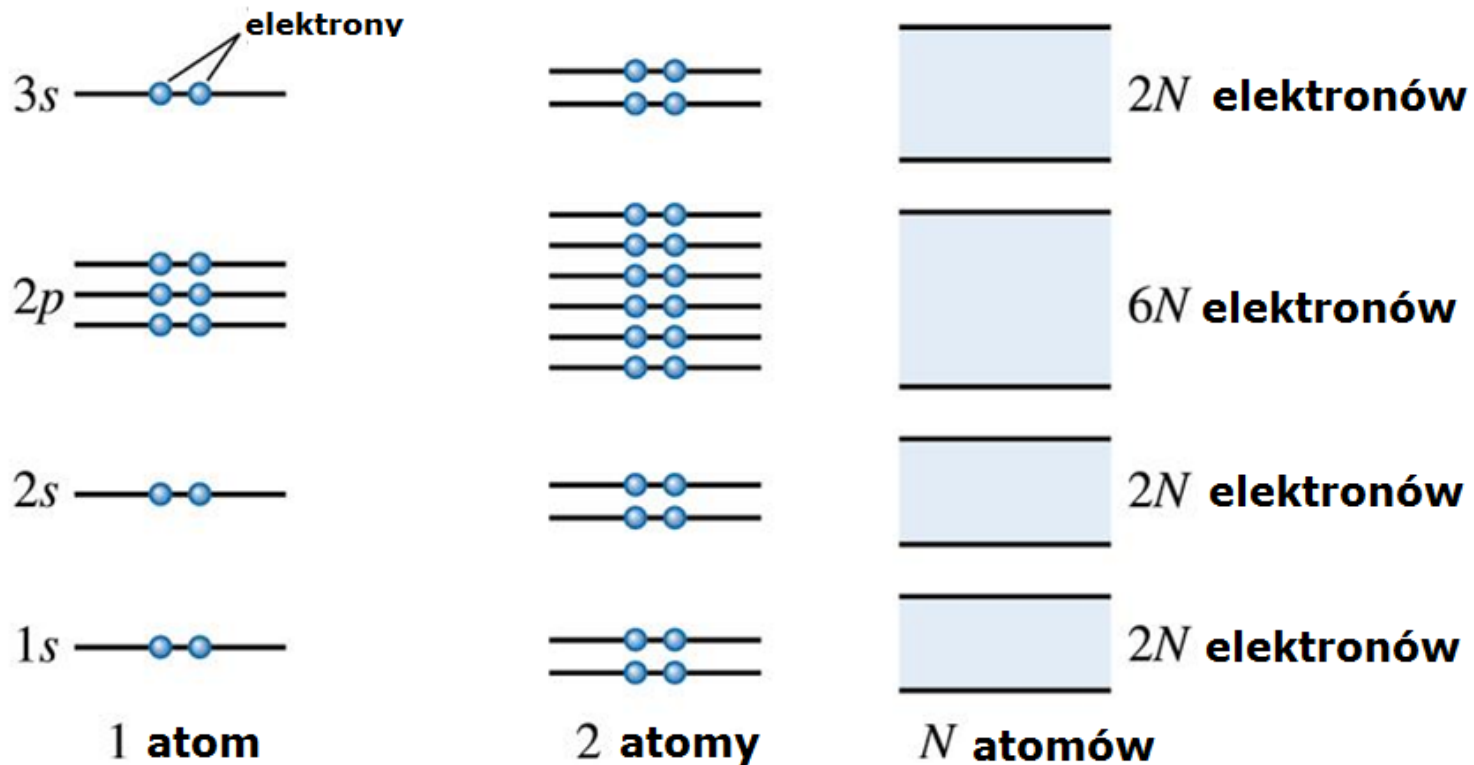
(a)

Struktura amorficzna



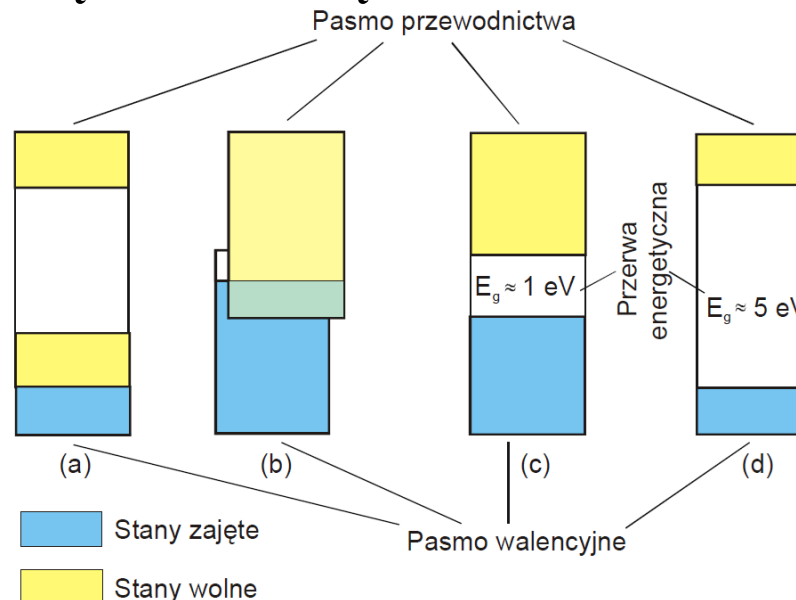
(b)

Rozszczepienie poziomów energet. w kryształe



Metale, izolatory, półprzewodniki

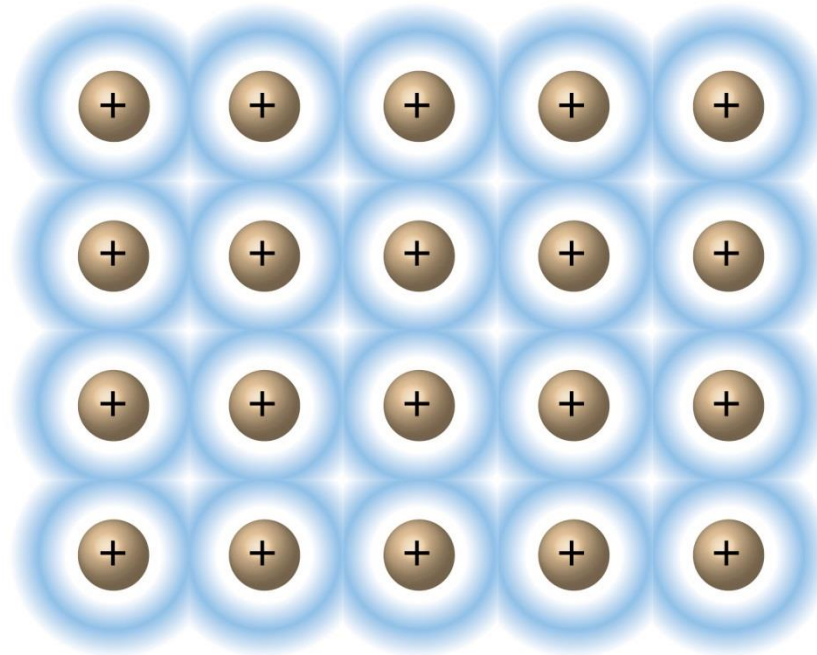
- Zbliżenie atomów w kryształach prowadzi do rozszczępienia poziomów energetycznych. Istotnemu rozszczępieniu ulegają stany elektronów walencyjnych.
- Rozszczępienie poziomów grupują się w pasma
- Najwyższe pasmo obsadzone elektronami w niemetalach nazywa się pasmem walencyjnym.
- Sąsiednie wyższe pasmo 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

Przewodniki

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



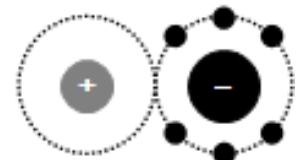
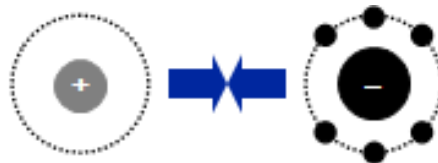
Półprzewodniki i izolatory

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

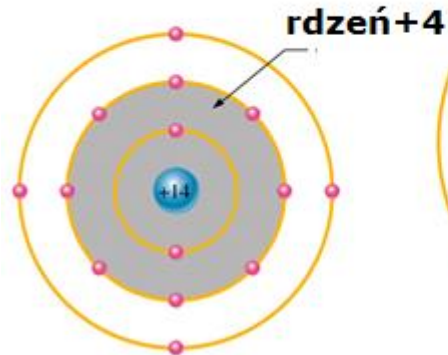


Półprzewodniki, przewodniki i izolatory

Porównanie atomu półprzewodnika i przewodnika

Atom Si:

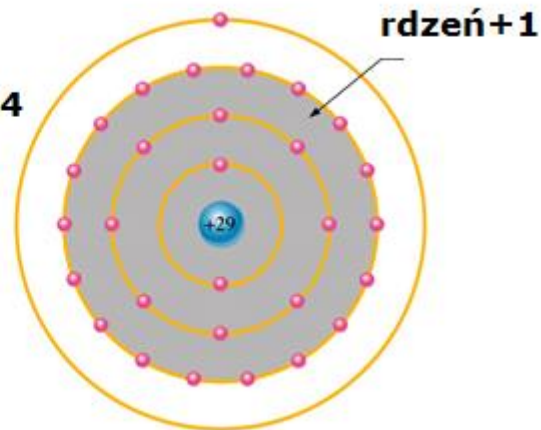
- 4 elektrony walencyjne
- półprzewodnik
- Konfiguracja elektronowa: 2:8:4



14 protonów
14 neutronów
10 elektronów na
powłokach
wewnętrznych

Atom Cu:

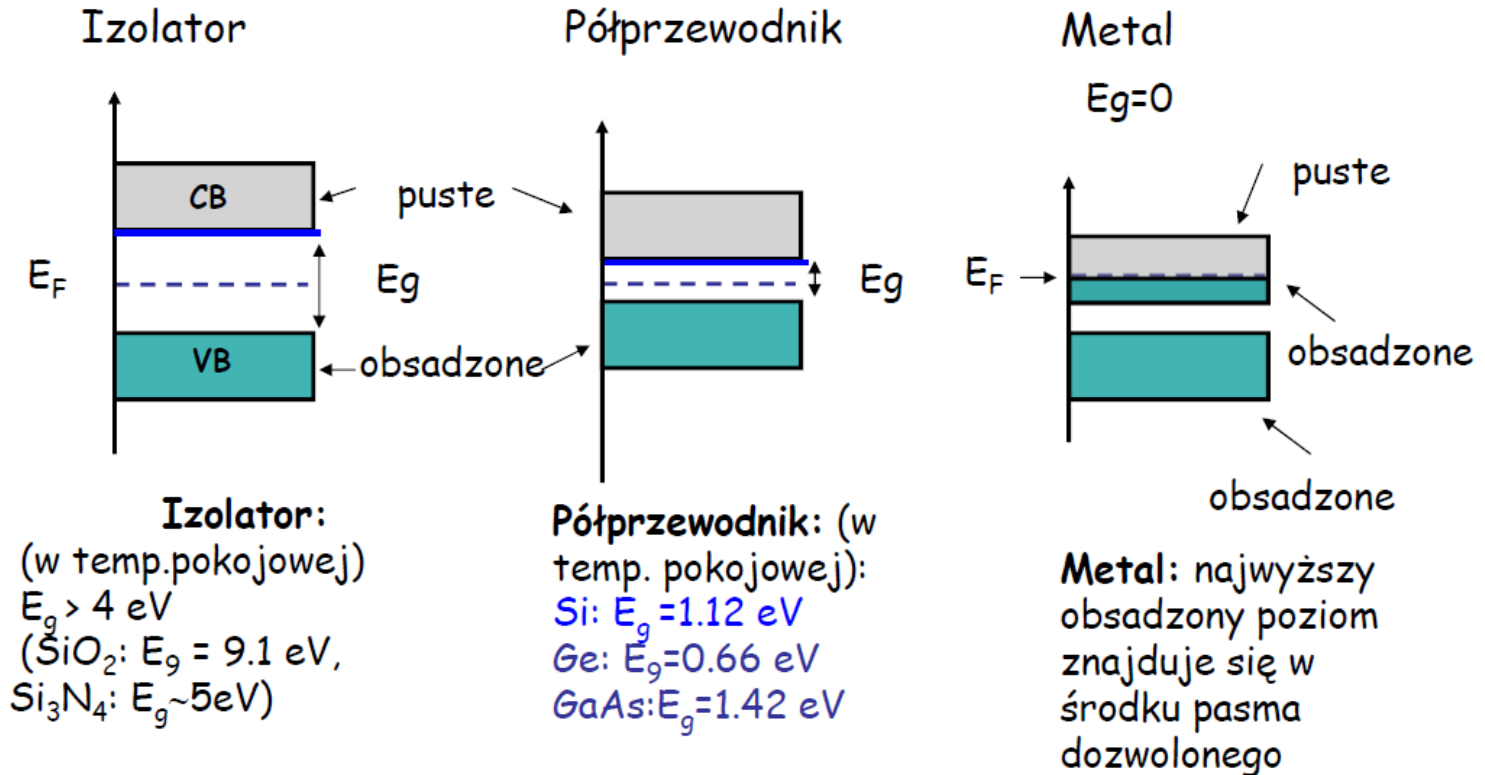
- Tylko 1 elektron walencyjny
- Dobry przewodnik
- Konfiguracja elektronowa: 2:8:18:1



29 protonów
29 neutronów
28 elektronów na
powłokach
wewnętrznych

Półprzewodniki, przewodniki i izolatory

Struktura pasmowa



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

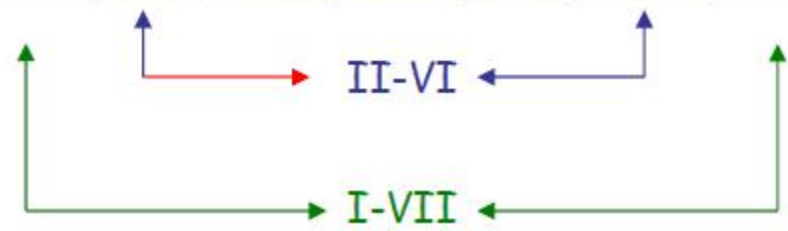
Półprzewodniki i związki półprzewodnikowe

			5	6	7	8	9	VIIIA
			III A	IV A	V A	VIA	VII A	2
			B	C	N	O	F	He
			10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	4.003
			13	14	15	16	17	10
			Al	Si	P	S	Cl	Ne
			26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	20.183
IB	IIB							18
29	30	31	32	33	34	35	36	Ar
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	39.948
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)	

Grupa III-V

Groupa II-VI

Grupa I-VII



Stała sieci, konfiguracja elektronowa i przerwa wzbroniona

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	

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

Material	Conductivity ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Superconductors	
Hg, Nb_3Sn , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 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

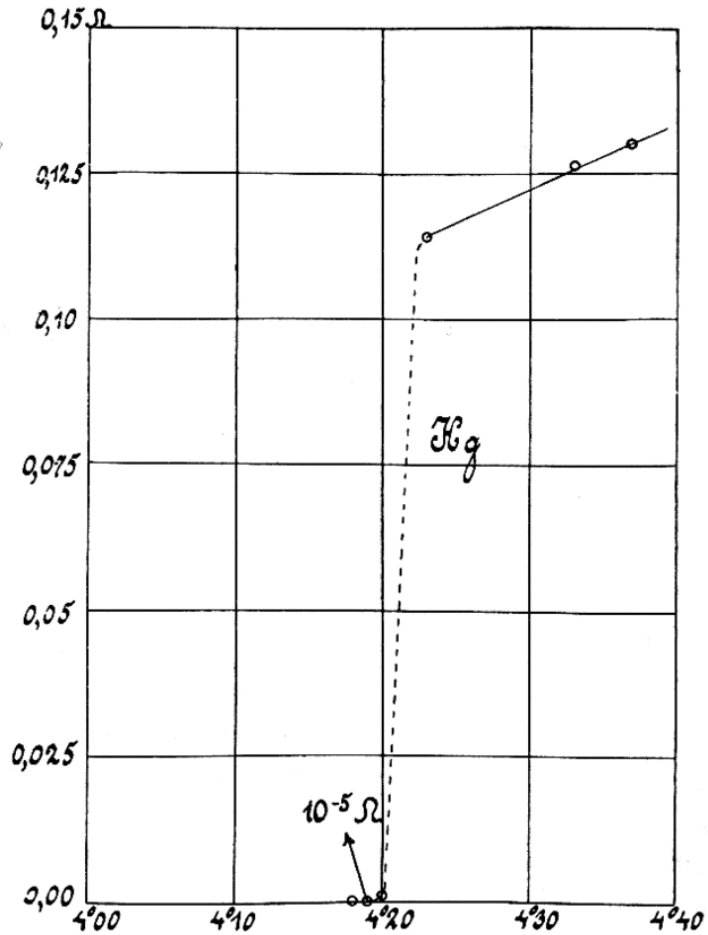
Material	Conductivity ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Semiconductors	
Group 4B elements:	
Si	5×10^{-6}
Ge	0.02
α -Sn	0.9×10^5
Compound semiconductors	
GaAs	2.5×10^{-9}
AlAs	0.1
SiC	10^{-10}
Ionic Conductors	
Indium tin oxide (<i>ITO</i>)	
Yttria-stabilized zirconia (<i>YSZ</i>)	
Insulators, 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.

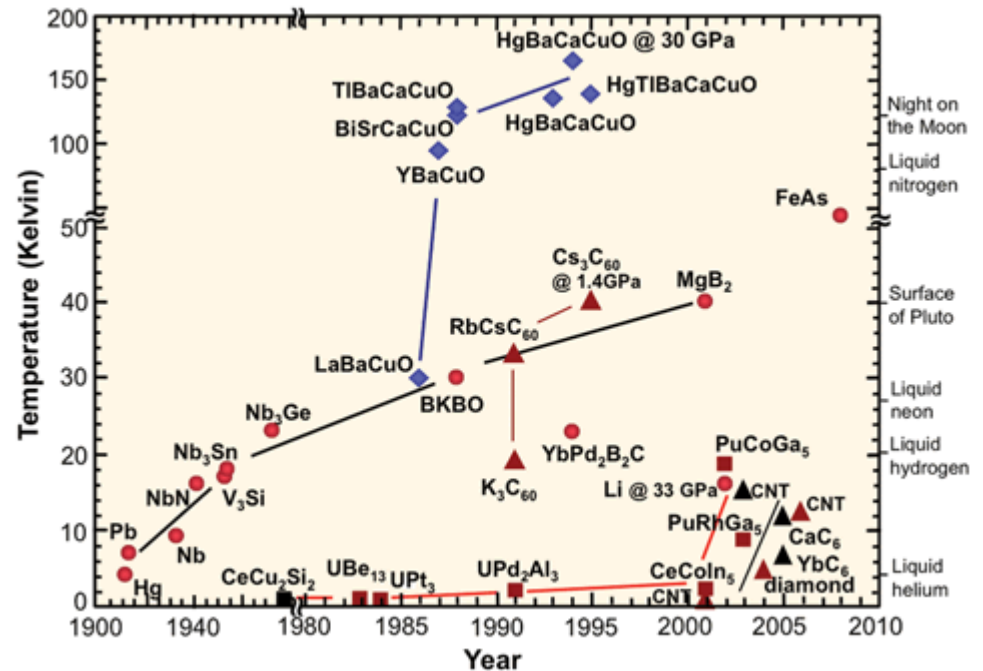
Zastosowanie półprzewodników

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

Nadprzewodniki nisko – i wysoko - temperaturowe



Kamerlingh Onnes 1911

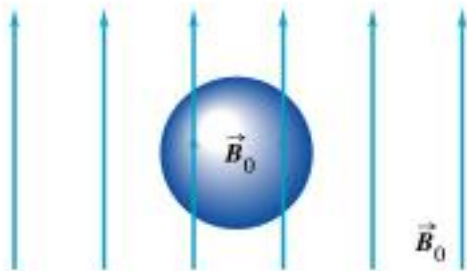


1957 teoria BCS J.Bardeen, L.Cooper,
J.Schrieffer (Nobel 1972)

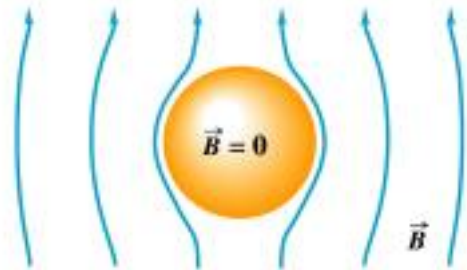
Efekt Meissnera



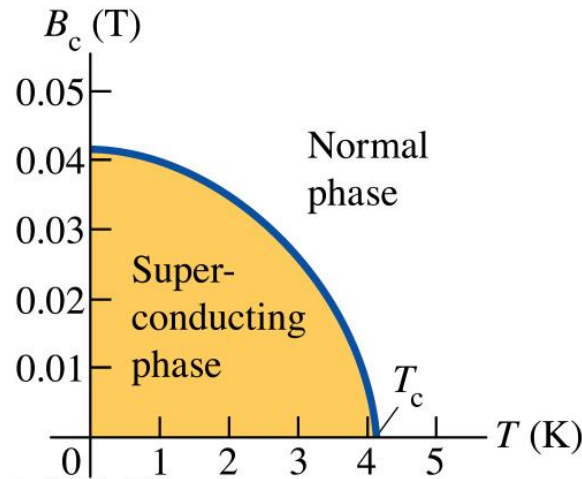
(a) No external magnetic field



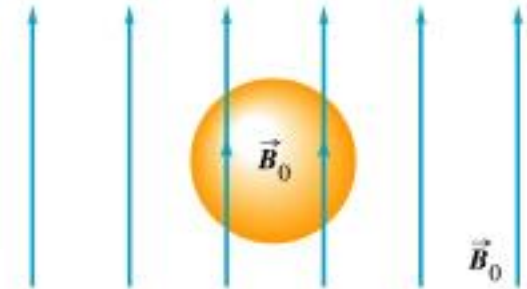
(b) Paramagnetic or diamagnetic sphere



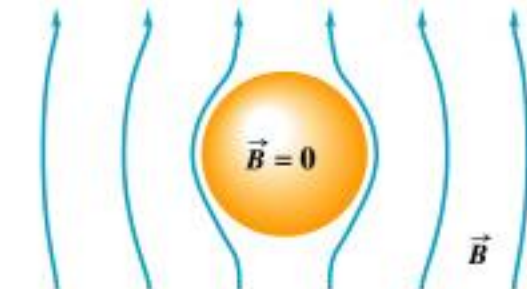
(c) Superconducting sphere



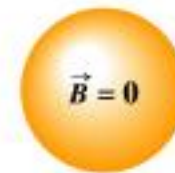
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.



(a) $T > T_c$



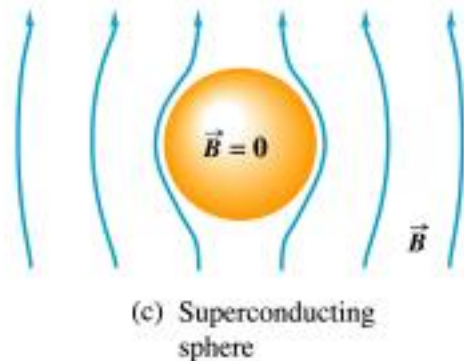
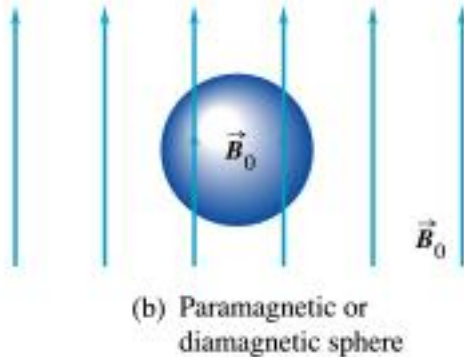
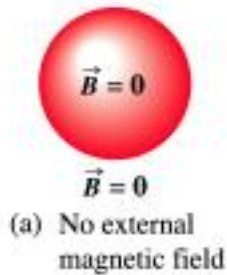
(b) $T < T_c$



(c) $T < T_c$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

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 przyciągnięcie.