

# Fizyka 3.3

prof.dr hab. Ewa Popko

<https://popko.wppt.pwr.edu.pl/>

[ewa.popko@pwr.edu.pl](mailto:ewa.popko@pwr.edu.pl)

p.231a

# Fizyka 3.3

## Literatura

1. Fizyka dla Szkół Wyższych t. 3, rozdział 9, wyd. Openstax  
<https://cnx.org/contents/u2KTPvIK@8.12:tyRWITJ7@2/Wst%C4%99p>
2. J.Hennel „Podstawy elektroniki półprzewodnikowej” wyd. WNT Warszawa 1995.
3. B. Ziętek, Optoelektronika, wyd. UMK, 2004
4. Materiały do wykładu, dostępne poprzez internet: <https://popko.wppt.pwr.edu.pl/>
5. E.Płaczek-Popko, „Fizyka odnawialnych źródeł energii” Skrypt DBC
- 6. 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. S.M.Sze „Physics of Semiconductor Devices” J.Wiley and Sons, NY 1981,  
dostępna wersja elektroniczna, e-książki, BG P.Wr.
3. M.Rusek, J.Pasierbiński “Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach” WNT Warszawa 1990

# Program kursu

W1	Studnia potencjału. Kwantowanie poziomów energetycznych. Elektron w atomie. Liczby kwantowe $n, l, m_l, m_s$ .	2
W2	Układy krystalograficzne. Wiązania chemiczne w ciałach stałych. Model elektronów swobodnych. Metale. Poziom Fermiego. Prawo Ohma. Przewodnictwo i ruchliwość.	2
W3	Model elektronów prawie swobodnych. Teoria pasmowa ciał stałych. Właściwości optyczne i elektryczne metali, izolatorów, półprzewodników	2
W4	Rodzaje półprzewodników. Elektrony i dziury w półprzewodnikach.	1
W5	Półprzewodniki samoistne i domieszkowe, z prostą i skośną przerwą wzbronioną.	2
W6	Złącza półprzewodnikowe: metal-półprzewodnik, złącze p-n i tranzystor bipolarny, hetero- i nanostruktury.	3
W7	Optoelektroniczne urządzenia półprzewodnikowe ( fotodetektor, bateria słoneczna, dioda LED i laser ). Tranzystory polowe JFET, MOSFET etc.. Urządzenia CCD.	2
W8	Test zaliczeniowy	1
	Suma godzin	15

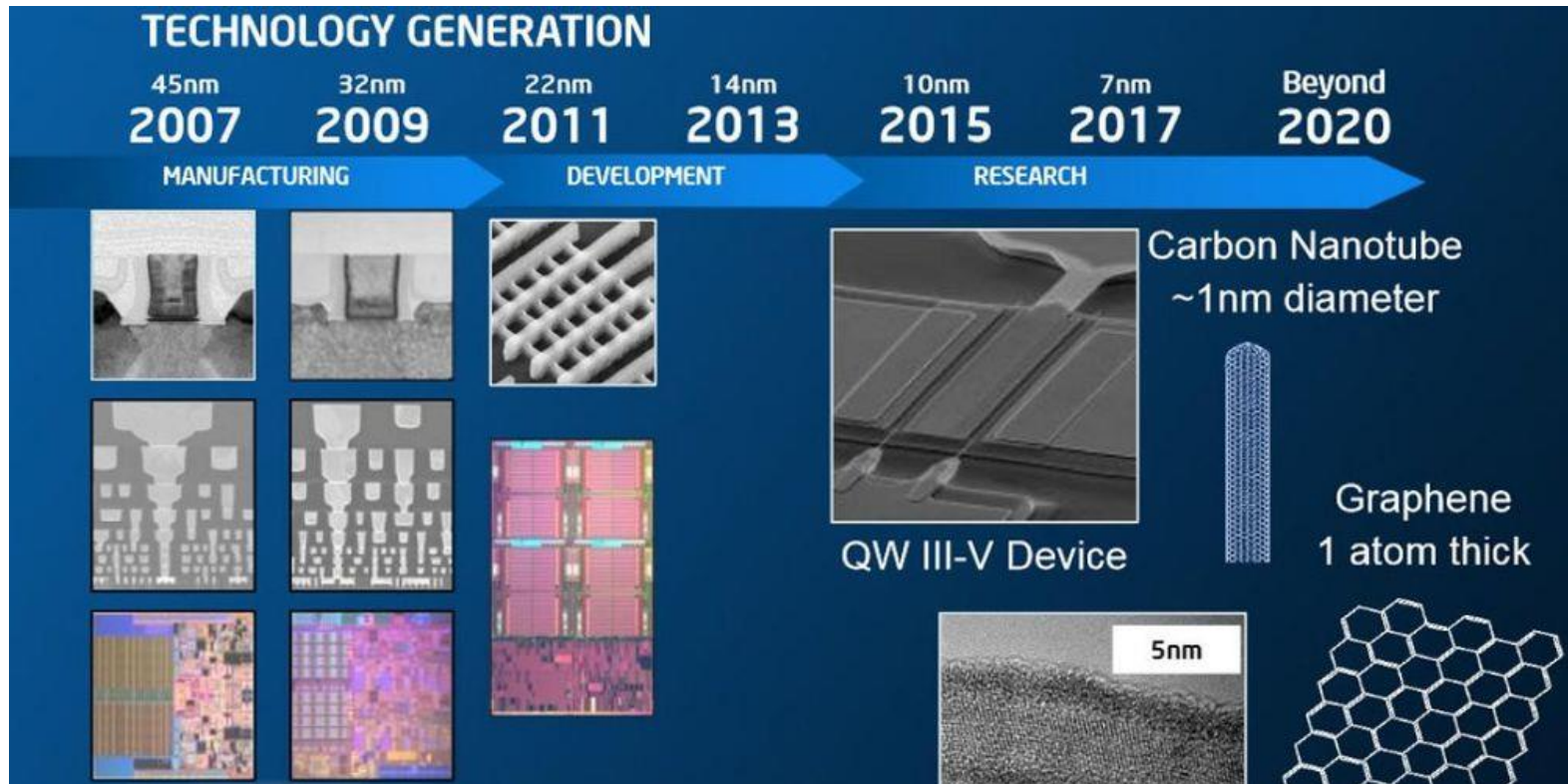
# Pierwszy tranzystor



John Bardeen, Walter Houser Brattain oraz William Bradford Shockley, za wynalazek tranzystora otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w 1956.

# Nanotechnologia

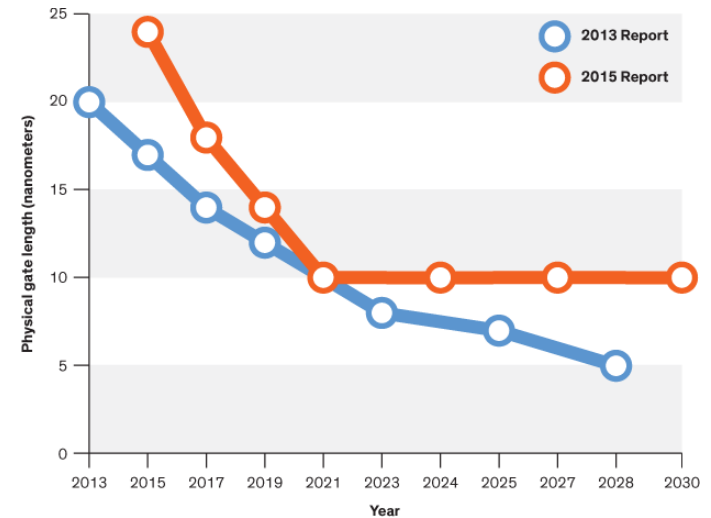
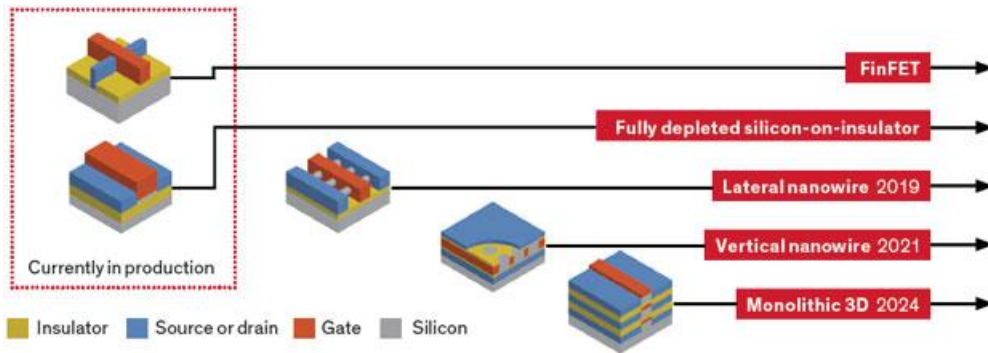
## Prognozy



Realia: w b.r. Intel, Samsung i in. zapowiedzieli realizację technologii 3/2nm.

# Miniaturyzacja

## *International Technology Roadmap for Semiconductors*

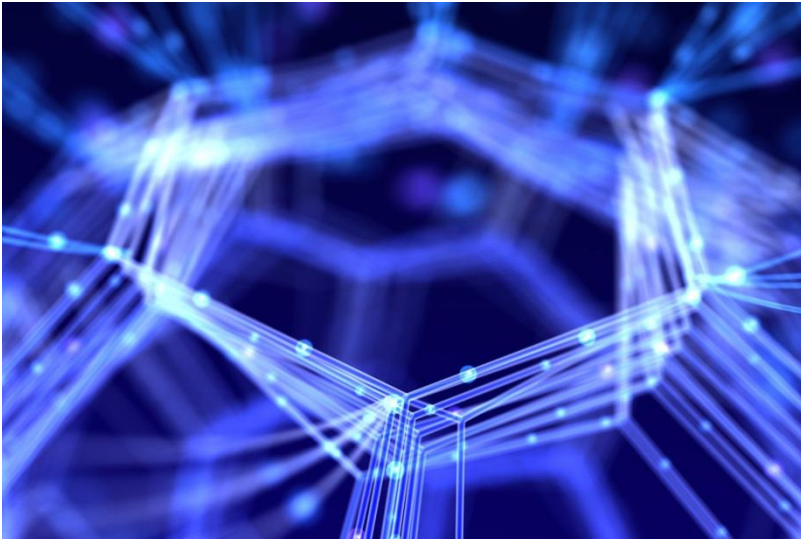


**Biorąc pod uwagę fizykę klasyczną, rozmiary bramki nie mogą zmniejszać się bez końca – granicę stanowi tutaj rozmiar atomów, a kolejnym ograniczeniem jest prędkość światła, wyznaczająca górną granicę dla prędkości przesyłania informacji.**

**Alternatywa – architektura 3d**

# 3D chip komputerowy

**W dzisiejszych układach scalonych układy pamięci (przechowujące dane) i układy logiczne (przetwarzające dane) są od siebie oddzielone. W trakcie wykonywania operacji, dane pokonują wielokrotnie drogę w obydwie strony.**



**Nowatorski pomysł Stanford University i Massachusetts Institute of Technology: trójwymiarowa architektura, (3D), w której nad krzemowym układem scalonym jest umieszczony chip zawierający tranzystory z nanorurek węglowych. Ta technologia jest możliwa dzięki znacznie niższej temperaturze osadzania warstw nanorurek węglowych (200 °C) w porównaniu do technologii krzemowej (>1000 °C).**

# Rodzaje ciał stałych

## Przewodnik

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

## Izolator

- materiał nie przewodzący prądu elektrycznego (np. szkło)

## Półprzewodnik

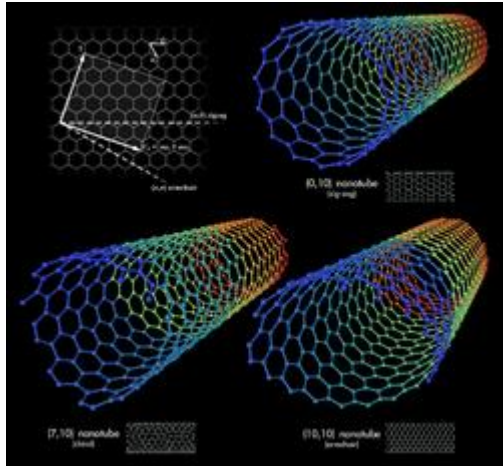
- materiał, który przewodzi prąd elektryczny lepiej niż izolator i gorzej niż przewodnik (Si, Ge)
- materiał, którym można łatwo manipulować aby był dobrym przewodnikiem
- w półprzewodnikach prąd elektryczny może polegać na ruchu elektronów (półprzewodnik typu n) lub „dziur” – ładunków dodatnich (półprzewodnik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



# Nowe materiały

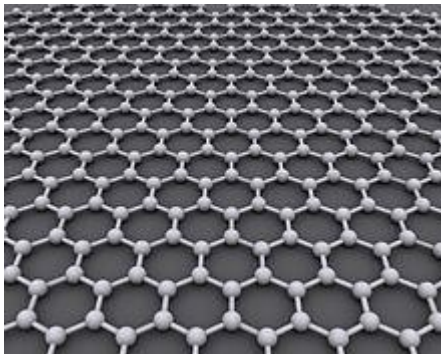
## Nanorurki węglowe.

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

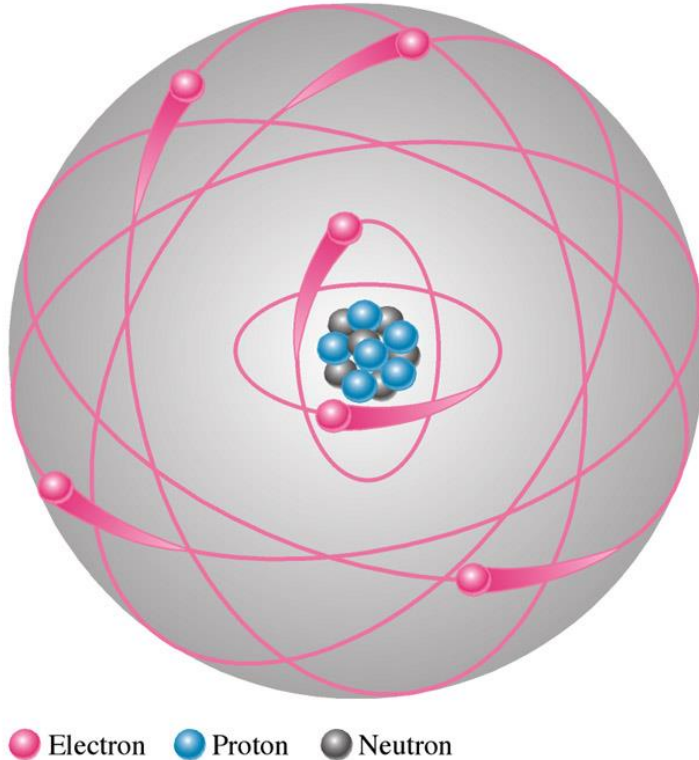


## Grafen

- 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

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

gdzie  $E_m, E_n$  oznaczają energie tych stanów.

- Moment pędu elektronu jest skwantowany

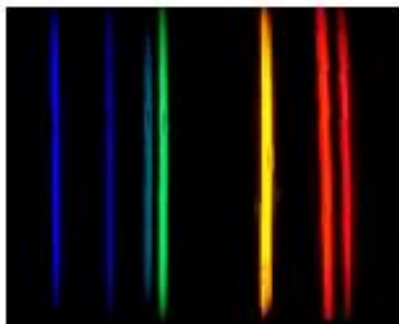
$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

# Atomu wodoru

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

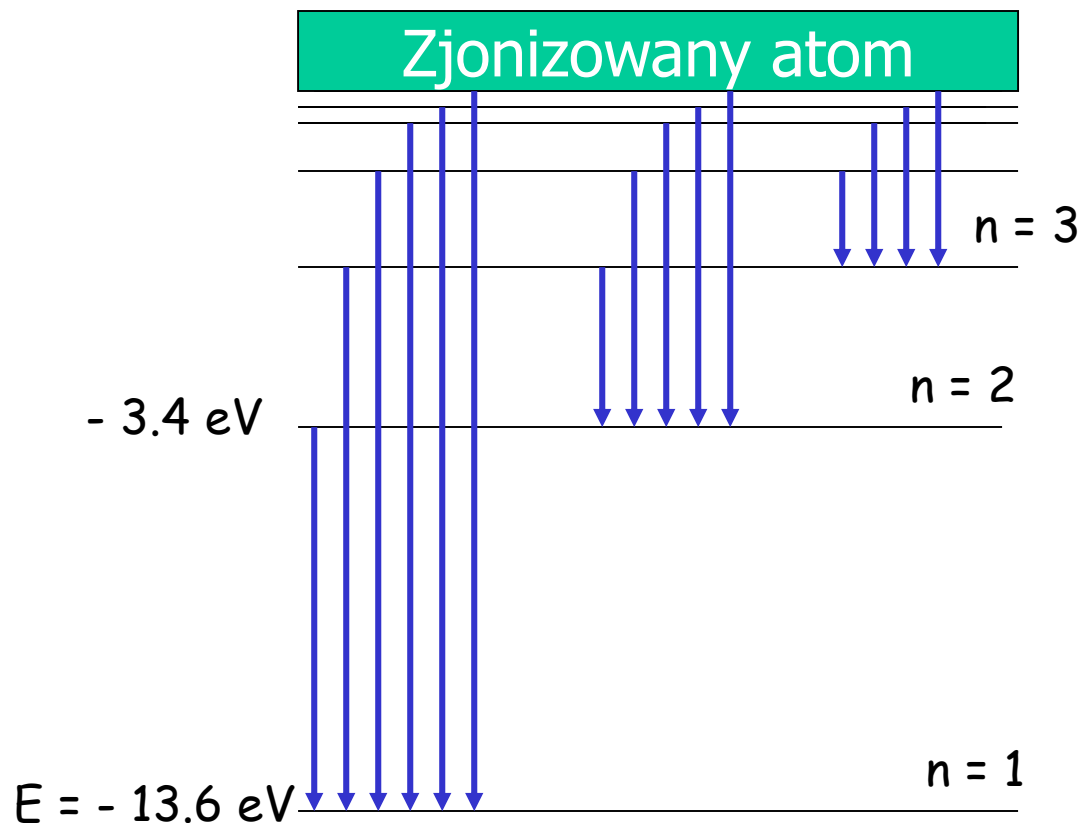
n- główna liczba kwantowa

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



1 2 3 4 5 6 7

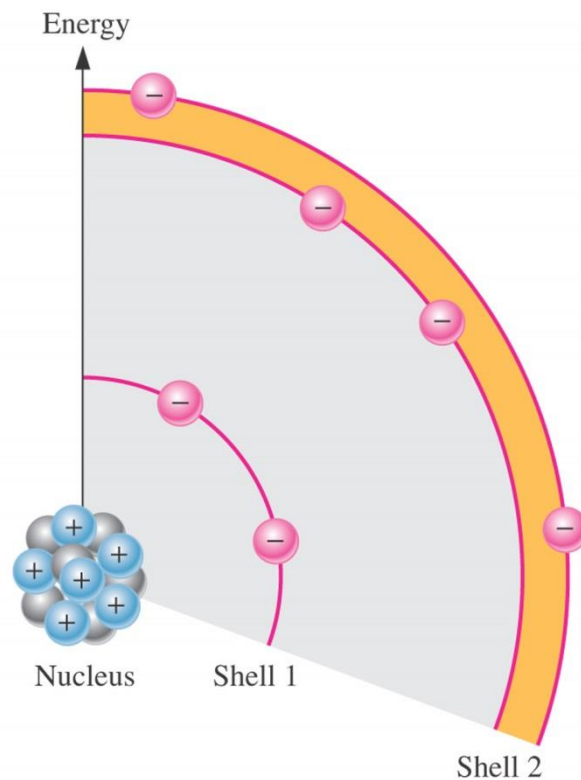
Widmo helu



# 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:

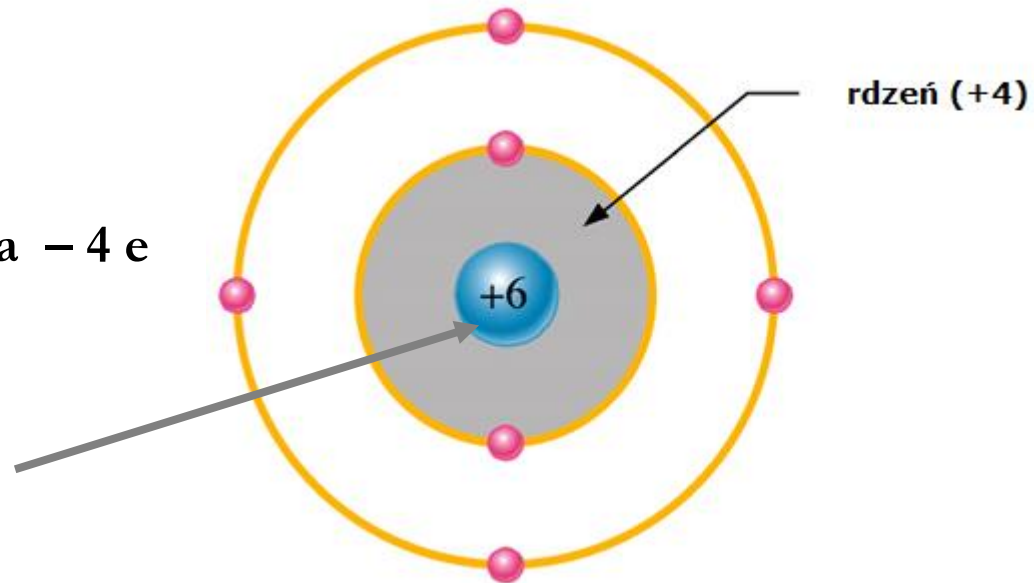
-powłoka walencyjna - 4 e

-wewnętrzna - 2 e

Jądro:

-6 protonów

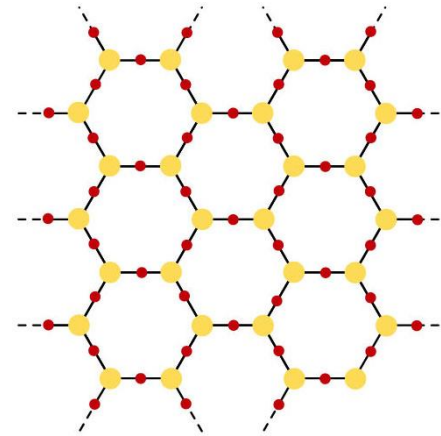
-6 neutronów



- O właściwościach atomu decydują elektrony walencyjne!

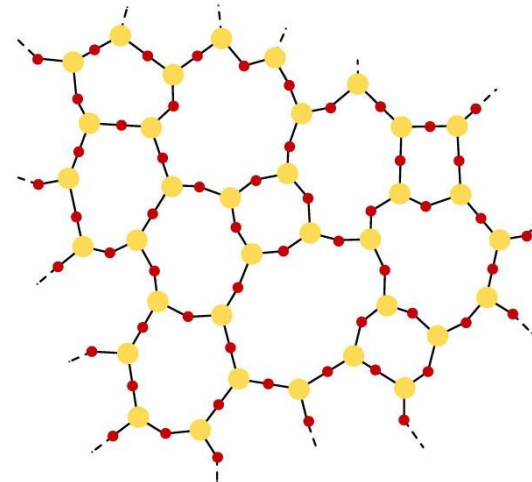
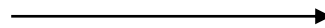
# Kryształy

Struktura krystaliczna



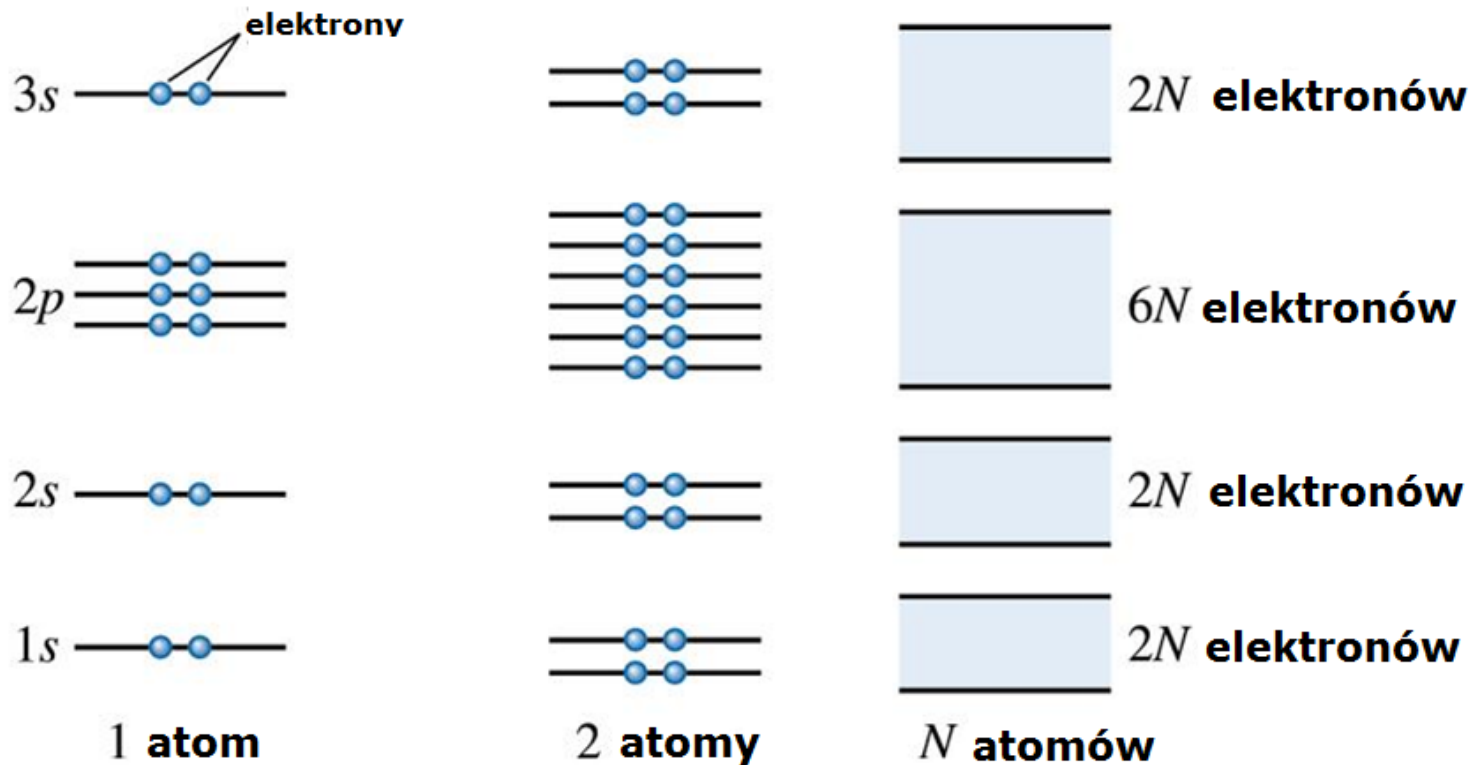
(a)

Struktura amorficzna



(b)

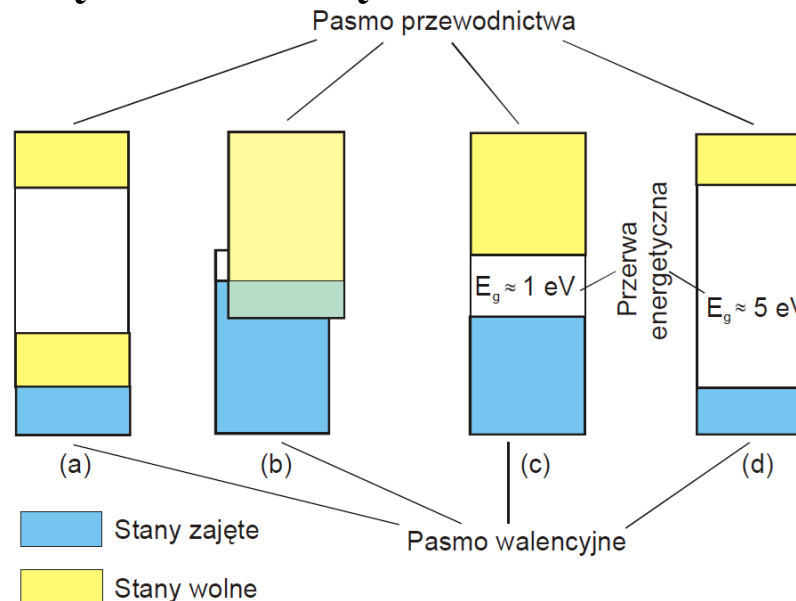
# Rozszczepienie poziomów energet. w kryształe





# Metale, izolatory, półprzewodniki

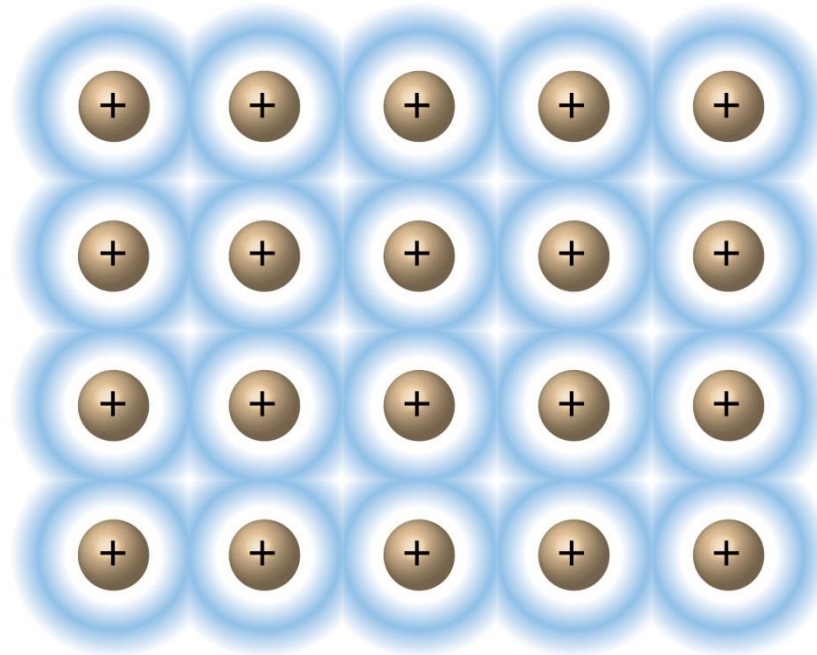
- Zbliżenie atomów w kryształach prowadzi do rozszczępienia poziomów energetycznych. Istotnemu rozszczępieniu ulegają stany elektronów walencyjnych.
- Rozszczępione poziomy grupują się w pasma
- Najwyższe pasmo obsadzone elektronami w niemetalach nazywa się pasmem walencyjnym.
- Sąsiednie wyższe pasmo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

# Przewodniki

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



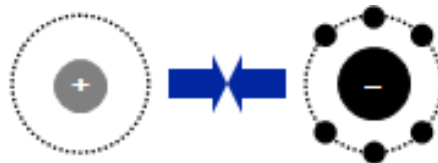
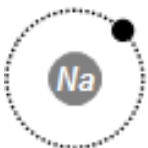
# Półprzewodniki i izolatory

## 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

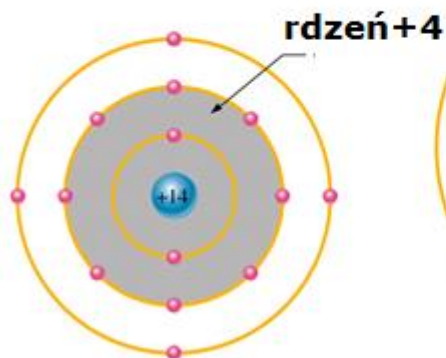


# Półprzewodniki, przewodniki i izolatory

## Porównanie atomu półprzewodnika i przewodnika

### Atom Si:

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



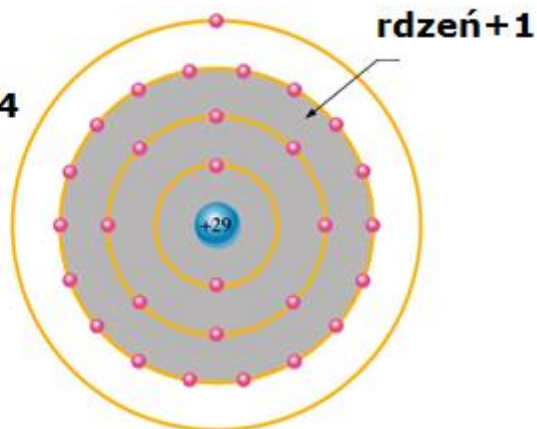
14 protonów

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

# 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**