

Fizyka 3.3 - wykład

dr inż. Eunika Zielony

Kontakt: eunika.zielony@pwr.edu.pl

p. 231a, bud. A-1

WYKŁADY: <https://zielony.wppt.pwr.edu.pl/>

TERMINY WYKŁADÓW

Kalendarz akademicki 2025/2026 – semestr zimowy

	PAŹDZIERNIK					LISTOPAD				GRUDZIEŃ					STYCZEŃ				LUTY			
PN		6	13	20	27	3	10 Wt/N	17 Pn/N	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	2 Pn/P	9	16	23
WT		7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	3	10	17	24
ŚR	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7 Pn/N	14	21	28	4	11	18	25
CZ	2	9	16	23	30	6	13 Pt/N	20	27	4	11	18 Cz/N	25	1	8	15	22	29	5	12	19	26
PT	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19 Pt/N	26	2	9	16	23	30	6	13	20	27
SO	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	31	7	14	21	28
N	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	1	8	15	22	1
P - PARZYSTY N - NIEPARZYSTY	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P

Dnia **02-go października** zajęcia rozpoczynają się o **09:15** i trwają tylko 1 godz. lekcyjną!

29. 01. 2026 – kolokwium !!!

Poprawa kolokwium – termin do ustalenia

Program kursu

1. Liczba godzin w semestrze: 15 godz.
2. Liczba punktów ECTS: 1

W1	Wprowadzenie. Budowa atomu. Studnia potencjału. Kwantowanie poziomów energetycznych. Elektron w atomie. Liczby kwantowe.	2
W2	Układy krystalograficzne. Wiązania chemiczne w ciałach stałych. Metale. Poziom Fermiego. Prawo Ohma. Przewodnictwo i ruchliwość.	2
W3	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..	2
W8	Test zaliczeniowy	1
	Suma godzin	15

Fizyka 3.3 – materiały do wykładu

Literatura obowiązkowa

1. Fizyka dla Szkół Wyższych t. 3, rozdział 9, wyd. Openstax
<https://cnx.org/contents/u2KTPvIK@8.12:tyRWlTJ7@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**
- 5. S. Kuta „Elementy i układy elektroniczne” Wyd. AGH, wyd. I 2000**

Literatura uzupełniająca

1. D.A. Neamen „Semiconductor Physics and Devices”, ed. Mc Graw-Hill, 2012
2. S.M. Sze „Physics of Semiconductor Devices” J. Wiley and Sons, NY 1981
dostępna wersja elektroniczna, e-książki, BG PWr
3. M. Rusek, J. Pasierbiński “Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach” WNT Warszawa 1990

Zaczynamy!



WYKŁAD 1

Wprowadzenie. Klasyfikacja ciał stałych (metale, półprzewodniki, izolatory). Budowa atomu. Budowa ciał stałych. Wiązania chemiczne. Pasma.

Rozwój technologii obwodów scalonych



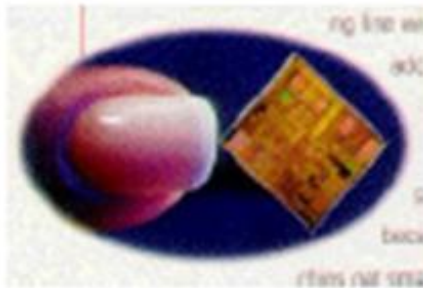
Pierwsze obwody scalone Texas Instruments
kilka tranzystorów



Jack Kilby



Nagroda Nobla
z Fizyki w 2000 r.



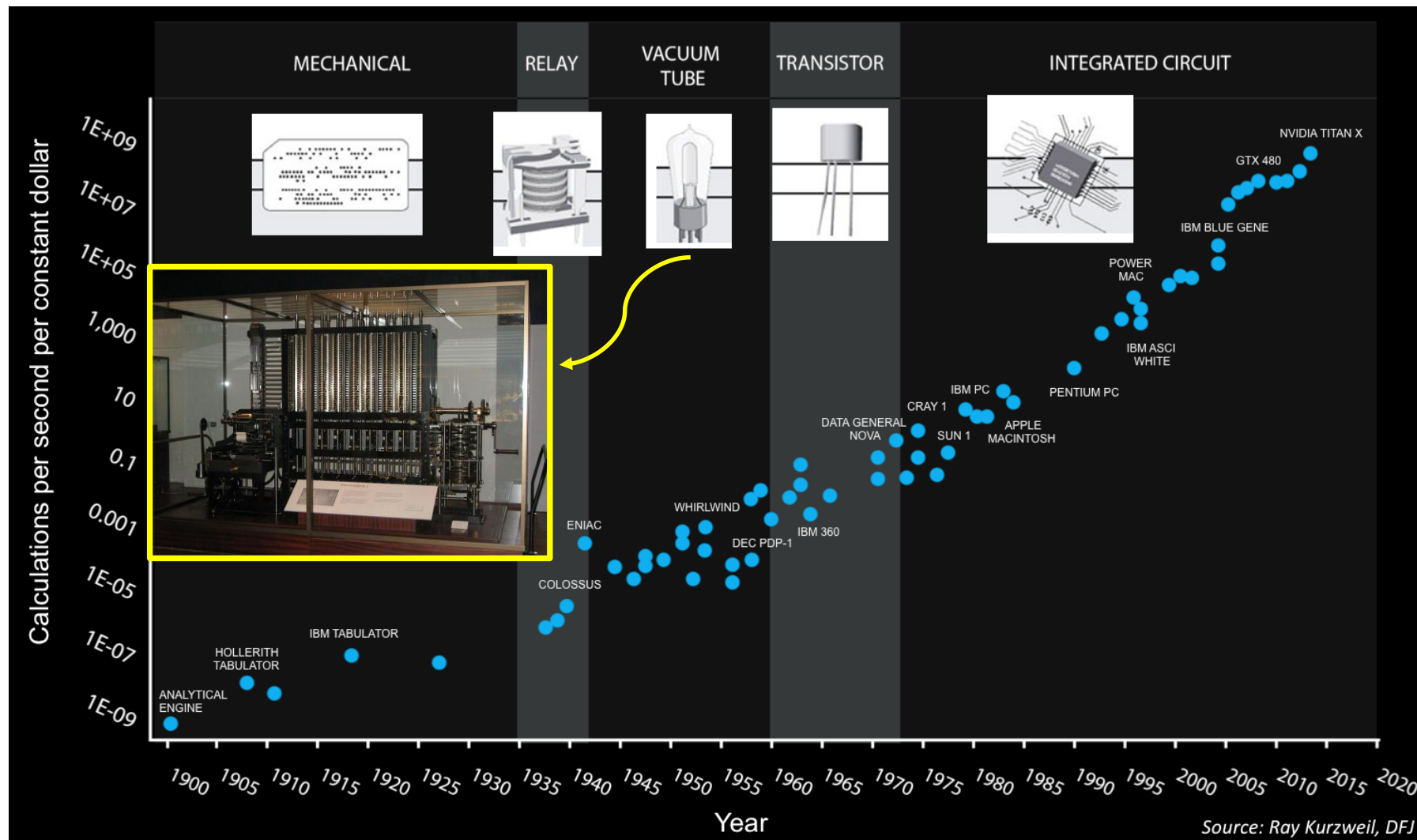
Procesor Pentium
Kilka milionów tranzystorów

Wielkość chipu prawie
bez zmian

➔ **MINIATURYZACJA!!!**

Miniaturyzacja osiągalna dzięki **Nanotechnologii !**

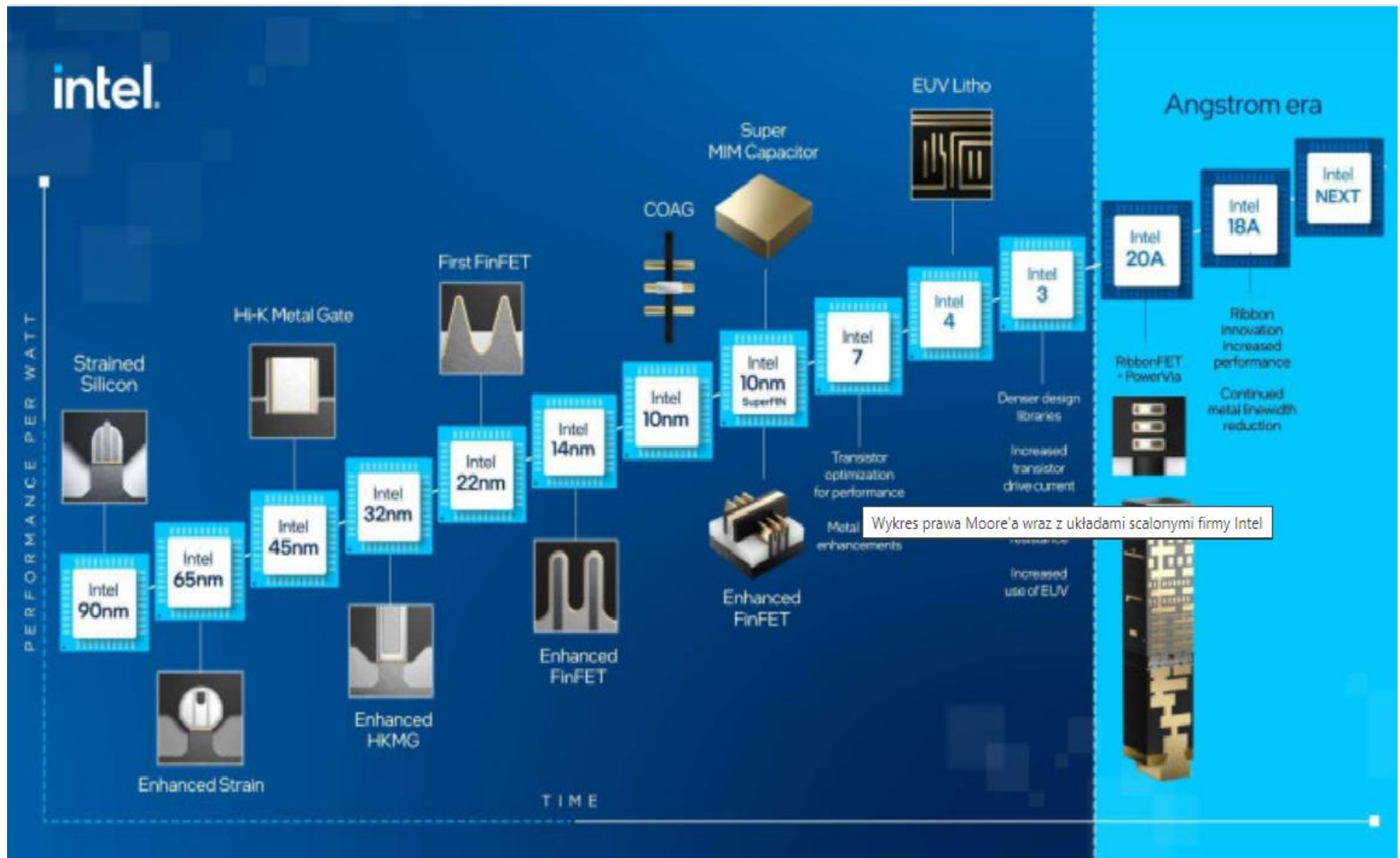
Prawo Moore'a – prawo empiryczne, wynikające z obserwacji, że optymalna liczba tranzystorów w układzie scalonym zwiększa się w kolejnych latach zgodnie z trendem wykładniczym



Miniaturowe układy półprzewodnikowe są konstruowane w celu zwiększenia szybkości obliczeń oraz pojemności pamięci komputerowych.

Prawo Moore'a – schyłek lat 90-tych i dalej

Aspiring to
1 Trillion
transistors in 2030



Trendy: prawo Moore'a



IBM PC (1981); 4,77 MHz



Osborne 1 (1981); 10.7 kg



SEKTOR
3.0

Psion organizer
(1984)



ODYSSEY

Magnavox Odyssey game
console (1974)



Apple Newton
(1993)

Trendy: prawo Moore'a



Macbook Air (2008)



Sony PlayStation 3 (2006)



Apple iPad (2010)

Klasyfikacja materiałów



Przewodniki

miedź



Półprzewodniki

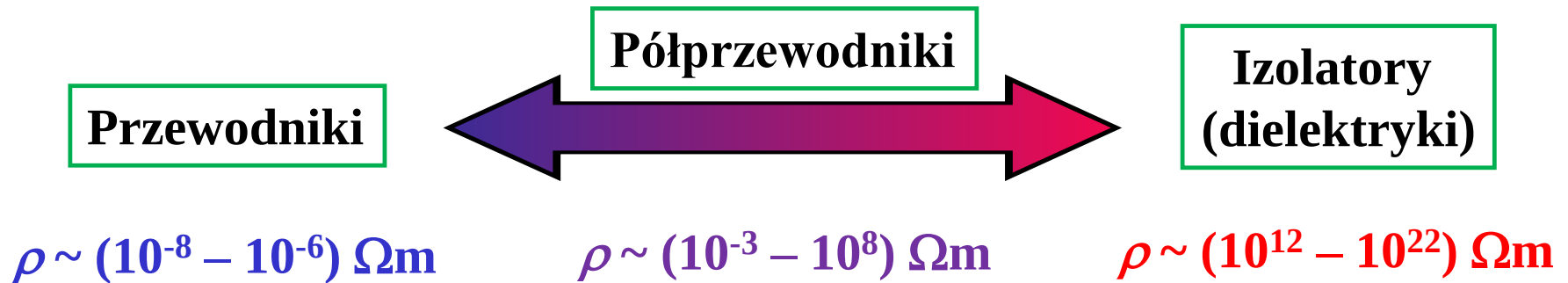
krzem



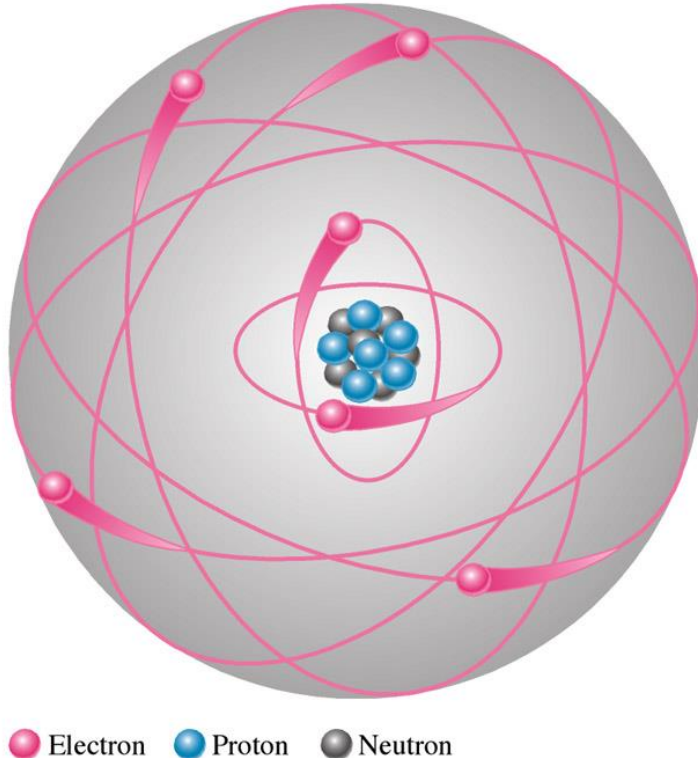
Izolatory

diament

Klasyfikacja materiałów – opór właściwy (ρ)



Model atomu Bohra



Niels Bohr - 1915

- **elektrony krążą wokół jądra**
- **jądro jest zbudowane z:**
 - i) dodatnich protonów**
 - ii) obojętnych neutronów**
(nie ma ładunku elektrycznego)

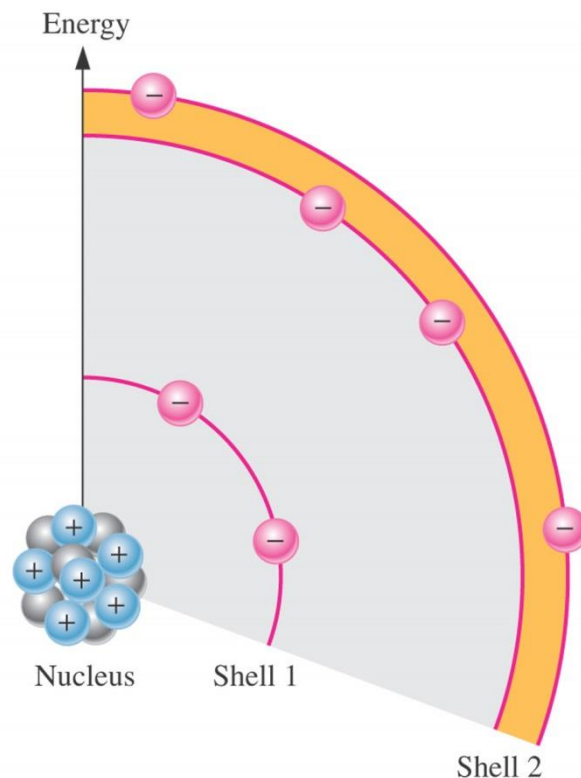
Liczba atomowa = liczbie protonów w jądrze

Kolejność atomów w tablicy układu okresowego wynika z liczby atomowej

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

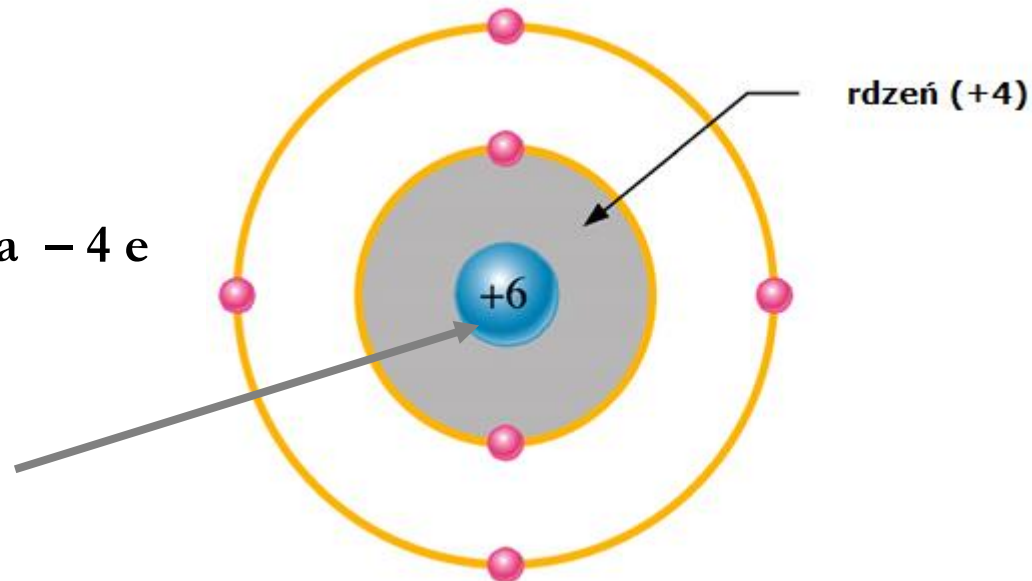
- Atom może być przedstawiony jako powłoka walencyjna i rdzeń
- Rdzeń składa się z wewnętrznych powłok i jądra

Atom węgla:

-powłoka walencyjna – 4 e
-wewnętrzna – 2 e

Jądro:

-6 protonów
-6 neutronów



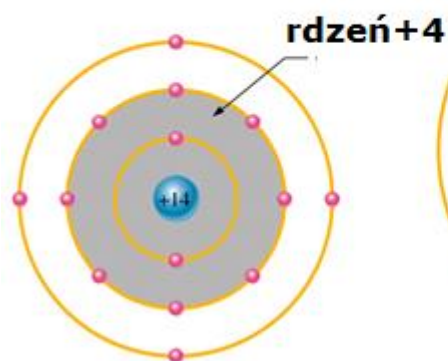
- O właściwościach atomu decydują elektrony walencyjne!

Budowa atomowa – półprzewodnik vs metal

Porównanie atomu półprzewodnika i przewodnika

Atom Si:

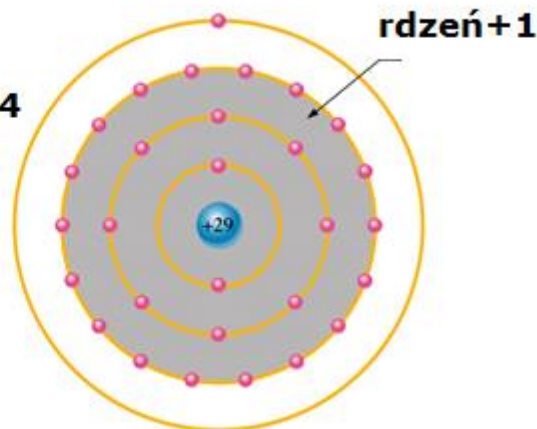
- 4 elektrony walencyjne
- półprzewodnik
- Konfiguracja elektronowa: 2:8:4



14 protonów
14 neutronów
10 elektronów na
powłokach
wewnętrznych

Atom Cu:

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



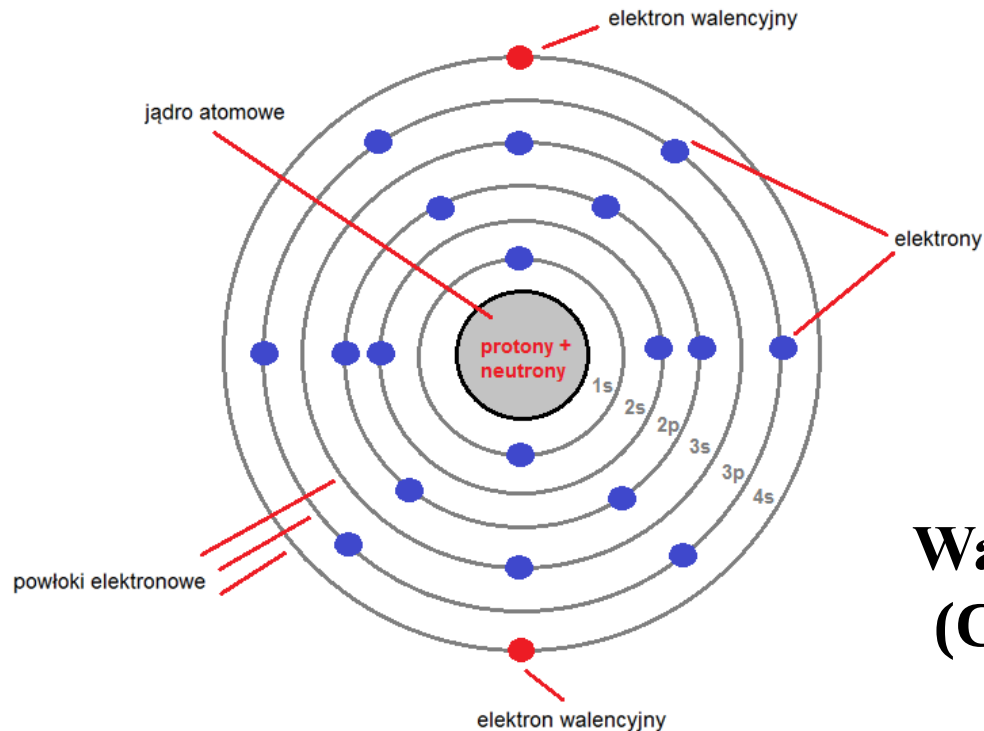
29 protonów
29 neutronów
28 elektronów na
powłokach
wewnętrznych

Model orbitalny atomu

W modelu orbitalnym, atom składa się z:

- jądra atomowego (o ładunku „+”)
- powłok elektronowych (orbitali), po których „krążą” elektrony

Ca: Liczba atomowa: 20
konfiguracja elektronowa:
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$

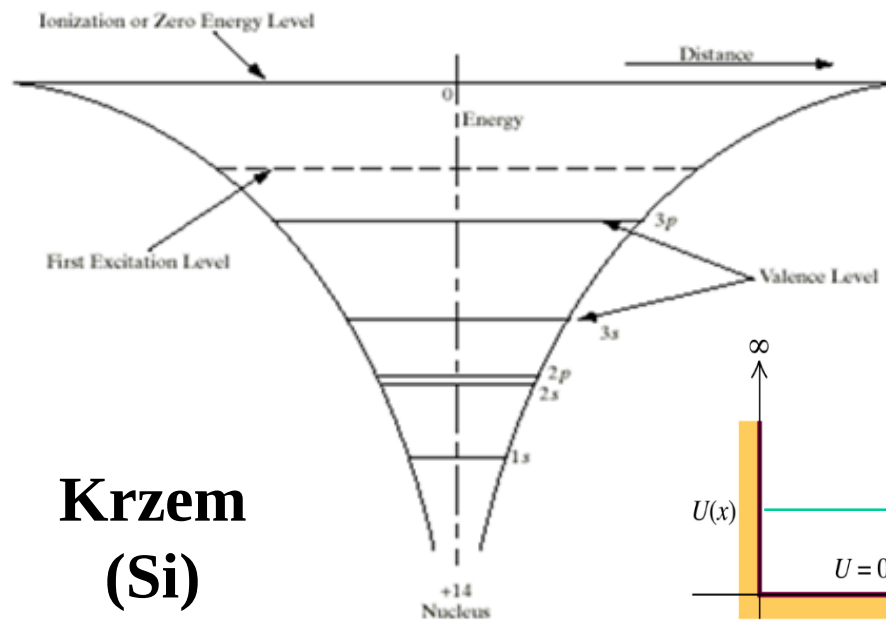


**Wapń
(Ca)**

Atom jako studnia potencjału

Każdy izolowany atom scharakteryzować można za pomocą „jamy potencjału”, w której znajduje się szereg dyskretnych poziomów energetycznych (1s, 2s, 2p...) obsadzonych przez elektrony.

Si: Liczba atomowa: 14
konfiguracja elektronowa:
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$



**Krzem
(Si)**

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
- Energia promieniowania jest dana wzorem:

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

gdzie E_m, E_n oznaczają energie orbit (stanów) pomiędzy którymi przechodzą elektrony.

- Moment pędu elektronu jest skwantowany

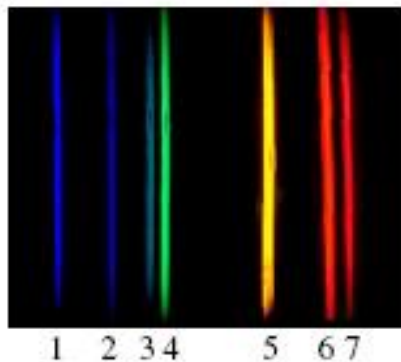
$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

Atom wodoru

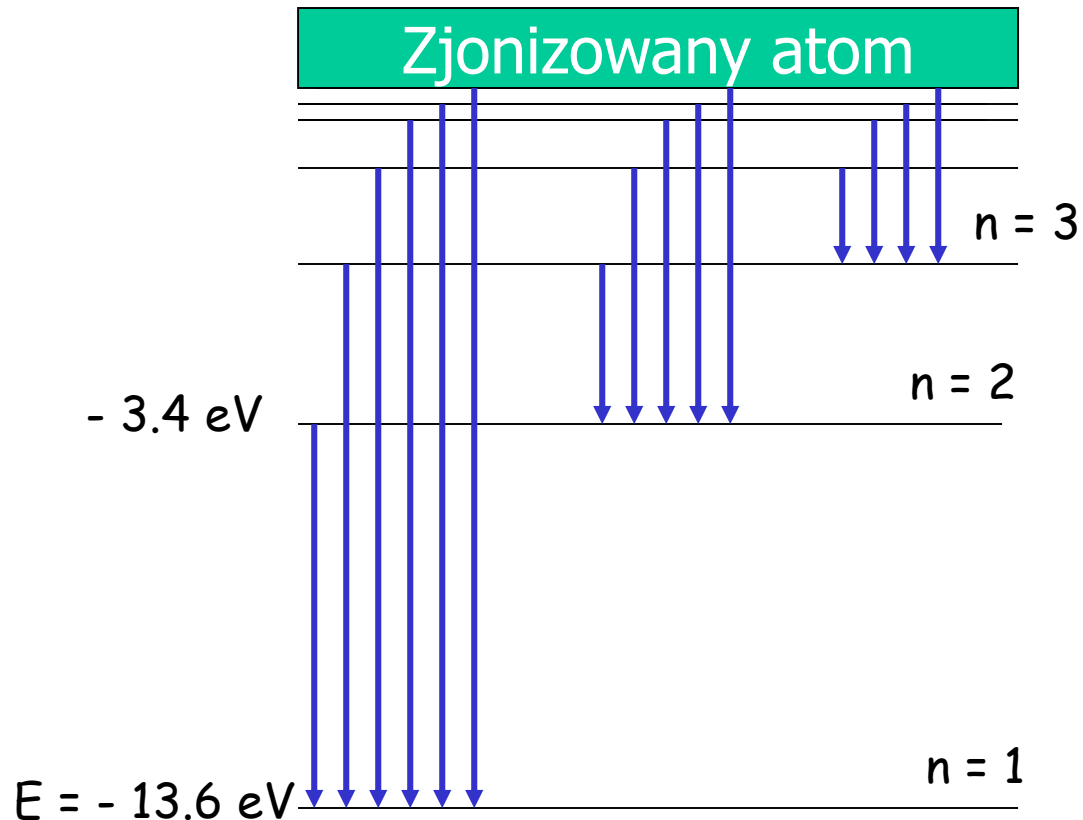
$$E_n = -13.6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

n- główna liczba kwantowa

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



Widmo helu



Właściwości ciał stałych

O właściwościach ciał stałych decyduje:

- **Budowa ciała stałego (struktura krystaliczna lub amorficzna)**
- **Typ wiązania chemicznego (metaliczne, kowalencyjne, jonowe)**
- **Struktura pasmowa (ułożenie pasm energetycznych)**

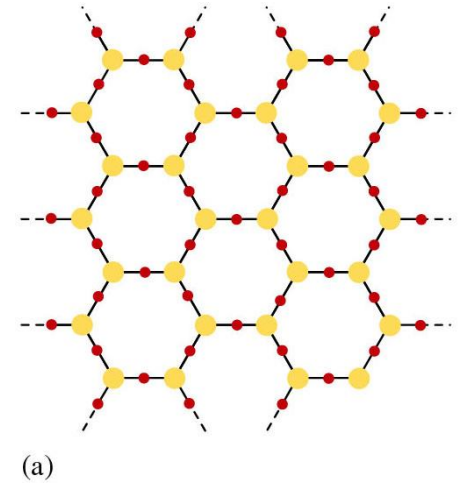
Dzięki temu ciała stałe dzielimy na 3 grupy: metale, półprzewodniki i izolatory.

Ciała stałe można podzielić na:

- **Amorficzne** - brak uporządkowania atomów/cząsteczek, np. szkła, ciecze, smoła, wosk;
- **Krystaliczne** - o uporządkowanym ułożeniu atomów lub molekuł tworzących sieć krystaliczną, np. półprzewodniki, metale.

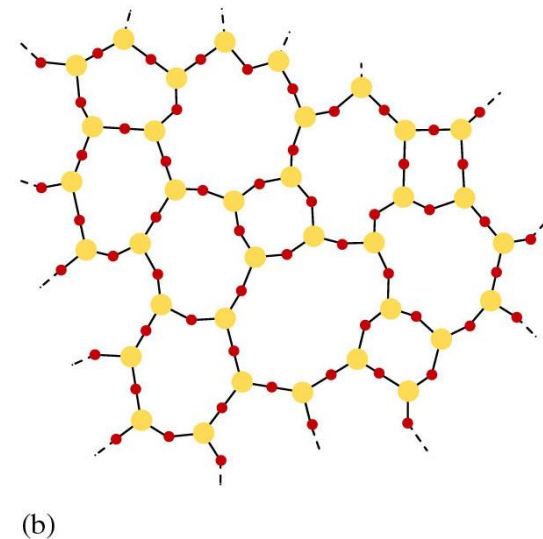
Struktura krystaliczna →

Kryształ - uporządkowanie atomów -
dalekozasięgowe



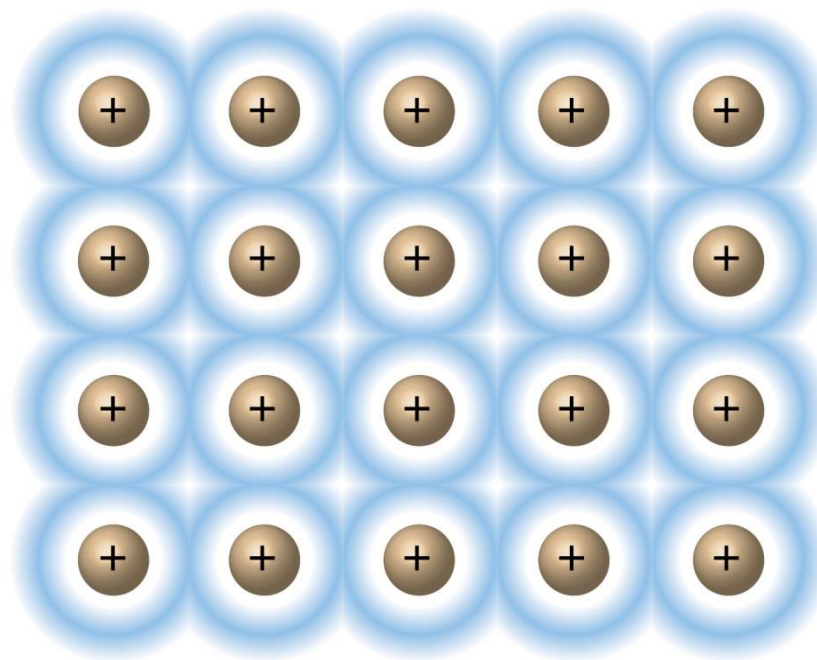
Struktura amorficzna →

Uporządkowanie atomów
bliskozasięgowe



Wiązania chemiczne - przewodniki

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



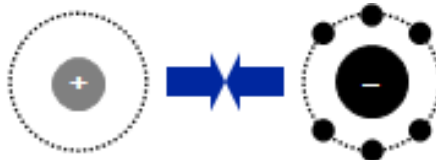
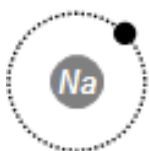
Wiązania chemiczne – półprzewodniki i izolatory

Półprzewodnik

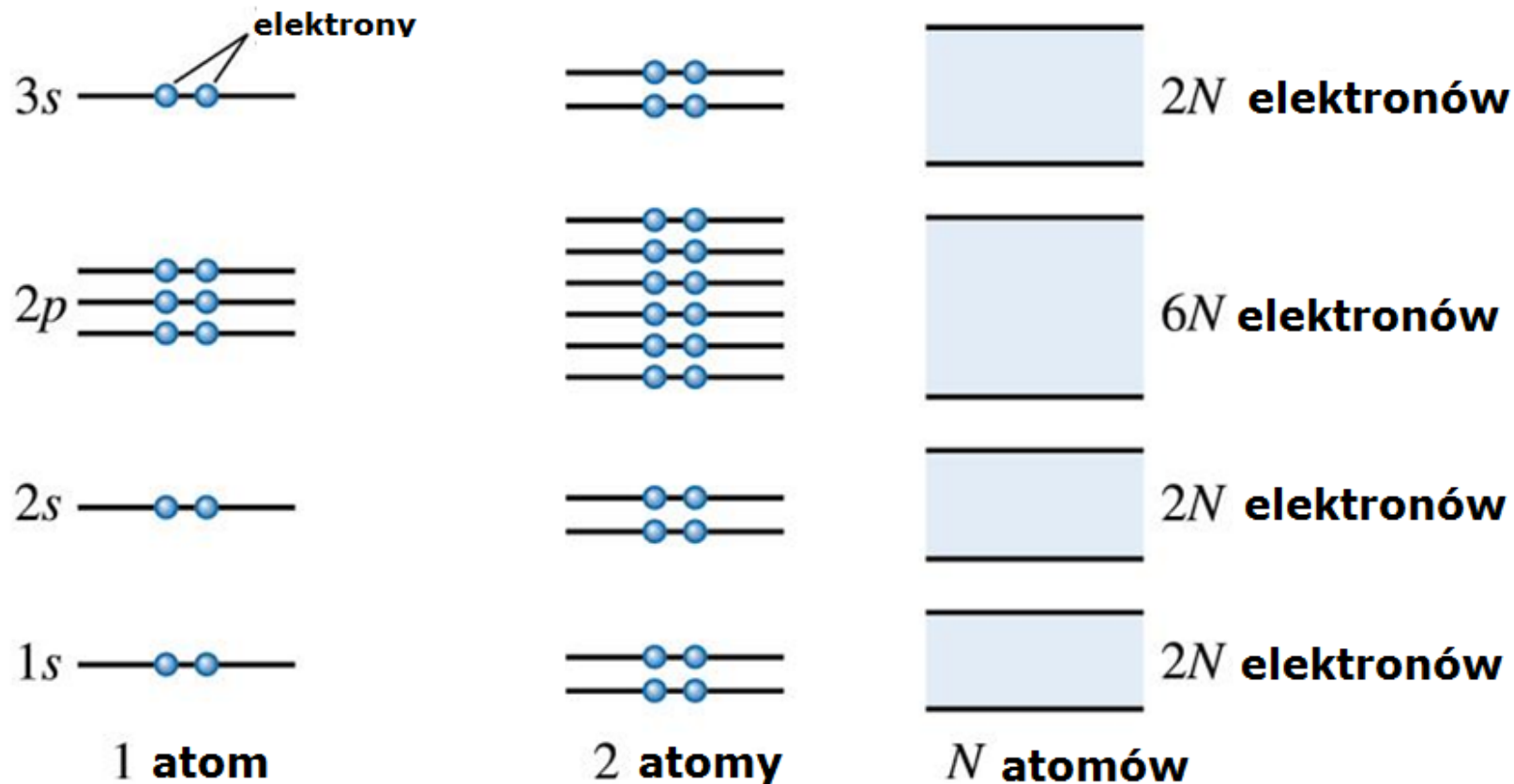
- materiał, który przewodzi prąd elektryczny lepiej niż izolator i gorzej niż przewodnik
- powszechnie używane półprzewodniki: krzem (Si), german (Ge)
- te półprzewodniki posiadają 4 elektrony walencyjne → dlatego półprzewodniki mają wiązanie kowalencyjne

Izolator

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



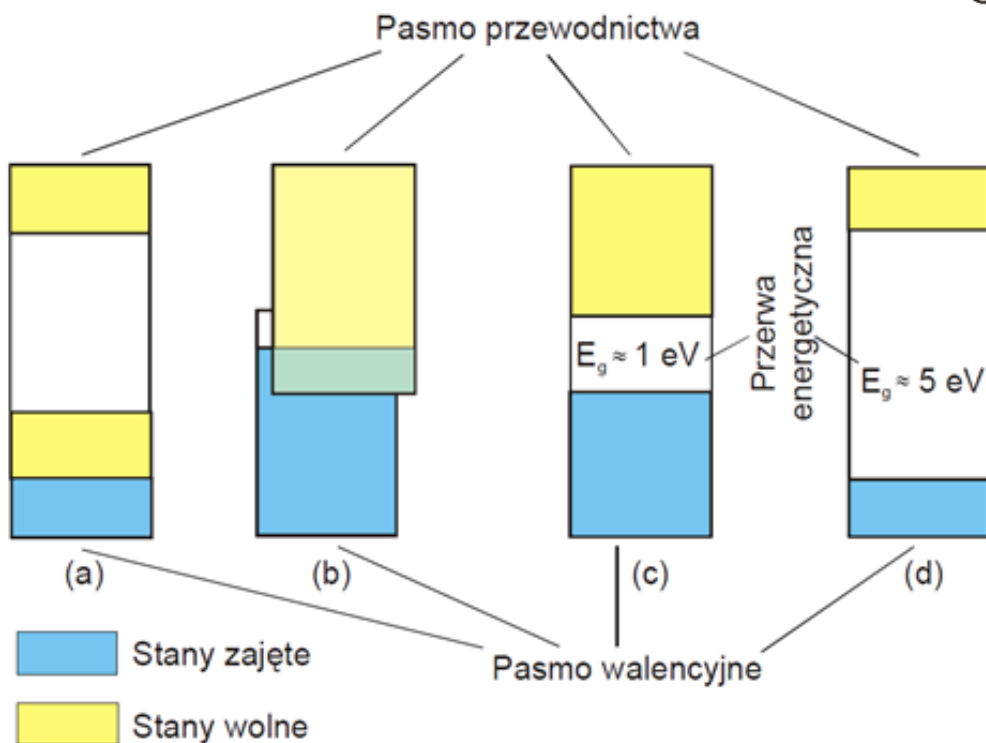
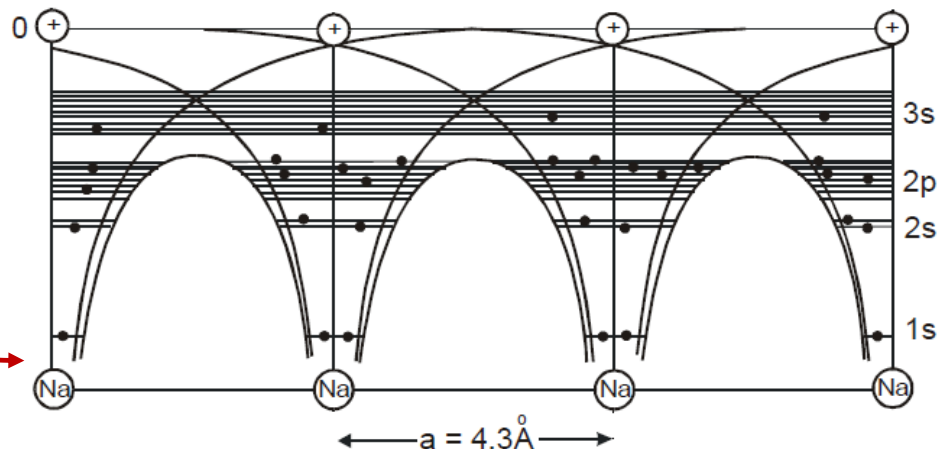
Rozszczepienie poziomów energetycznych w kryształach



Klasyfikacja materiałów – teoria pasmowa

- Zbliżenie atomów w kryształ prowadzi do rozszczepienia poziomów energetycznych
- Rozszczepione poziomy grupują się w pasma

Rys. Rozszczepienie poziomów energetycznych dla atomów sodu (Na) przy zbliżeniu się atomów znajdujących się w odległości rzędu parametru stałej sieci ($a = 4.3 \text{ \AA}$).



(a) i (b) – **metale** (częściowo wypełnione pasmo energetyczne, **swobodne elektrony w pasmach**),

(c) **półprzewodnik** (całkowicie wypełnione pasmo walencyjne, przerwa wzbroniona $\sim 1 \text{ eV}$ – umownie, całkowicie puste pasmo przewodnictwa)

(d) **izolator** (całkowicie wypełnione pasmo walencyjne, przerwa wzbroniona $> 5 \text{ eV}$ – umownie, całkowicie puste pasmo przewodnictwa)

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...**