



POLITECHNIKA  
GDAŃSKA

# INŻYNIERIA MATERIAŁOWA I KONSTRUKCJA URZĄDZEŃ

dr hab. inż. Marcin Gnyba

Katedra Metrologii i Optoelektroniki

pokój 346, tel. 347 24 82,

e-mail: [mgnyba@eti.pg.edu.pl](mailto:mgnyba@eti.pg.edu.pl) [mgnyba@eti.pg.edu.pl](mailto:mgnyba@eti.pg.edu.pl),  
[marcin.gnyba@gmail.com](mailto:marcin.gnyba@gmail.com)

# ORGANIZACJA ZAJĘĆ

- **WYKŁAD (II semestr) – 15 godzin**  
I połowa semestru – 2 godziny/tydzień
- **LABORATORIUM (II semestr) – 15 godzin**  
II połowa semestru – 2 godziny/tydzień

## ZASADY ZALICZENIA - WSPÓLNA OCENA:

- **Skala 0-100 pkt:**
  - 0-60 pkt. – wykład – jeden/dwa sprawdziany pisemne (każdy musi zostać zaliczony)
  - 0-40 pkt. – laboratorium – zaliczenie laboratorium

**Konieczność uzyskania połowy punktów z każdej części!**

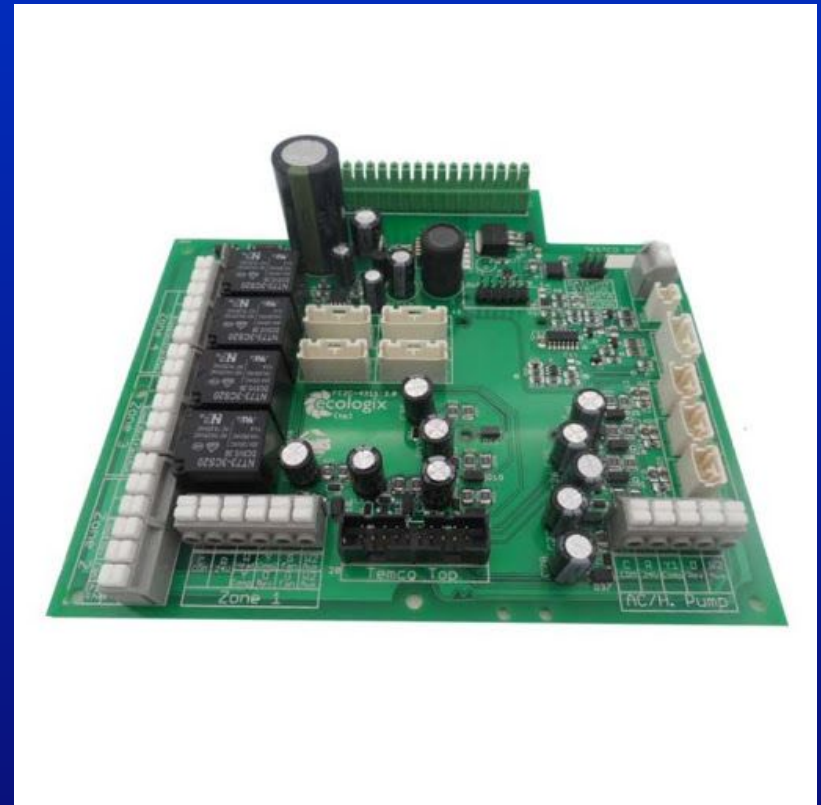
---

- **PROJEKT (III semestr) – 15 godzin**

# LITERATURA

1. Zdzisław Celiński, „Materiałoznawstwo elektrotechniczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998 (2005)
2. Karol Radecki i wsp., „Materiały i elementy elektroniczne bierne”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991
3. Marek Blicharski, „Wstęp do inżynierii materiałowej”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998
4. Henryk Rawa, „Podstawy elektromagnetyzmu”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996
5. S.O. Kasap, „Principles of Electronic Materials and Devices”, McGraw-Hill International Edition 2006
6. Franciszek Kostrubiec, „Podstawy fizyczne materiałoznawstwa dla elektryków”, Politechnika Łódzka 1999

# TEMATYKA ZAJĘĆ



\*

# TEMATYKA ZAJĘĆ

- Jak działają układy (urządzenia) elektroniczne ?
- Jak projektować urządzenia/układy?
- **Z czego budować? (materiały)**
- **W jaki sposób budować? (technologia montażu)**

## DZIAŁY MATERIAŁOZNAWSTWA:

- **Nauka o materiałach**
- **Technologia materiałów**
- **Zastosowania materiałów**

# TEMATYKA ZAJĘĆ

- **Podstawy budowy materii**
  - struktura atomu i wiązania chemiczne
  - struktura krystaliczna
- **Materiały i elementy magnetyczne**
  - oddziaływanie materiałów z polem magnetycznym
  - cewki indukcyjne i transformatory
  - magnesy
  - inne zastosowania magnetyków
- **Materiały i elementy dielektryczne**
  - właściwości fizyczne i polaryzacja dielektryków
  - kondensatory
  - materiały konstrukcyjne
  - inne zastosowania dielektryków
- **Materiały i elementy rezystywne**
  - rezystory liniowe
  - rezystory nieliniowe

# PODSTAWY BUDOWY MATERII

Kryterium podstawowe - oddziaływanie materiału z falą elektromagnetyczną

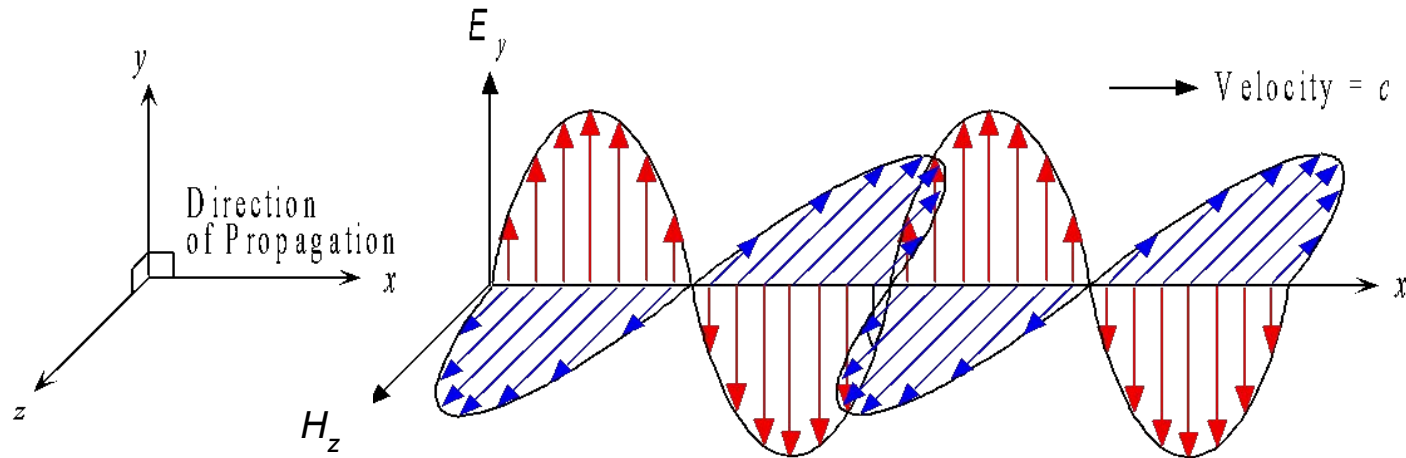


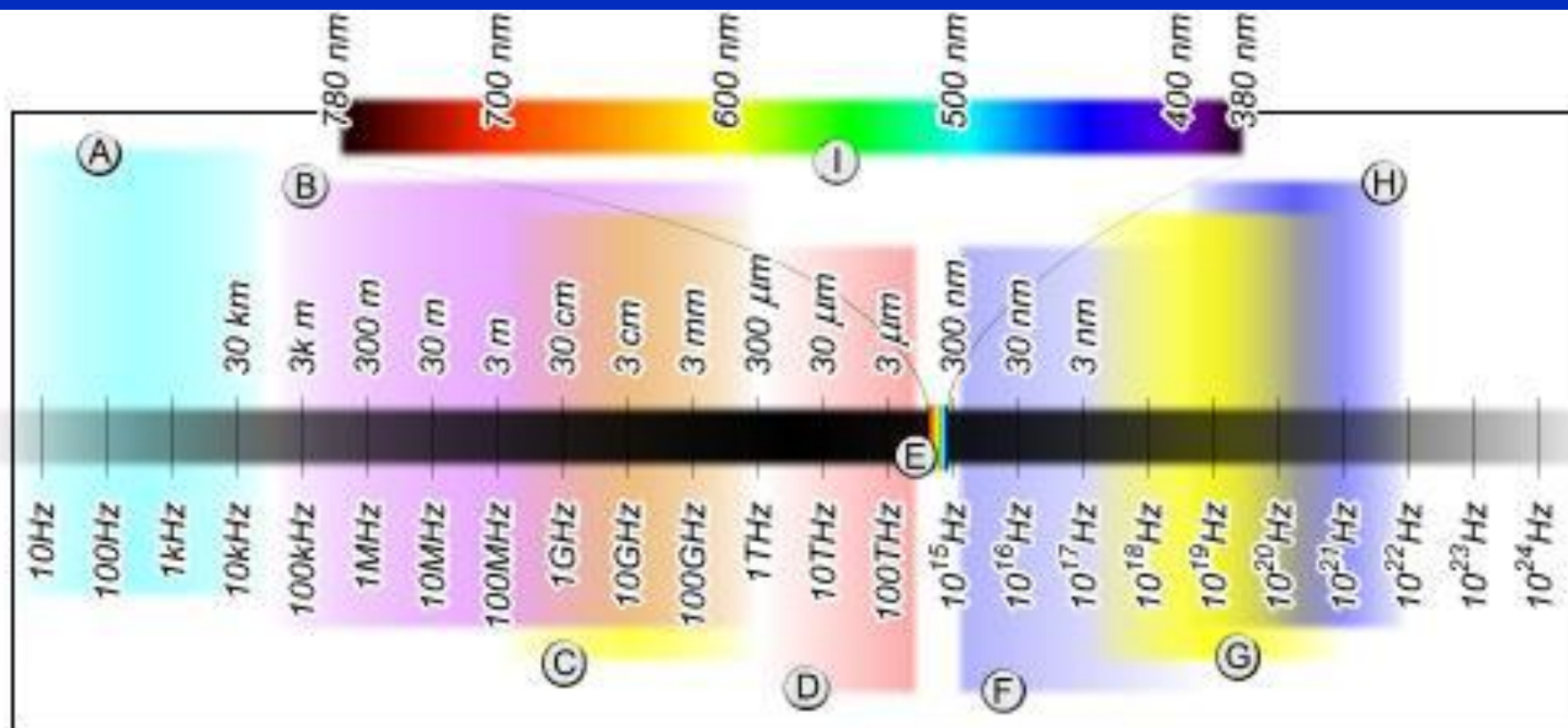
Fig. 3.1: The classical view of light as an electromagnetic wave. An electromagnetic wave is a travelling wave which has time varying electric and magnetic fields which are perpendicular to each other and to the direction of propagation.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>

\*



# FALE ELEKTROMAGNETYCZNE



A- fale radiowe bardzo długie

C - mikrofales

E – pasmo widzialne

G – promieniowanie rentgenowskie (pasmo X)

I - pasmo widzialne

B - fale radiowe

D - podczerwień

F - ultrafiolet

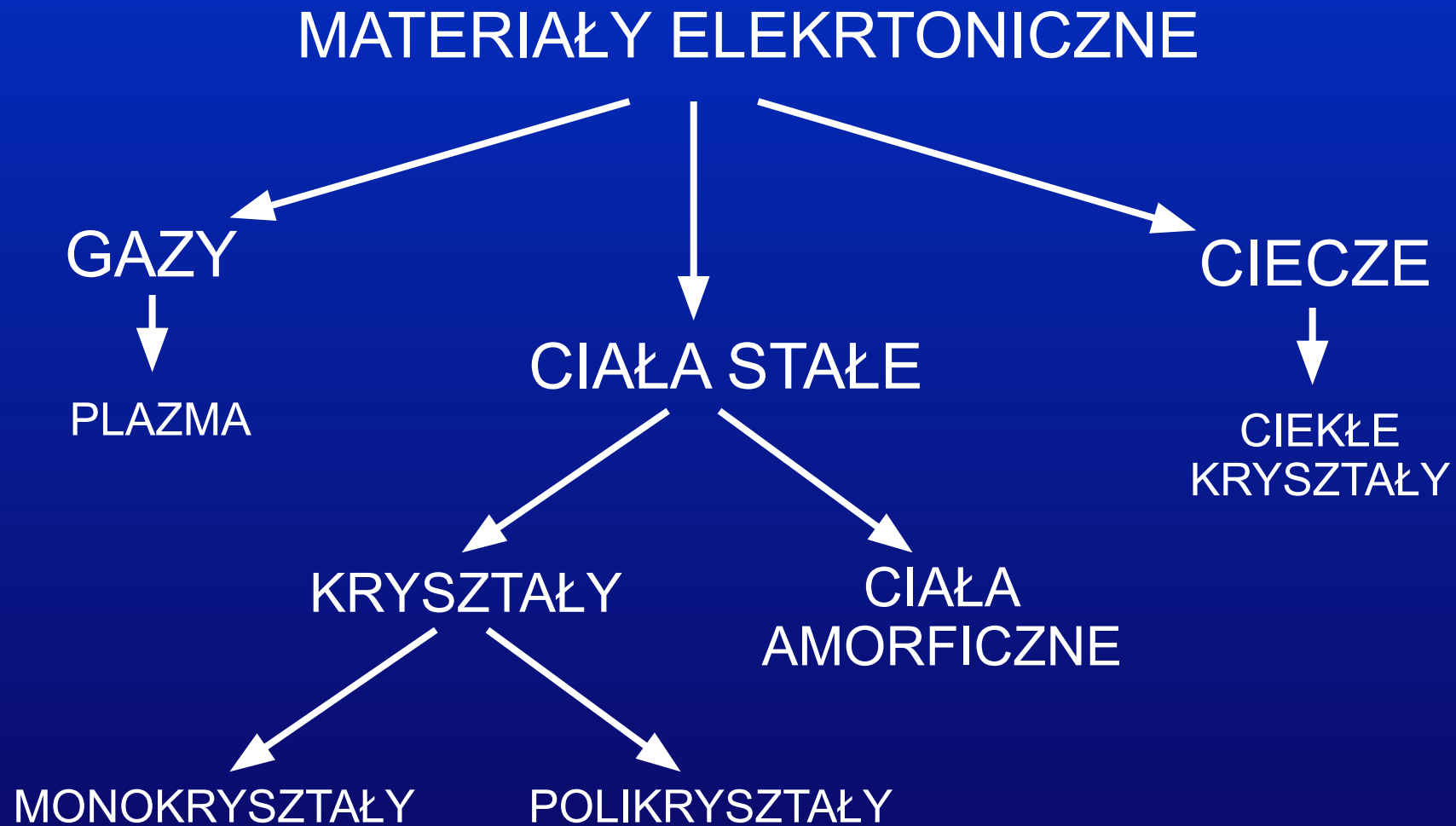
H – promieniowanie gamma

\*

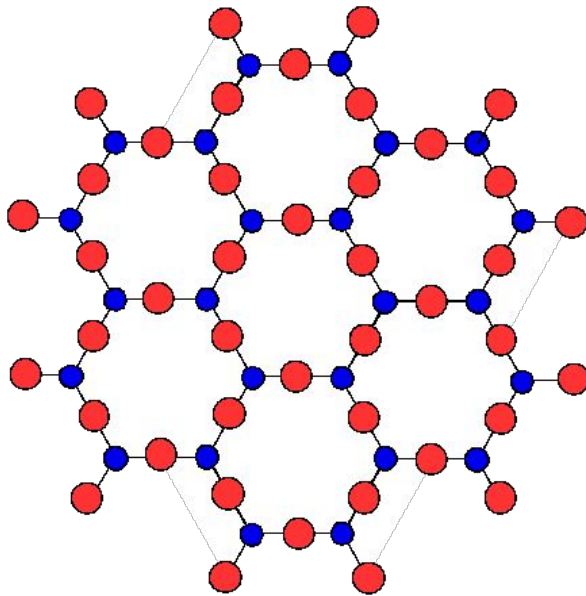


nazwa polska	nazwa angielska	częstotliwość	długość fali
	extremely low frequency ELF	3-30 Hz	10-100 tys. km
	super low frequency SLF	30-300 Hz	1-10 tys. km
	ultra low frequency ULF, voice frequency VF	300-3000 Hz	100-1000 km
fale myriametrowe, fale bardzo długie	very low frequency VLF	3-30 kHz	10-100 km
fale kilometrowe, fale długie D, Dł, DF	low frequency LF	30-300 kHz	1-10 km
fale hektometrowe, fale średnie Ś, Śr, ŚF	medium frequency MF	300-3000 kHz	100-1000 m
fale dekametrowe, fale krótkie K, KR, KF	high frequency HF	3-30 MHz	10-100 m
fale metrowe, fale ultrakrótkie UKF	very high frequency VHF	30-300 MHz	1-10 m
fale decymetrowe VKF	ultra high frequency UHF	300-3000 MHz	100-1000 mm
fale centymetrowe	super high frequency SHF	3-30 GHz	10-100 mm
fale milimetrowe	extremely high frequency EHF	30-300 GHz	1-10 mm
fale submilimetrowe		300-3000 GHz	100-1000 $\mu$ m

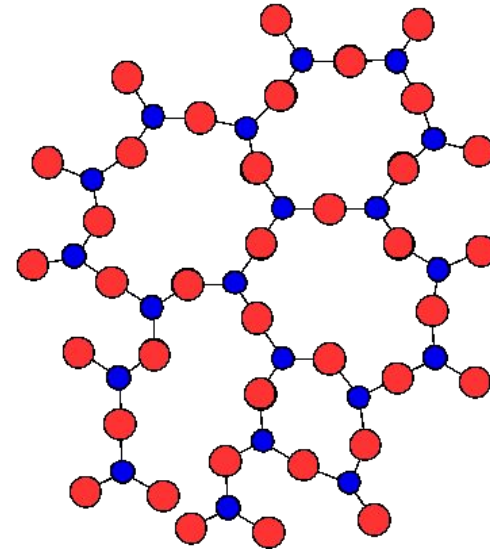
# POSTAĆ MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH



- Silicon (or Arsenic) atom
- Oxygen (or Selenium) atom



(a) A crystalline solid reminiscent to crystalline  $\text{SiO}_2$ . (Density =  $2.6 \text{ g cm}^{-3}$ )



(b) An amorphous solid reminiscent to vitreous silica ( $\text{SiO}_2$ ) cooled from the melt (Density =  $2.2 \text{ g cm}^{-3}$ )

**Fig. 1.56: Crystalline and amorphous structures illustrated schematically in two dimensions.**

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.usask.ca>

# PODSTAWY BUDOWY MATERII

Pojęcie struktury materiału obejmuje:

- 1) Charakterystykę uporządkowania atomowego
- 2) Opis wielkości, kształtu i jednorodności, ewentualnie uprzywilejowanej orientacji ziaren w układach polikrystalicznych
- 3) Rodzaj, liczbę i rozmieszczenie faz w układach wieloskładnikowych
- 4) Opis makrostruktury – niejednorodności i defektów odnoszących się do większych obszarów materiału
- 5) Charakterystykę naprężeń własnych

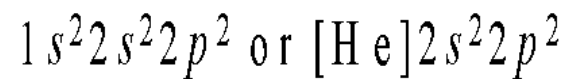
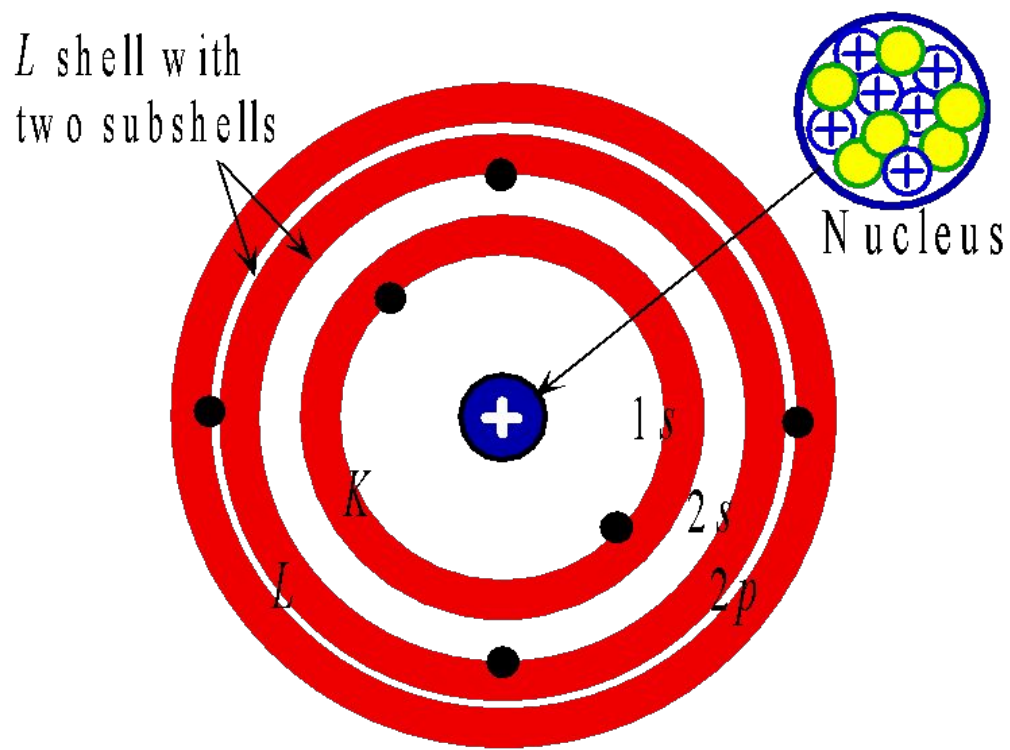


Fig. 1.1: The shell model of the atom in which the electrons are confined to live within certain shells and in subshells within shells.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>

# BUDOWA ATOMU

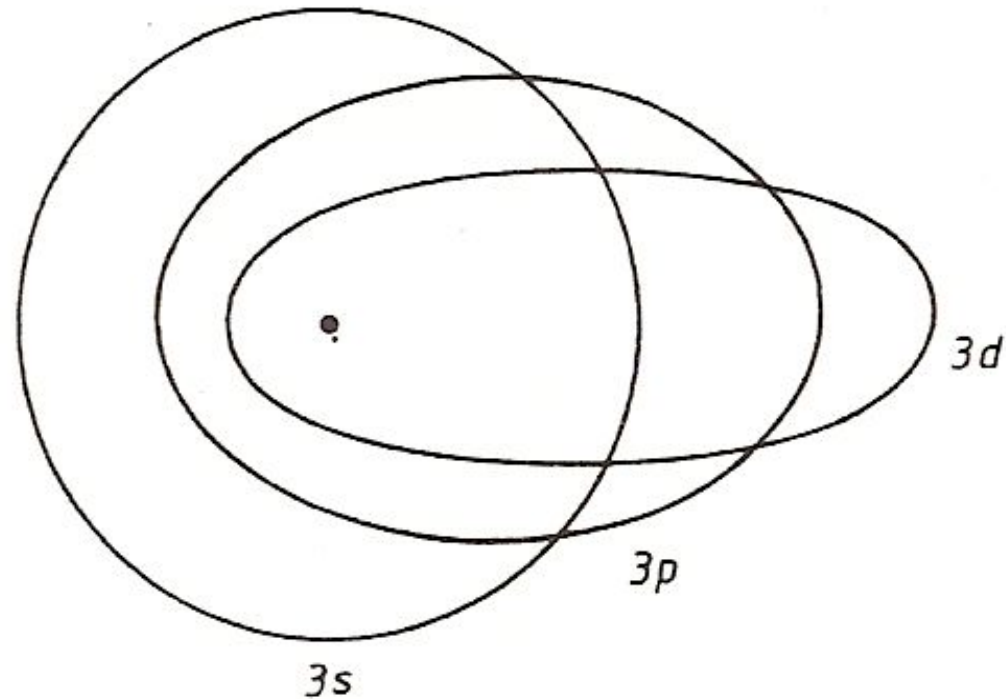
## 1. Główna liczba kwantowa $n$

określa numer porządkowy powłoki elektronowej i rozmiary orbity; przybiera wartości kolejnych liczb naturalnych: 1 (powłoka K), 2 (L), 3 (M), 4 (N), 5 (O), 6 (P), 7 (Q)...

## 2. Orbitalna liczba kwantowa $l$

określa możliwość istnienia w poszczególnych powłokach warstw orbit o jednakowych kształtach – podpowłok; określa kształt orbity; może przybierać skończoną ilość wartości (maksymalnie  $n$ )

# ORBITALNA LICZBA KWANTOWA



Rys. 1.13-1. Warstwy orbit w powłoce M ( $n=3$ )



# BUDOWA ATOMU

## 1. Główna liczba kwantowa $n$

określa numer porządkowy powłoki elektronowej i rozmiary orbity; przybiera wartości kolejnych liczb naturalnych: 1 (powłoka K), 2 (L), 3 (M), 4 (N), 5 (O), 6 (P), 7 (Q)...

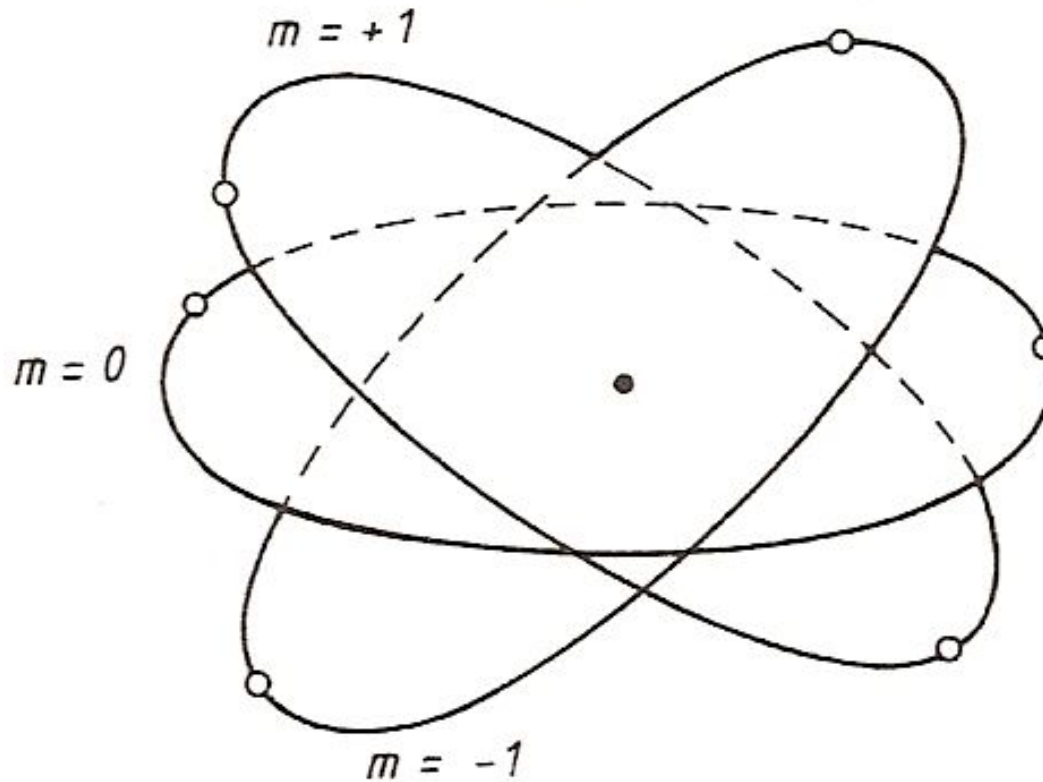
## 2. Orbitalna liczba kwantowa $l$

określa możliwość istnienia w poszczególnych powłokach warstw orbit o jednakowych kształtach – podpowłok; określa kształt orbity; może przybierać skończoną ilość wartości (maksymalnie  $n$ )

## 3. Magnetyczna liczba kwantowa $m$

określa orientację przestrzenną orbity; może przybierać  $2l+1$  całkowitych wartości, zawartych między  $-l$  i  $+l$

# MAGNETYCZNA LICZBA KWANTOWA



Rys. 1.14-1. Usytuowanie przestrzenne orbit w warstwie  $3p$

# BUDOWA ATOMU

## 1. Główna liczba kwantowa $n$

określa numer porządkowy powłoki elektronowej i rozmiary orbity; przybiera wartości kolejnych liczb naturalnych: 1 (powłoka K), 2 (L), 3 (M), 4 (N), 5 (O), 6 (P), 7 (Q)...

## 2. Orbitalna liczba kwantowa $l$

określa możliwość istnienia w poszczególnych powłokach warstw orbit o jednakowych kształtach – podpowłok; określa kształt orbity; może przybierać skończoną ilość wartości (maksymalnie  $n$ )

## 3. Magnetyczna liczba kwantowa $m$

określa orientację przestrzenną orbity; może przybierać  $2l+1$  całkowitych wartości, zawartych między  $-l$  i  $+l$

## 4. Spinowa liczba kwantowa $s$

może przyjmować tylko dwie wartości:  $+1/2$  i  $-1/2$ ; opisuje dwa możliwe kierunki wirowania elektronu wokół własnej osi

\*

**Table 1.1**

Maximum possible number of electrons in the shells and subshells of an atom.

---

		<b>Subshell</b>			
		$l = 0$	$1$	$2$	$3$
		<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>
$n$	<b>Shell</b>				
<hr/>					
1	<b>K</b>	2			
2	<b>L</b>	2	6		
3	<b>M</b>	2	6	10	
4	<b>N</b>	2	6	10	14
<hr/>					

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)

<http://Materials.Usask.Ca>

$n$	$l$	$m$	$s$	Stany dozwolone w podpowłoce	Stany dozwolone w powłoce zapełnionej
1	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	$s$ 2	K 2
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	$s$ 2	L 8
	1	-1	$\pm \frac{1}{2}$	$p$ 6	
		0	$\pm \frac{1}{2}$		
3	1	-1	$\pm \frac{1}{2}$	$p$ 6	M 18
		0	$\pm \frac{1}{2}$		
		-1	$\pm \frac{1}{2}$		
	2	-2	$\pm \frac{1}{2}$	$d$ 10	
		-1	$\pm \frac{1}{2}$		
		0	$\pm \frac{1}{2}$		
	+1	$\pm \frac{1}{2}$			
	+2	$\pm \frac{1}{2}$			

Zdzisław Celiński, „Materiałoznawstwo elektrotechniczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998 (2005)

# B U D O W A A T O M U

\*

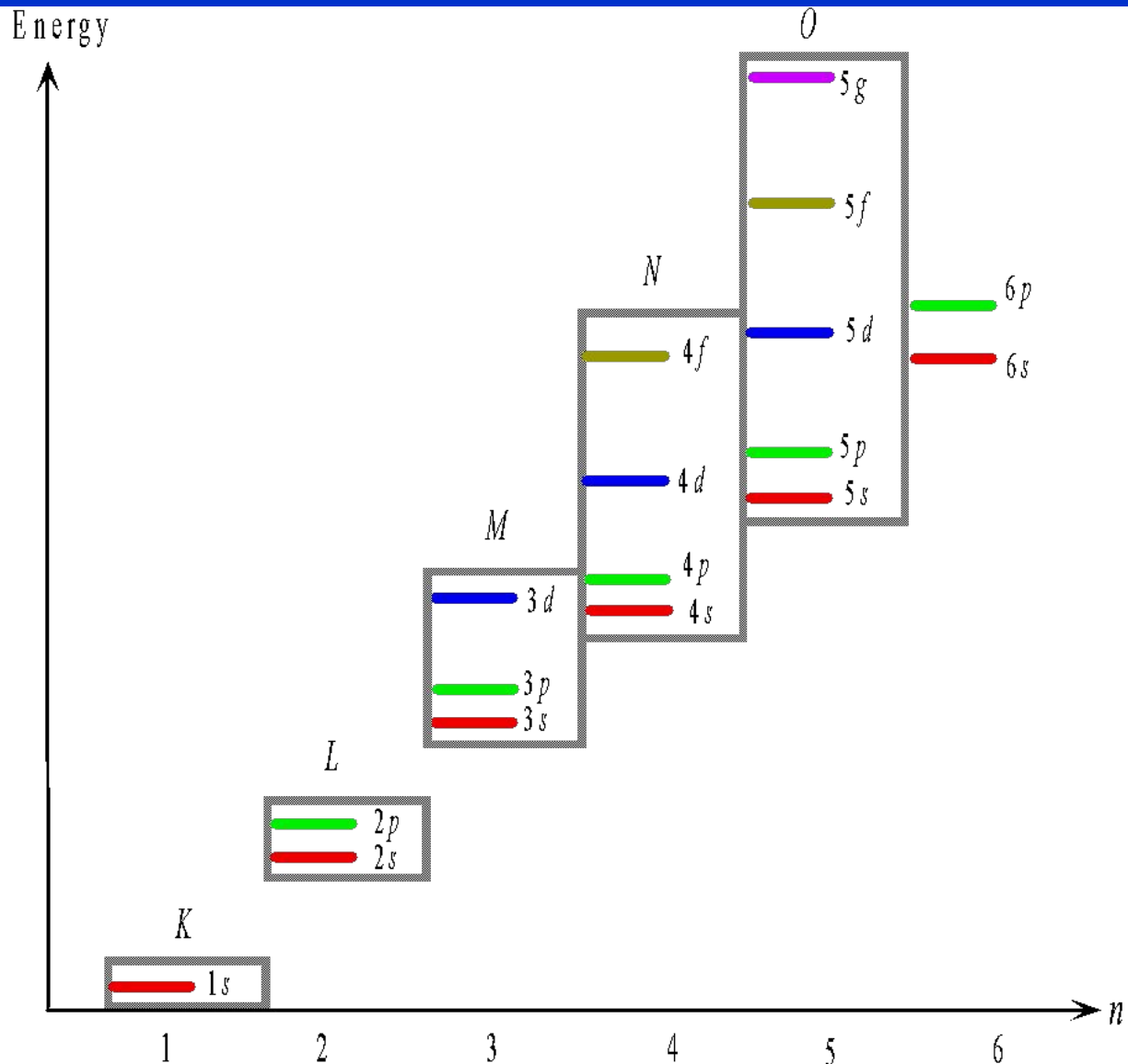


Fig. 3.33: Energy of various one-electron states. The energy depends on both  $n$  and  $l$ .

# BUDOWA ATOMU

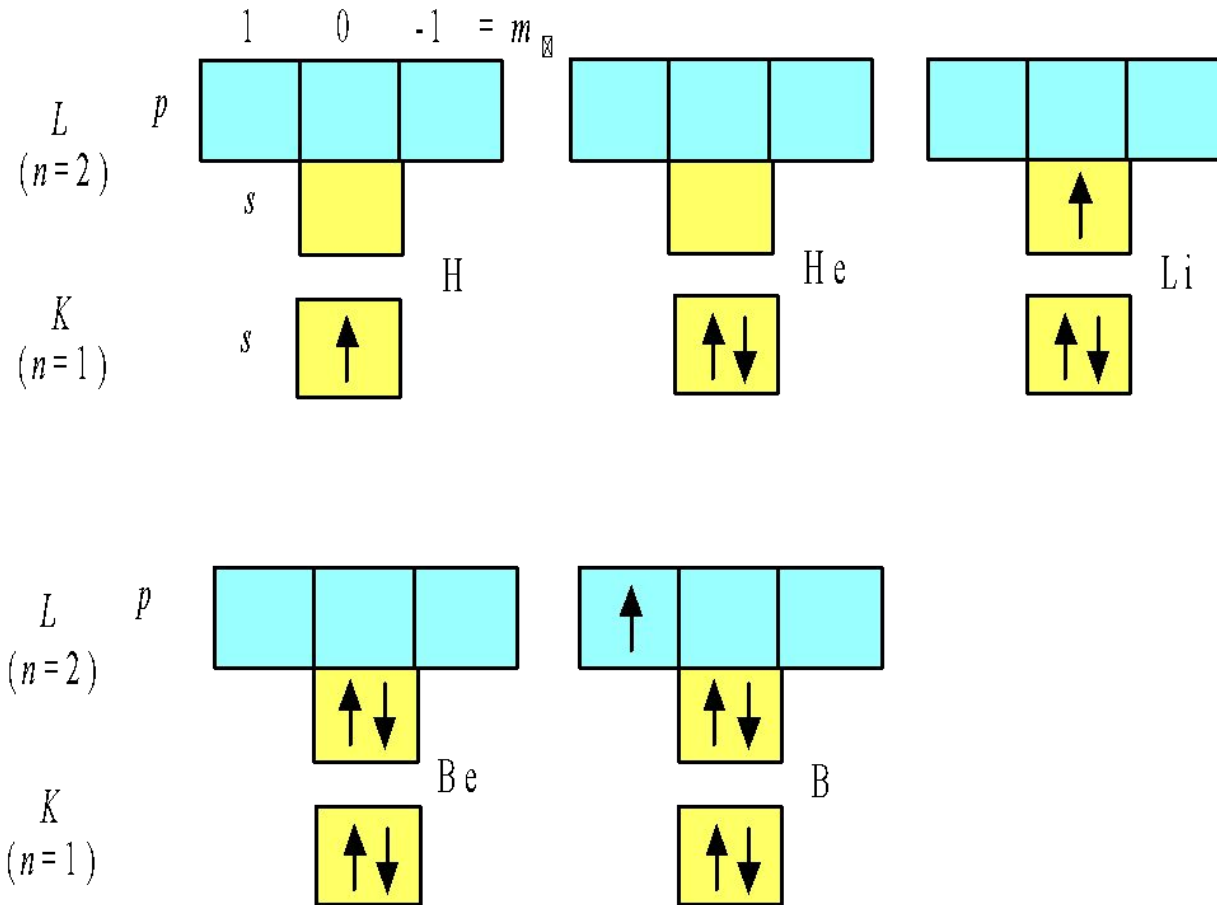


Fig. 3.35: Electronic configurations for the first five elements. Each box represents an orbital  $\psi(n, \ell, m_\ell)$ .

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>



# BUDOWA ATOMU

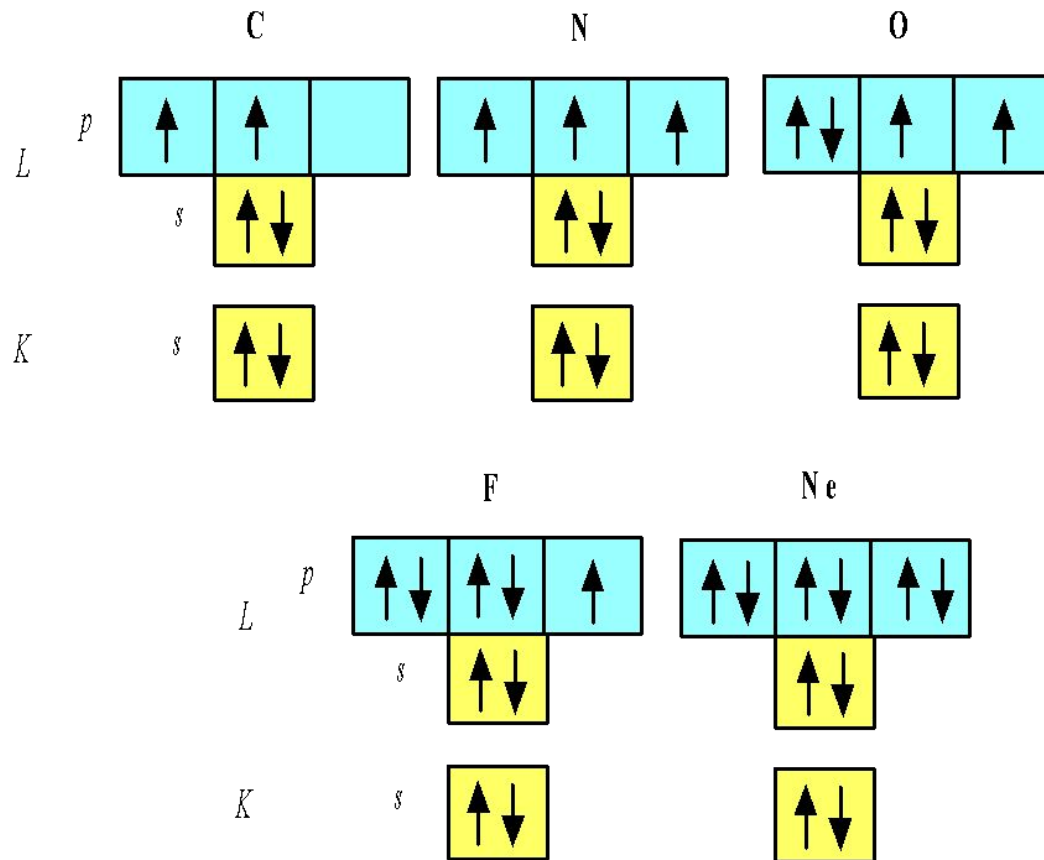


Fig. 3.36: Electronic configurations for C, N, O, F and Ne atoms. Notice that Hund's rule forces electrons to align their spins in C, N and O. The Ne atom has all the *K* and *L* orbitals full.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>

Z	Atom	Konfiguracja elektronowa	Z	Atom	Konfiguracja elektronowa
1	H	1 s	26	Fe	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>6</sup>
2	He	1 s <sup>2</sup>	27	Co	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>7</sup>
3	Li	[He] 2s	28	Ni	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>8</sup>
4	Be	[He] 2 s <sup>2</sup>	29	Cu	[Ar] 4s3d <sup>10</sup>
5	B	[He] 2 s <sup>2</sup> 2p	30	Zn	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup>
6	C	[He] 2 s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	31	Ga	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> 4p
7	N	[He] 2 s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	32	Ge	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>2</sup>
8	O	[He] 2 s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	33	As	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>3</sup>
9	F	[He] 2 s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	34	Se	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>4</sup>
10	Ne	[He] 2 s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	35	Br	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>5</sup>
11	Na	[Ne] 3s	36	Kr	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> 4p <sup>6</sup>
12	Mg	[Ne] 3s <sup>2</sup>	37	Rb	[Kr] 5s
13	Al	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p	38	Sr	[Kr] 5s <sup>2</sup>
14	Si	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	39	Y	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d
15	P	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	40	Zr	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>2</sup>
16	S	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	41	Nb	[Kr] 5s4d <sup>4</sup>
17	Cl	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	42	Mo	[Kr] 5s4d <sup>5</sup>
18	Ar	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>	43	Tc	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>5</sup>
19	K	[Ar] 4s	44	Ru	[Kr] 5s4d <sup>7</sup>
20	Ca	[Ar] 4s <sup>2</sup>	45	Rh	[Kr] 5s4d <sup>8</sup>
21	Sc	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d	46	Pd	[Kr] 4d <sup>10</sup>
22	Ti	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>2</sup>	47	Ag	[Kr] 5s4d <sup>10</sup>
23	V	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>3</sup>	48	Cd	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup>
24	Cr	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>4</sup>	49	In	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> 5p
25	Mn	[Ar] 4s <sup>2</sup> 3d <sup>5</sup>	50	Sn	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>2</sup>

# B U D O W A A T O M U

Zdzisław Celiński, „Materiałoznawstwo elektrotechniczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998 (2005)

\*

Z	Atom	Konfiguracja elektronowa	Z	Atom	Konfiguracja elektronowa
51	Sb	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>3</sup>	78	Pt	[Xe] 6s4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup>
52	Te	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>4</sup>	79	Au	[Xe] 6s4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup>
53	J	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>5</sup>	80	Hg	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup>
54	Xe	[Kr] 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> 5p <sup>6</sup>	81	Tl	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6p
55	Cs	[Xe] 6s	82	Pb	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>2</sup>
56	Ba	[Xe] 6s <sup>2</sup>	83	Bi	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>3</sup>
57	La	[Xe] 6s <sup>2</sup> 5d	84	Po	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>4</sup>
58	Ce	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f5d	85	At	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>5</sup>
59	Pr	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>3</sup>	86	Rn	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6p <sup>6</sup>
60	Nd	[Xe] 6s <sup>4</sup> f <sup>4</sup>	87	Fr	[Rn] 7s
61	Pm	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>5</sup>	88	Ra	[Rn] 7s <sup>2</sup>
62	Sm	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>6</sup>	89	Ac	[Rn] 7s <sup>2</sup> 6d
63	Eu	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>7</sup>	90	Th	[Rn] 7s <sup>2</sup> 6d <sup>2</sup>
64	Gd	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>7</sup> 5d	91	Pa	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>2</sup> 6d
65	Tb	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>9</sup> ?	92	U	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>3</sup> 6d
66	Dy	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>10</sup>	93	Np	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>4</sup> 6d
67	Ho	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>11</sup>	94	Pu	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>6</sup>
68	Er	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>12</sup>	95	Am	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>7</sup>
69	Tm	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>13</sup>	96	Cm	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>7</sup> 6d
70	Yb	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup>	97	Bk	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>9</sup>
71	Lu	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d	98	Cf	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>10</sup>
72	Hf	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup>	99	Es	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>11</sup>
73	Ta	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup>	100	Fm	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>12</sup>
74	W	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup>	101	Md	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>13</sup>
75	Re	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup>	102	No	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>14</sup>
76	Os	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup>	103	Lw	[Rn] 7s <sup>2</sup> 5f <sup>14</sup> 6d
77	Ir	[Xe] 6s <sup>2</sup> 4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup>			

# B U D O W A A T O M U

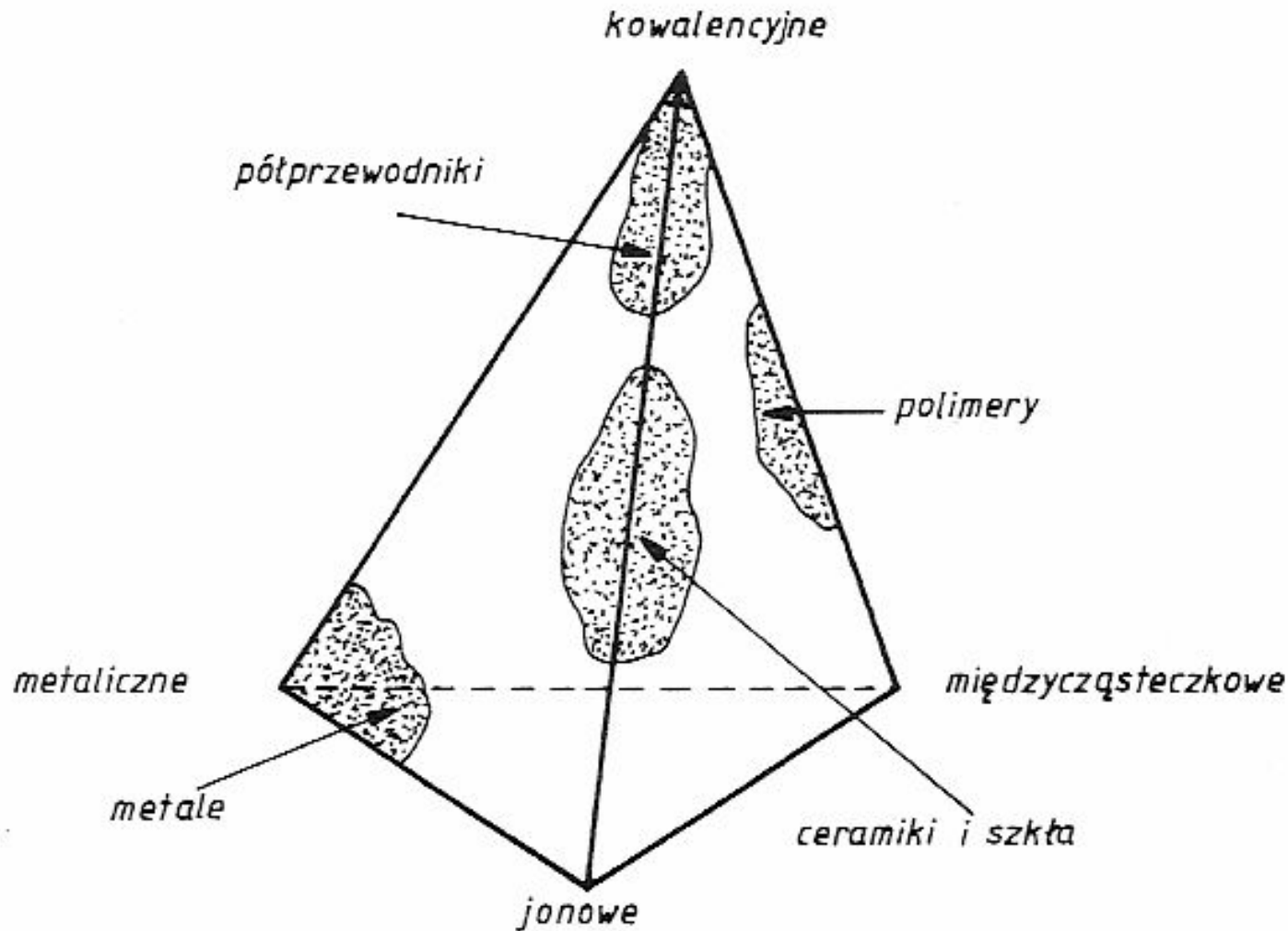
Zdzisław Celiński, „Materiałoznawstwo elektrotechniczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998 (2005)

\*

# WIĄZANIA MIĘDZY ATOMAMI

1. Wiązania metaliczne
  - metale
2. Wiązania kowalencyjne
  - półprzewodniki, polimery, ceramiki i szkła
3. Wiązania jonowe
  - sole, ceramiki i szkła
4. Wiązania międzycząsteczkowe (van der Waalsa)
  - polimery

# WIĄZANIA MIĘDZY ATOMAMI



Rys. 1.43–1. Rodzaje wiązań między atomami w różnych materiałach

Zdzisław Celiński, „Materiałoznawstwo elektrotechniczne”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998 (2005)

# WIĄZANIA KOWALENCYJNE

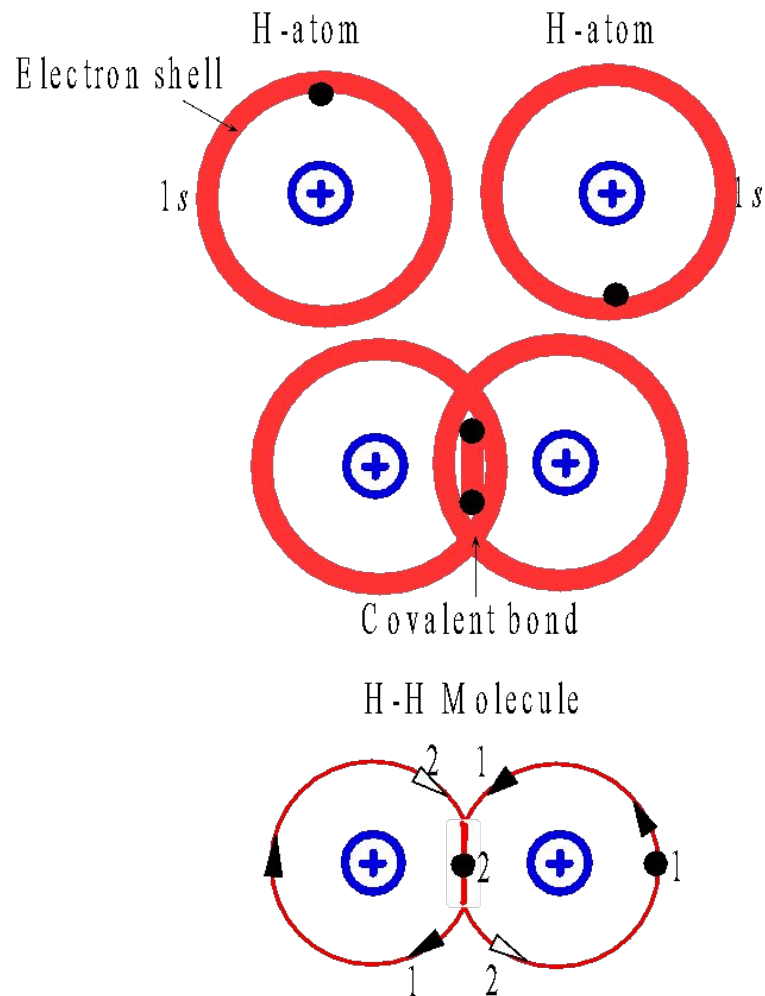


Fig. 1.4: Formation of a covalent bond between two H atoms leads to the  $H_2$  molecule. Electrons spend majority of their time between the two nuclei which results in a net attraction between the electrons and the two nuclei which is the origin of the covalent bond .

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>

\*

# WIĄZANIA KOWALENCYJNE

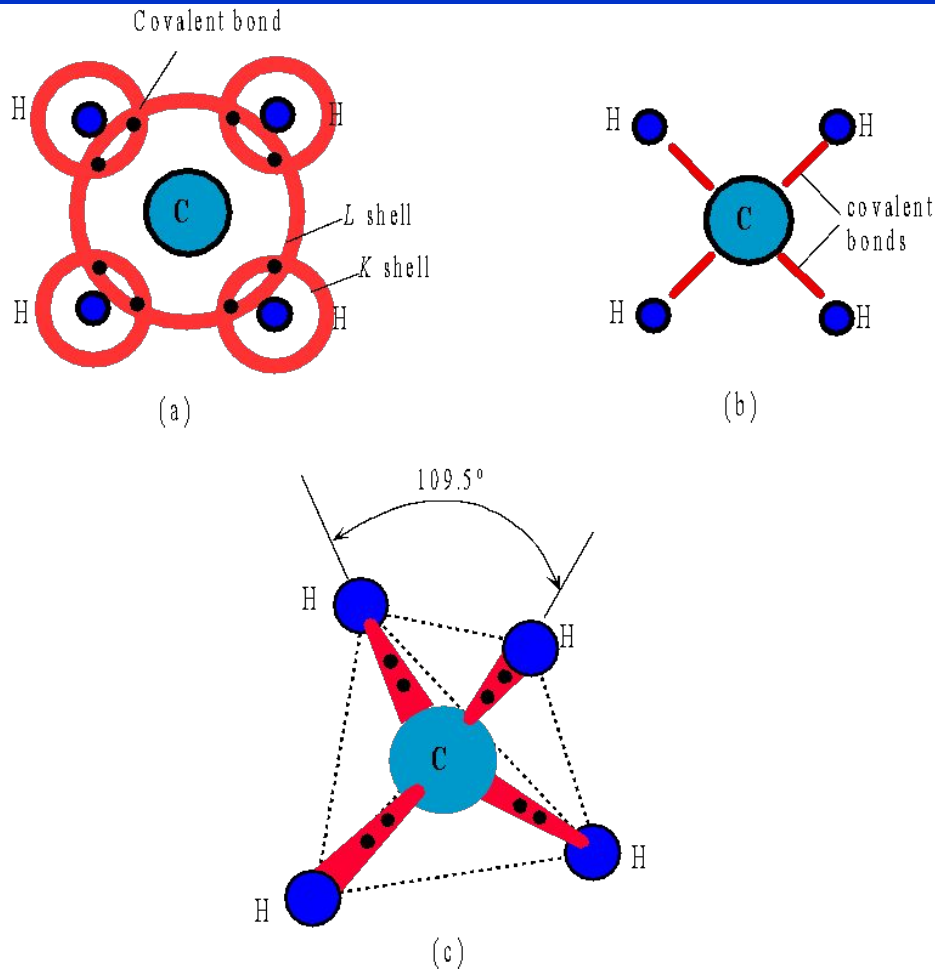


Fig. 1.5: (a) Covalent bonding in methane, CH<sub>4</sub>, involves four hydrogen atoms sharing electrons with one carbon atom. Each covalent bond has two shared electrons. The four bonds are identical and repel each other. (b) Schematic sketch of CH<sub>4</sub> on paper. (c) In three dimensions, due to symmetry, the bonds are directed towards the corners of a tetrahedron.



# WIAZANIA METALICZNE

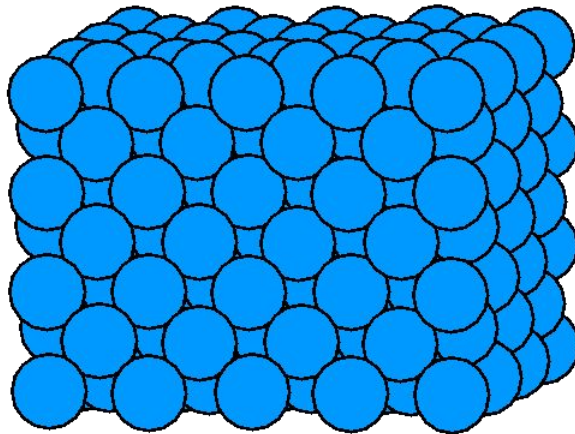
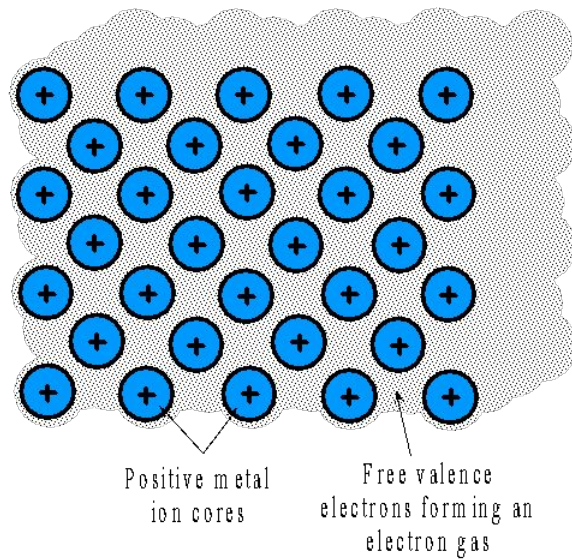


Fig. 1.7: In metallic bonding the valence electrons from the metal atoms form a "cloud of electrons" which fills the space between the metal ions and "glues" the ions together through the coulombic attraction between the electron gas and positive metal ions.

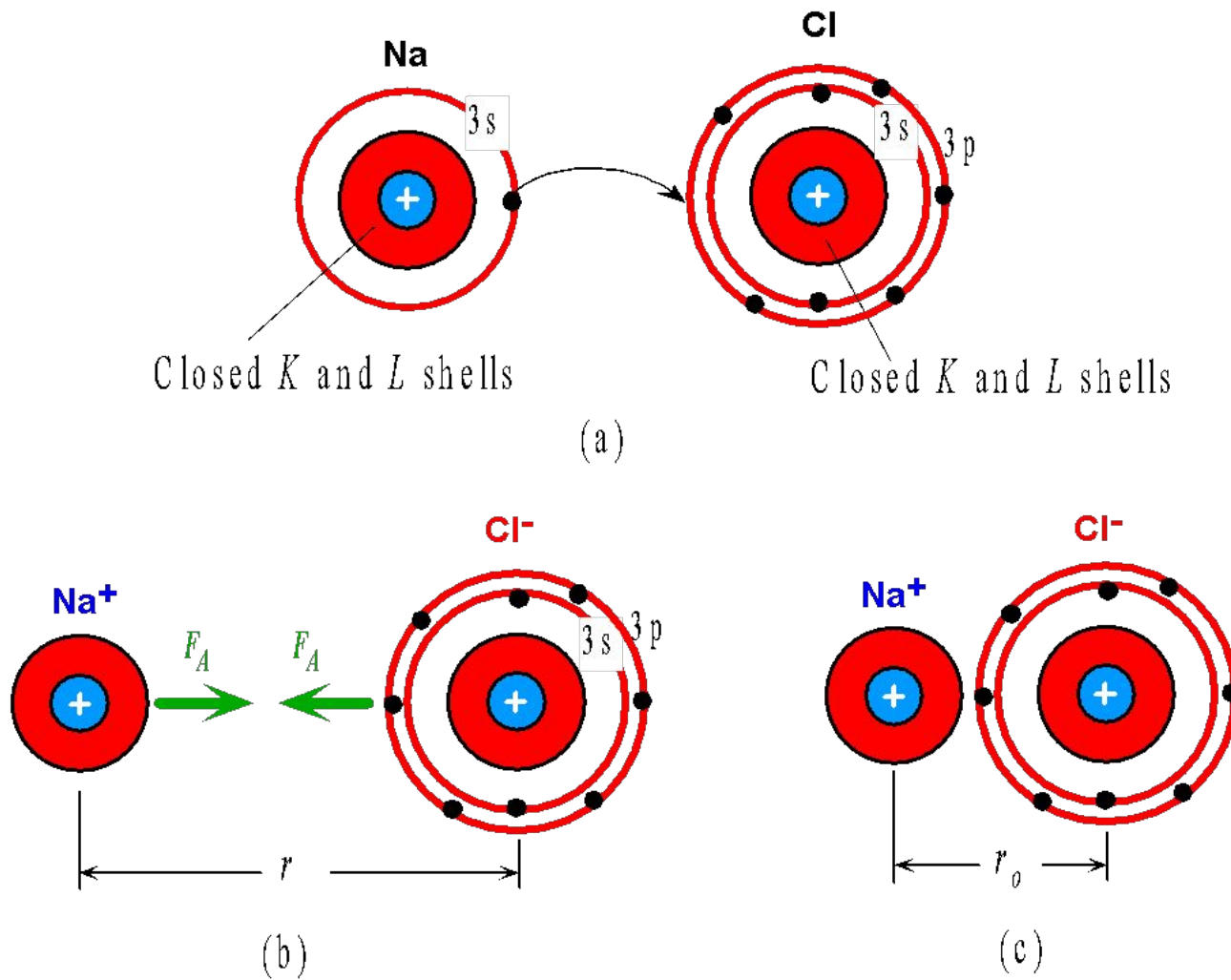
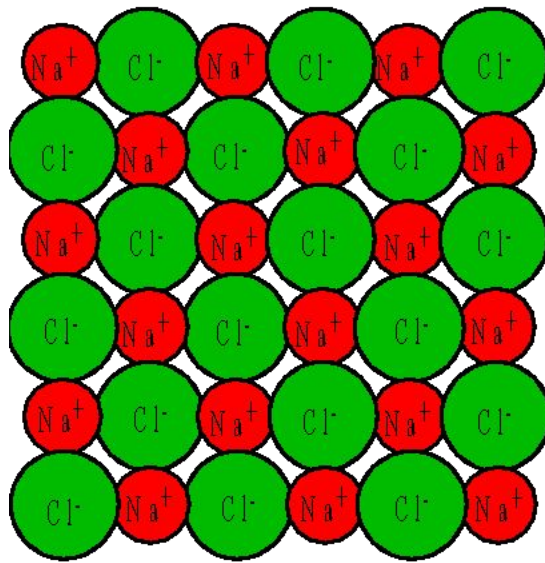
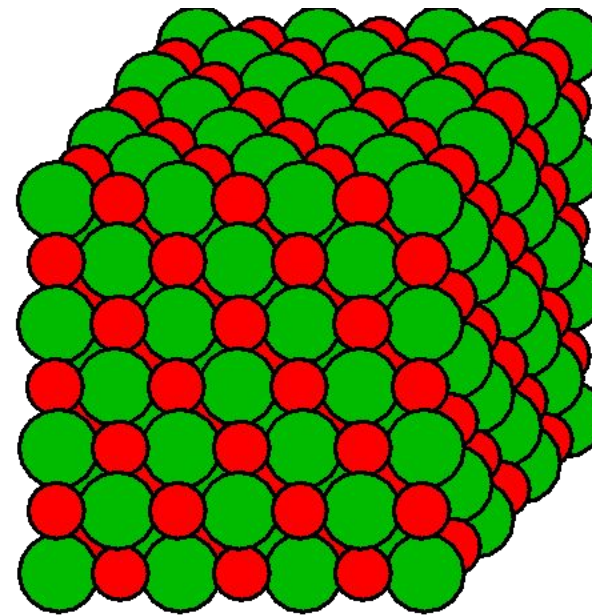


Fig. 1.8: The formation of an ionic bond between Na and Cl atoms in NaCl. The attraction is due to coulombic forces.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.USask.ca>



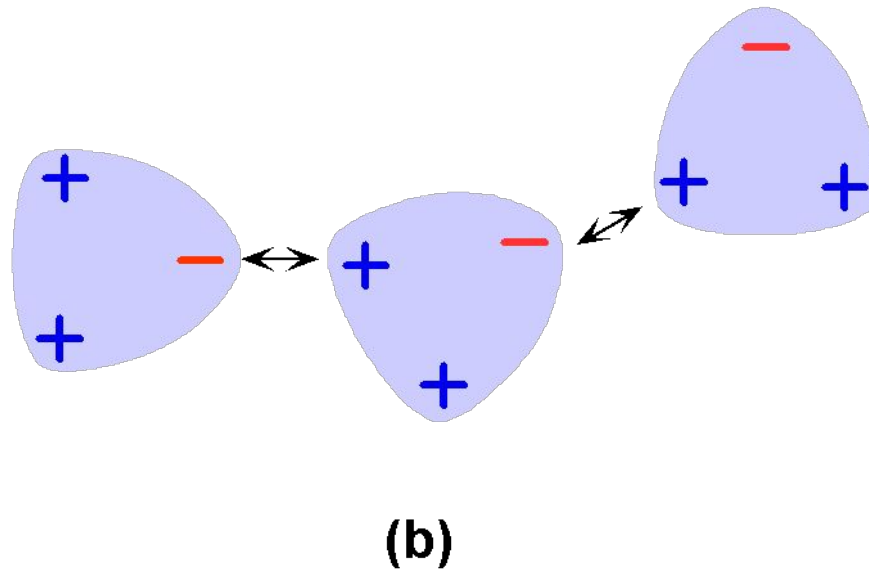
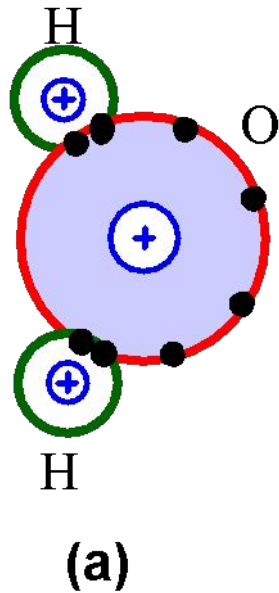
(a)



(b)

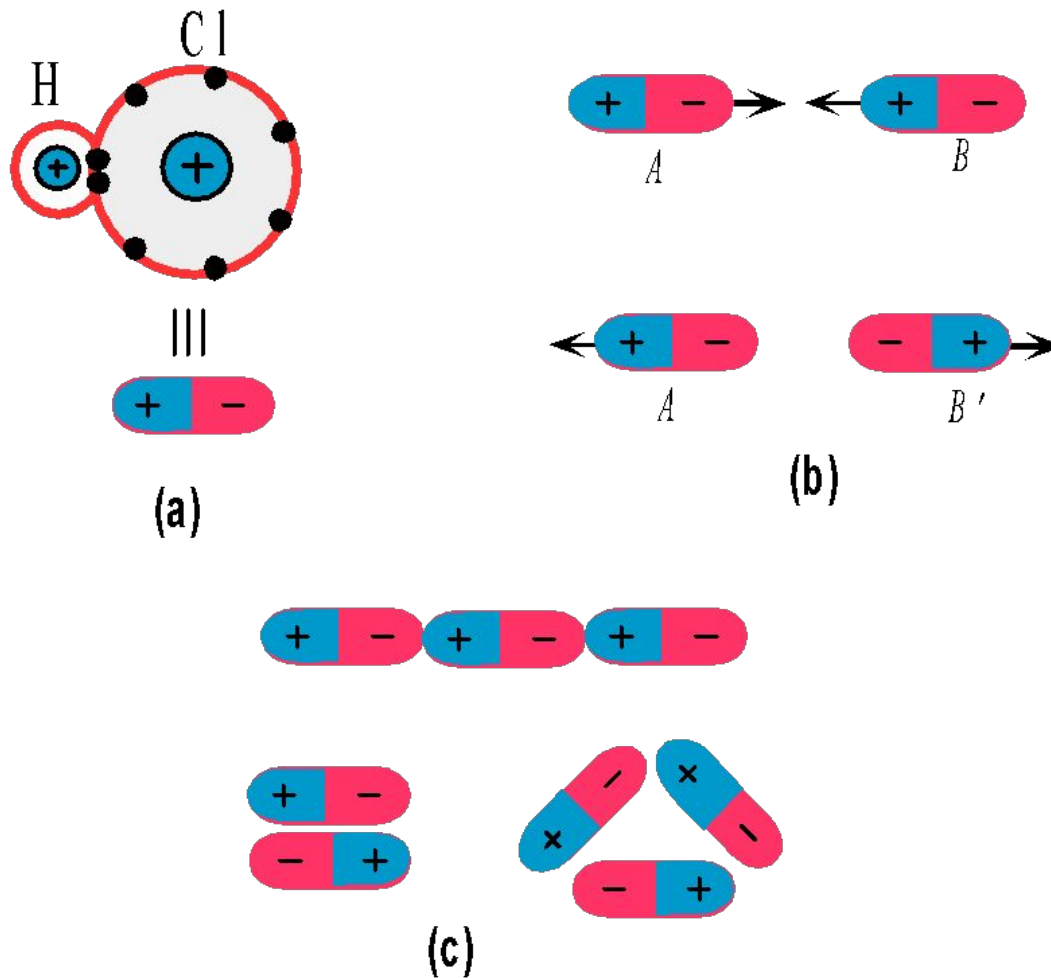
Fig. 1.9: (a) A schematic illustration of a cross section from solid NaCl. NaCl solid is made of Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup> ions arranged alternately so that the oppositely charged ions are closest to each other and attract each other. There are also repulsive forces between the like-ions. In equilibrium the net force acting on any ion is zero. (b) Solid NaCl.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.USask.ca>



**Fig. 1.12:** The origin of van der Waals bonding between water molecules. (a) The  $\text{H}_2\text{O}$  molecule is polar and has a net permanent dipole moment. (b) Attractions between the various dipole moments in water gives rise to van der Waals bonding.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.Ca>



**Fig. 1.11:** (a) A permanently polarized molecule is called a an electric dipole moment. (b) Dipoles can attract or repel each other depending on their relative orientations. **c** Suitably oriented dipoles attract each other to form van der Waals bonds.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>

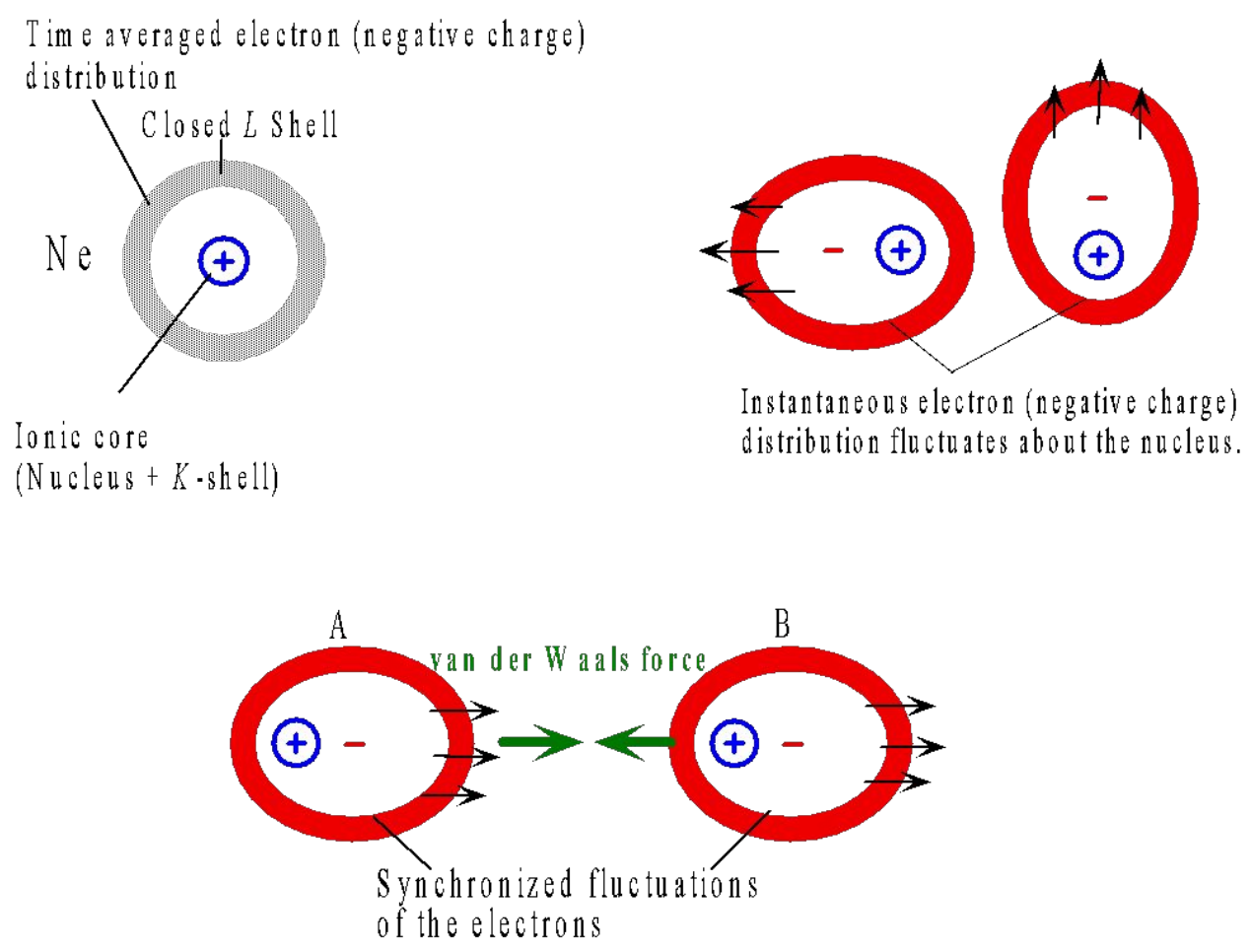


Fig. 1.13: Induced dipole-induced dipole interaction and the resulting van der Waals force.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.usask.ca>

Zestawienie typów wiązań i typowych  
właściwości

	typowe ciała stałe	energi wiązań eV/atom	temp. topn. (°C)	moduł spręż. (GPa)	gęstość (g cm <sup>-3</sup> )	typowe właściwości
jonowe	NaCl I MgO	3, 1 0	80 285 2	40 250	2,1 3,5 8	Generalnie dielektryki. Mogą przewodzić w wysokich temperaturach. Wysoki moduł sprężystości. Twarde i kruche ale rozdzielne. Przewodność cieplna gorsza niż w przewodnikach. Przewodność elektryczna wysoka. Wysoki moduł sprężystości.
meta- liczne	Cu Mg	3, 1, 1	108 65 0	120 44	8,9 1,7 4	Przewodniki. Wysoka przewodność elektryczna. Wysoki moduł sprężystości. Ciągłość. Możliwość ciągliwości. Może być szlachetny.
kowalen- cyjne	Si C (diament)	4 7, 4	141 355 0	190 827	2,3 3,5 2	Wysoki moduł sprężystości. Twardy i kruchy. Diament jest najtwardszym materiałem. Półprzewodniki lub dielektryki. Przewodność cieplna. Wyjątek - bardzo wysoka przewodność cieplna.
van der Waals: wiązań wodorowe	PC V H <sub>2</sub> O (lód)	- 0,5 2	21 0	4 9, 1	1, 0,91 7	Niski moduł sprężystości. Ciągłość. Słaba przewodność elektryczna. Duży współczynnik rozszerzalności cieplnej.
van der Waals: Indukowane dipole	krystal. argon	0,0 9	-18 9	8	1, 8	Niski moduł sprężystości. Dielektryk. Słaba przewodność elektryczna. Duży współczynnik rozszerzalności cieplnej.

Z: Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition, S.O. Kasap (© McGraw Hill, 2002)



# WIĄZANIA POMIĘDZY ATOMAMI

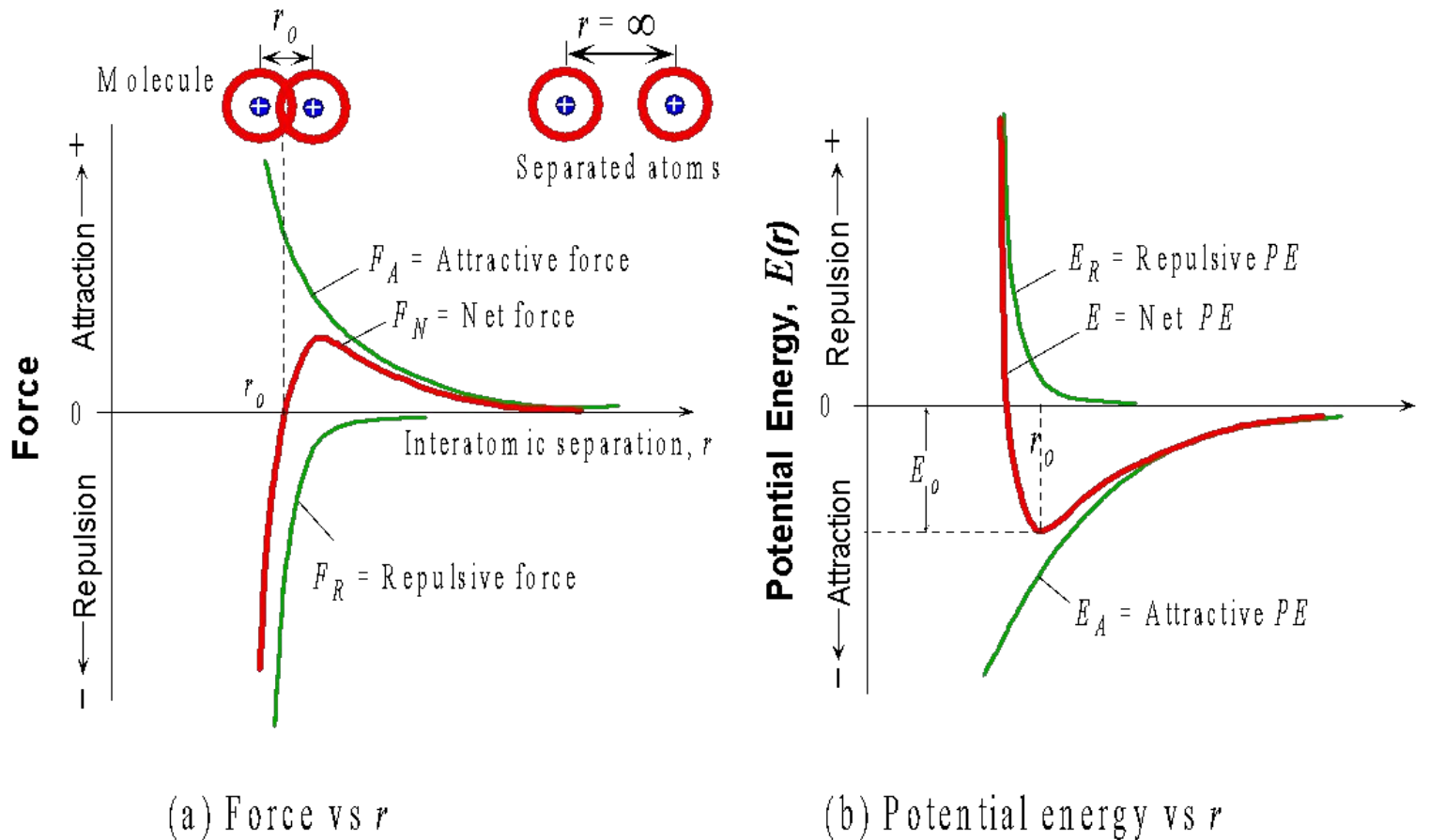


Fig. 1.3: (a) Force vs interatomic separation and (b) Potential energy vs interatomic separation.

# STRUKTURA KRYSTALICZNA

**Monokryształy** – pojedyncze duże kryształy.

**Polikryształy** – ciała składające się z wielu zrosniętych kryształów makroskopijnej lub mikroskopijnej wielkości – *kryształitów*.

**Ciała amorficzne (bezpostaciowe)** – istnieje uporządkowanie jedynie bliskiego zasięgu – na przestrzeni kilku odległości międzyatomowych występują wyraźnie odchylenia od regularnej struktury przestrzennej; uzyskiwane (szkła) poprzez przechłodzenie cieczy poniżej temperatury topnienia; izotropowe.

**Nanokryształy**

# STRUKTURA KRYSTALICZNA



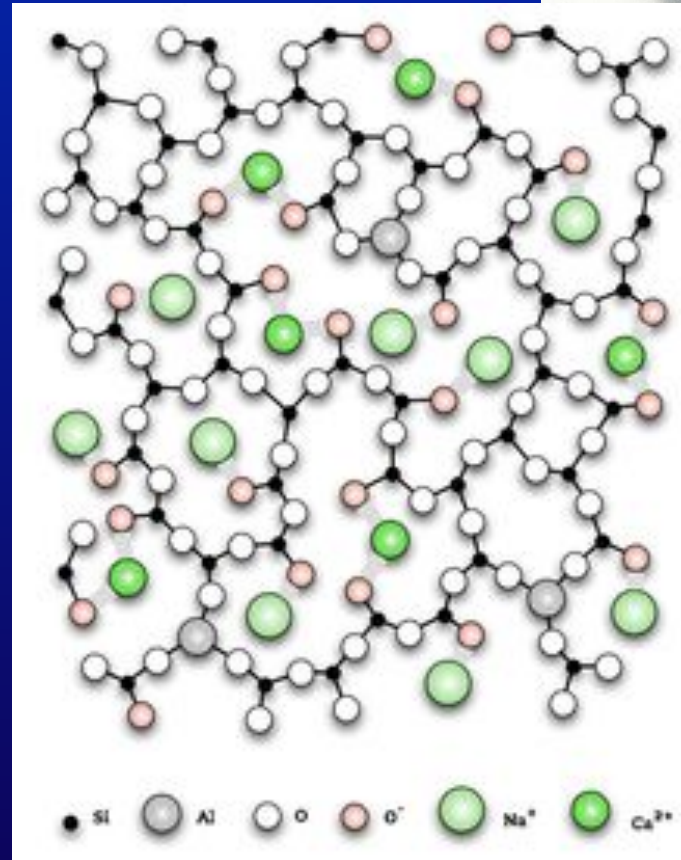
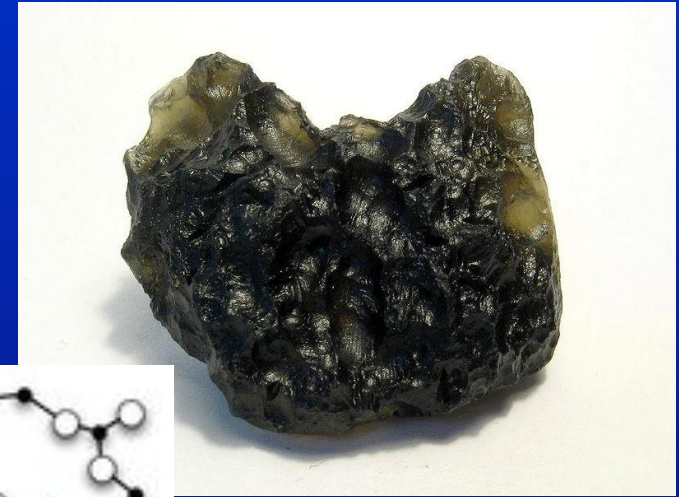
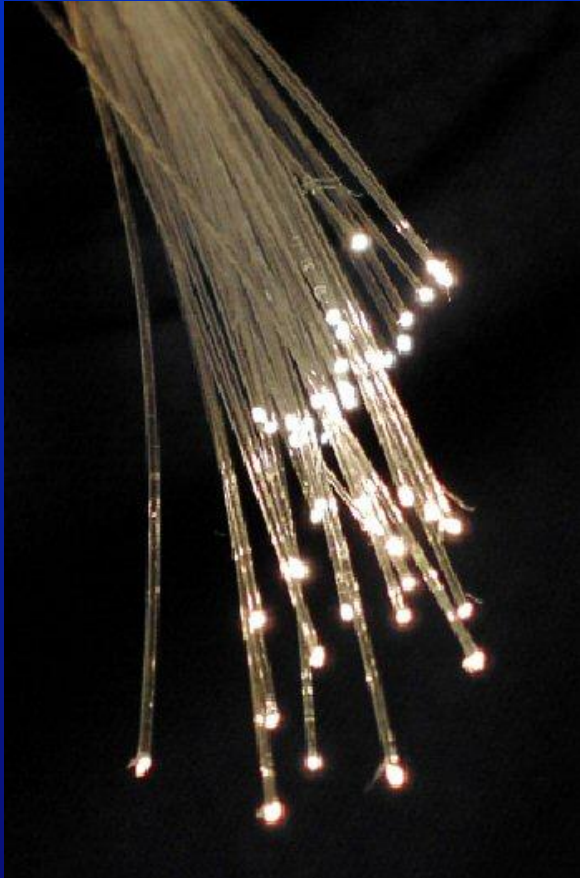
\*



# STRUKTURA KRYSTALICZNA



# STRUKTURA KRystaliczna



\*



# STRUKTURA KRystaliczna

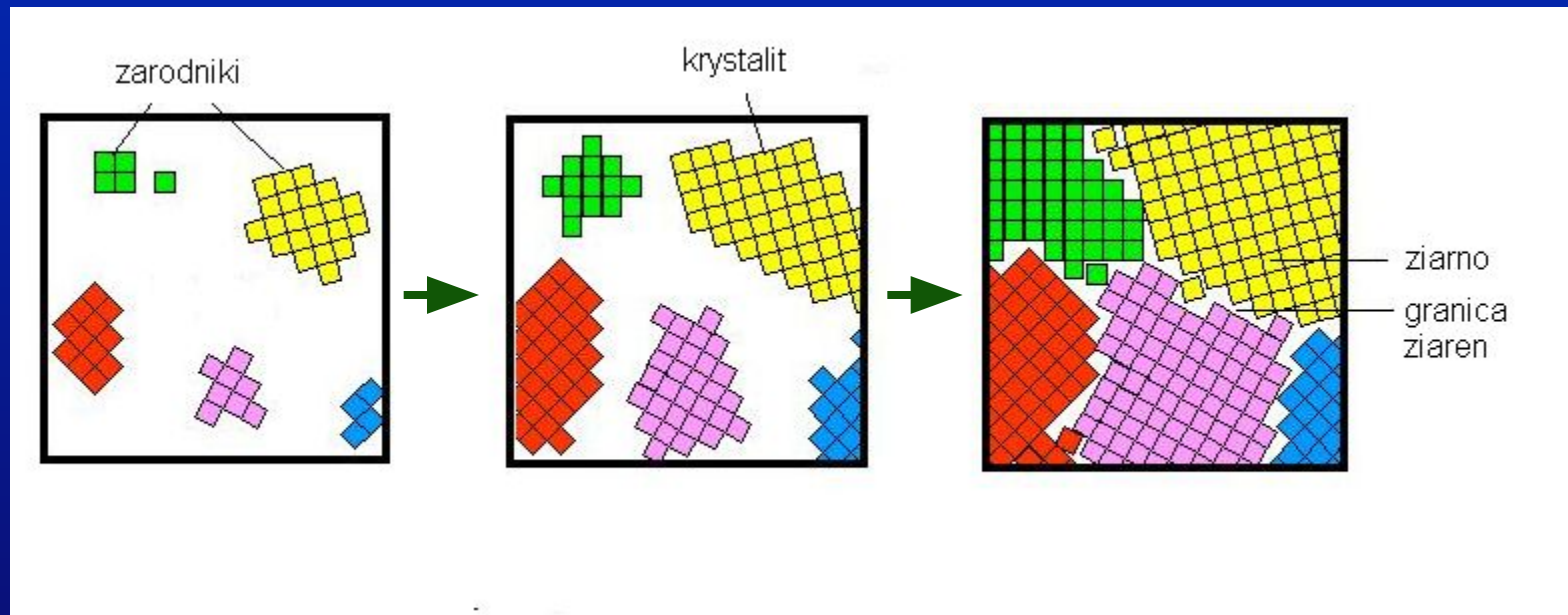


\*

# STRUKTURA KRYSTALICZNA

## PROCESY ZESTALANIA CIECZY:

### 1. ZESTALANIE POPRZEZ KRYSTALIZACJĘ



### 2. ZESTALANIE POPRZEZ SZYBKĄ WZROST LEPKOŚCI CIECZY

# IZOTROPIA i ANIZOTROPIA

**Anizotropia** (*an-* 'nie'; gr. *isos* 'równy, jednakowy'; gr. *trópos* 'zwrot, obrót') – zależność od kierunku. Wykazywanie odmiennych właściwości (np. rozszerzalność termiczna, przewodnictwo elektryczne, współczynnik załamania światła, szybkość wzrostu i rozpuszczania kryształu) w zależności od kierunku. Przeciwnościem anizotropii jest **izotropowość**.

Kryształ jest anizotropowy ze względu na rozpatrywaną własność.

Wielkości niezależne od kierunku: masa, objętość -> gęstość

Od kierunku pomiaru mogą zależeć:

- przewodność elektryczna,
- przewodnictwo cieplne,
- polaryzacja dielektryka pod wpływem pola elektrycznego (podatność dielektryczna),
- zmiana indukcji magnetycznej w para- i diamagnetykach pod wpływem pola magnetycznego (przenikalność para- i diamagnetyczna),
- polaryzacja kryształu wywołana przez naprężenia mechaniczne (piezoelektryczność),
- odkształcenie spowodowane działaniem naprężenia mechanicznego (sprężystość),
- dwójłomność pod wpływem pola elektrycznego (zjawisko elektrooptyczne) lub naprężenia (zjawisko elastooptyczne).

\*



# IZOTROPIA i ANIZOTROPIA

Materiał izotropowy:

$$j_1 = \sigma E_1, \quad j_2 = \sigma E_2, \quad j_3 = \sigma E_3$$

Kryształ anizotropowy:

$$j_1 = \sigma_{11} E_1 + \sigma_{12} E_2 + \sigma_{13} E_3$$

$$j_2 = \sigma_{21} E_1 + \sigma_{22} E_2 + \sigma_{23} E_3$$

$$j_3 = \sigma_{31} E_1 + \sigma_{32} E_2 + \sigma_{33} E_3$$

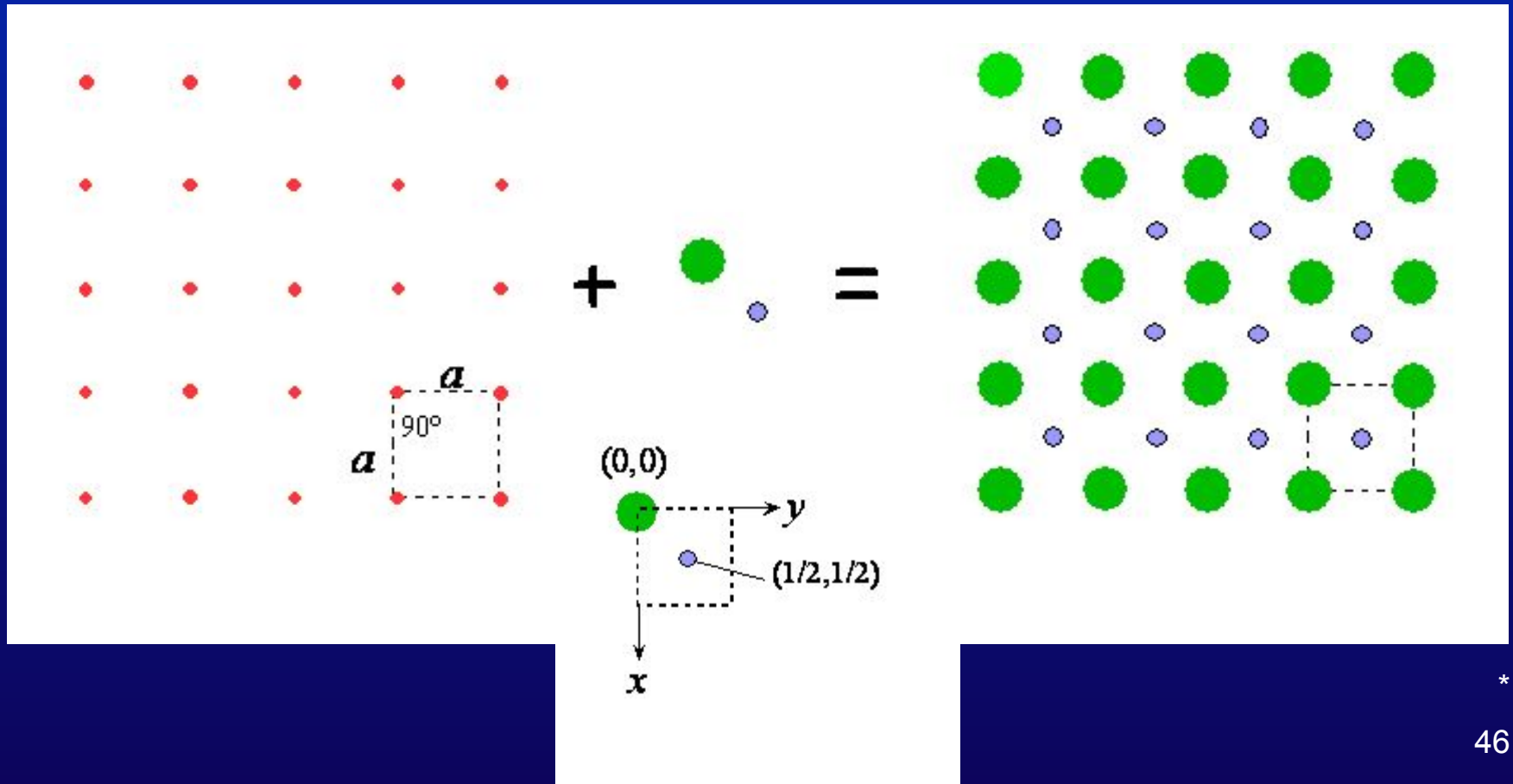
$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

# STRUKTURA KRYSTALICZNA

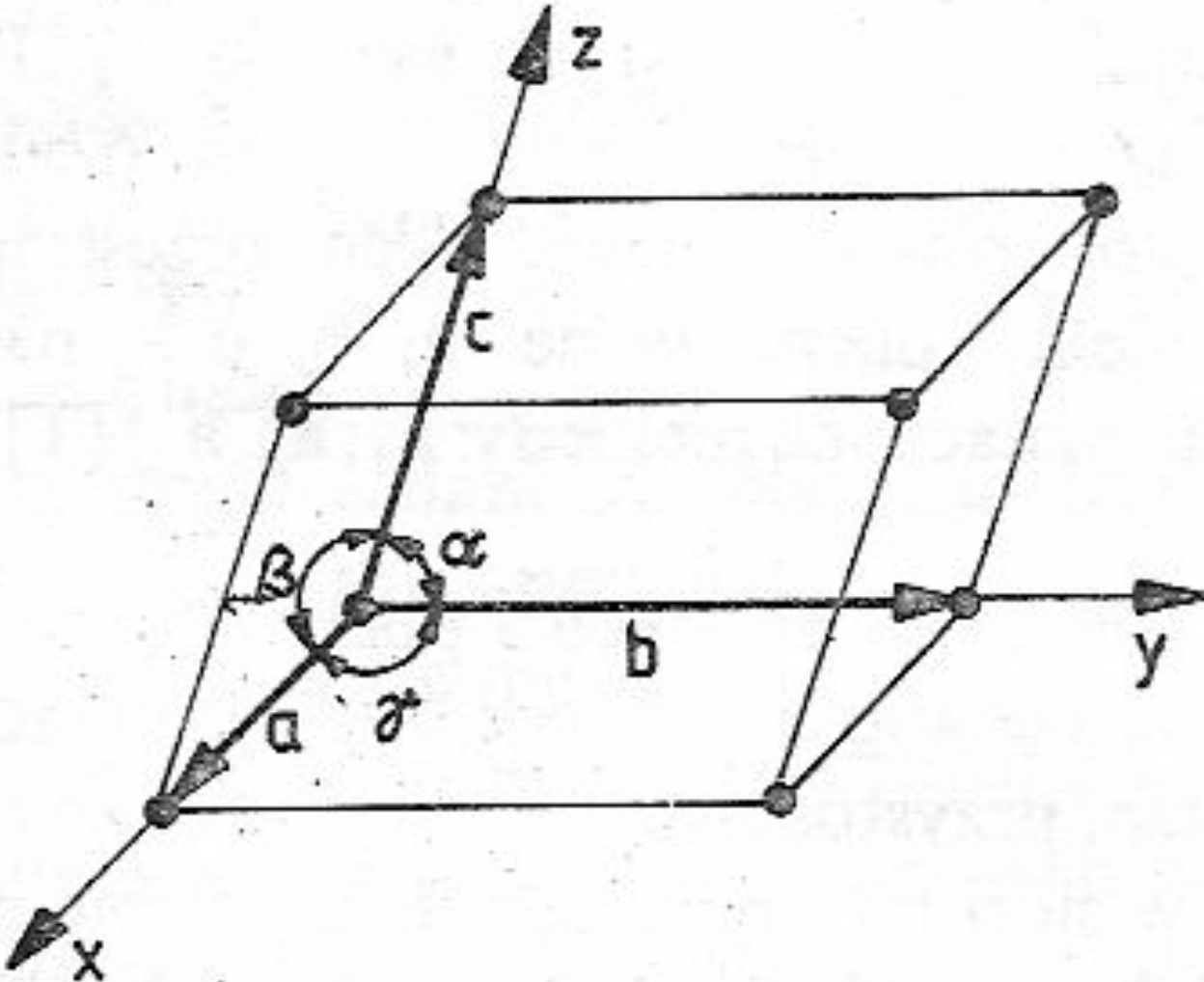
## SIEĆ + BAZA = STRUKTURA KRYSTALICZNA

**sieć** – regularny i periodyczny układ punktów w przestrzeni

**baza** – powtarzana grupa atomów



# SIECI KRYSTALICZNE



Karol Radecki i wsp., „Materiały i elementy elektroniczne bierne”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991

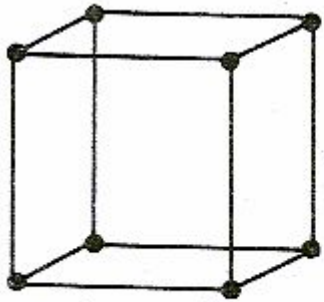
Sieciowa elementarna komórka ukośnokątna

\*

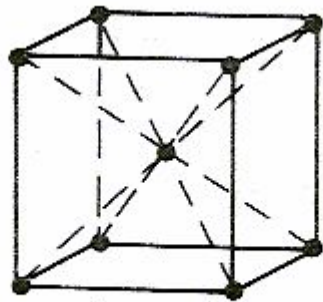
# OPIS STRUKTURY KRYSTALICZNEJ

- **Parametry komórki elementarnej;**
- **Liczba koordynacyjna** – ilość sąsiadów dla każdego atomu w sieci;
- **Odległość pomiędzy dwoma najbliższymi atomami w kryształach** – zawiera się w zakresie od 0,1 nm (1 Å ) dla kryształów prostych do ok. 2 nm dla kryształów złożonych;
- **Liczba atomów tworzących komórkę elementarną;**
- **Współczynnik upakowania** – stosunek objętości zajmowanej przez atomy (modelowane jako kulki) do całkowitej objętości kryształu.

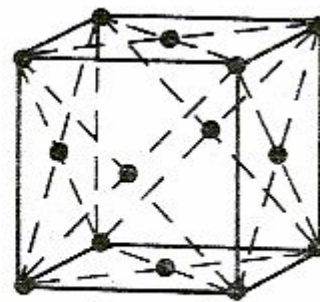
# SIECI KRYSZTALICZNE



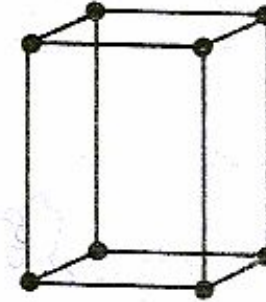
regularna P



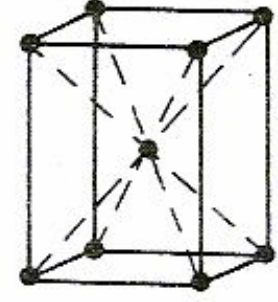
regularna I



regularna F



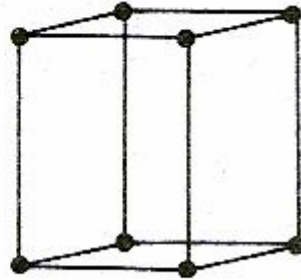
tetragonalna P



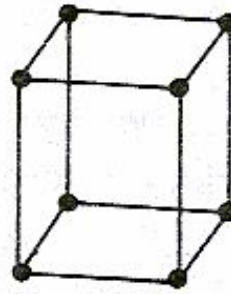
tetragonalna I



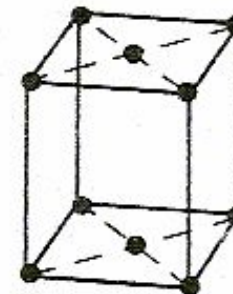
romboedryczna R



heksagonalna P



jednoskośna P



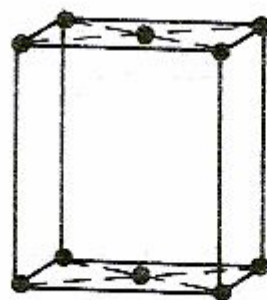
jednoskośna C



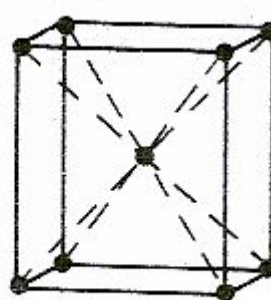
trojskośna P



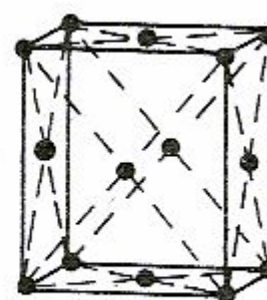
rombowa P



rombowa C



rombowa I



rombowa F

Sieci przestrzenne

**Bravais'go**

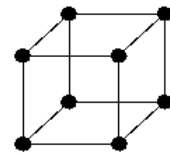
\*

# UNIT CELL GEOMETRY

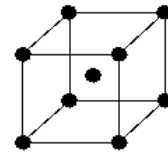
## CUBIC SYSTEM

$$a = b = c \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

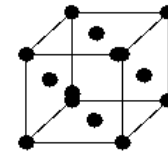
Many metals, Al, Cu, Fe, Pb. Many ceramics and semiconductors, NaCl, CsCl, LiF, Si, GaAs



**Simple cubic**



**Body centered cubic**

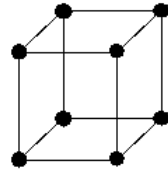


**Face centered cubic**

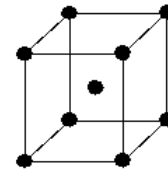
## TETRAGONAL SYSTEM

$$a = b \neq c \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

In, Sn, Barium Titanate,  $\text{TiO}_2$



**Simple tetragonal**

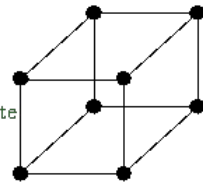


**Body centered tetragonal**

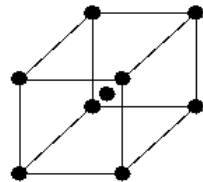
## ORTHORHOMBIC SYSTEM

$$a \neq b \neq c \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

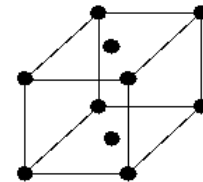
S, U, Pt, Ga ( $< 30^\circ\text{C}$ ), Iodine, Cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), Sodium Sulfate



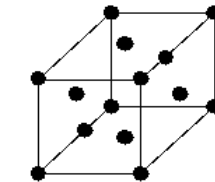
**Simple orthorhombic**



**Body centered orthorhombic**



**Base centered orthorhombic**

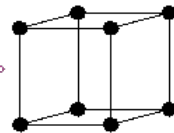


**Face centered orthorhombic**

## HEXAGONAL SYSTEM

$$a = b \neq c \quad \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$$

Cadmium, Magnesium, Zinc, Graphite



**Hexagonal**

## RHOMBOHEDRAL SYSTEM

$$a = b = c \quad \alpha = \beta = \gamma < 90^\circ$$

Arsenic, Boron, Bismuth, Antimony, Mercury ( $< -39^\circ\text{C}$ )

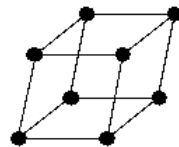


**Rhombohedral**

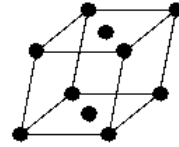
## MONOCLINIC SYSTEM

$$a \neq b \neq c \quad \alpha = \beta = 90^\circ; \gamma > 90^\circ$$

$\alpha$ -Selenium, Phosphorus, Lithium Sulfate, Tin Fluoride



**Simple monoclinic**

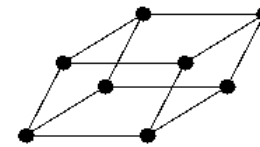


**Base centered monoclinic**

## TRICLINIC SYSTEM

$$a \neq b \neq c \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma < 90^\circ$$

Potassium dichromate



**Triclinic**

# WSKAŹNIKI MILLERA

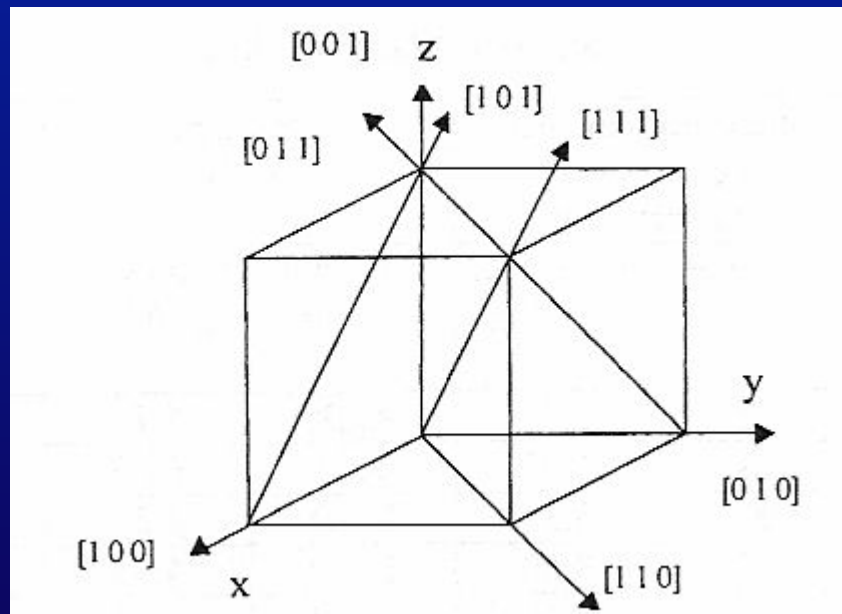
- **Wskaźniki węzłów**

$$x = m a, y = n b, z = p c$$

$$[[m \ n \ p]]$$

wewnątrz komórki – wartości ułamkowe

- **Wskaźniki kierunków**



prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych i węzeł (najbliższy)  $[[m \ n \ p]]$

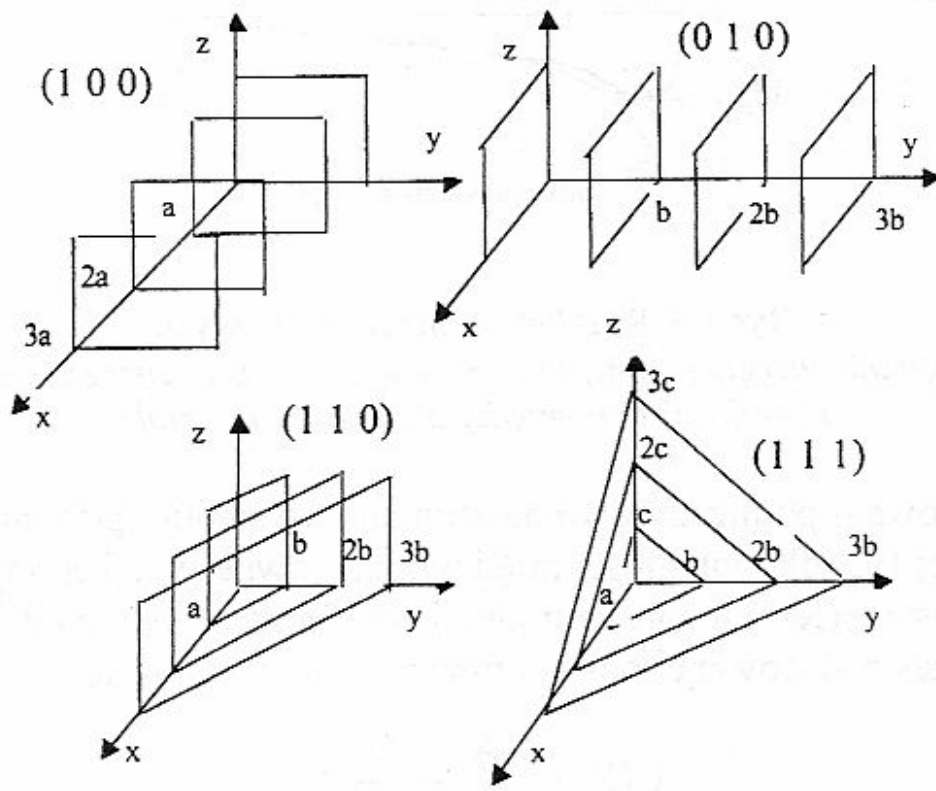
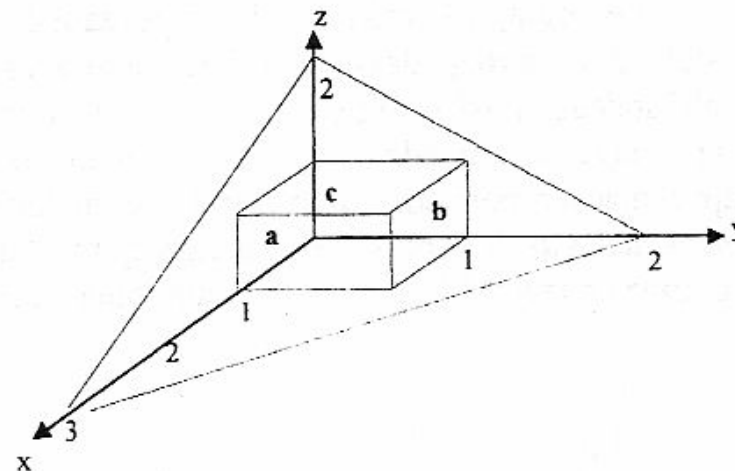
$$[m \ n \ p]$$



# WSKAŹNIKI MILLERA

Płaszczyzna (2 3 3)

- Przecina osie w  $3a, 2b, 2c$
- Odwrotności  $1/3, 1/2, 1/2$

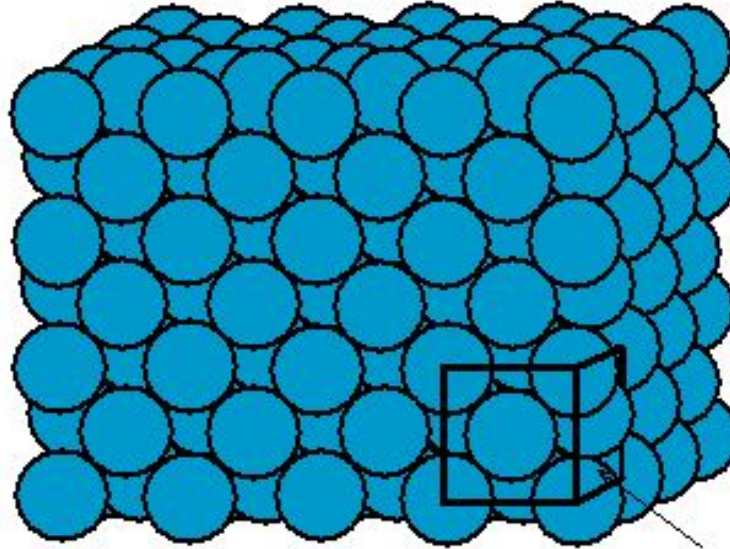


- Wsp. mianownik:  
 $2/6, 3/6, 3/6$
- Najmniejsze trzy liczby całkowite  
 $2\ 3\ 3$

\*



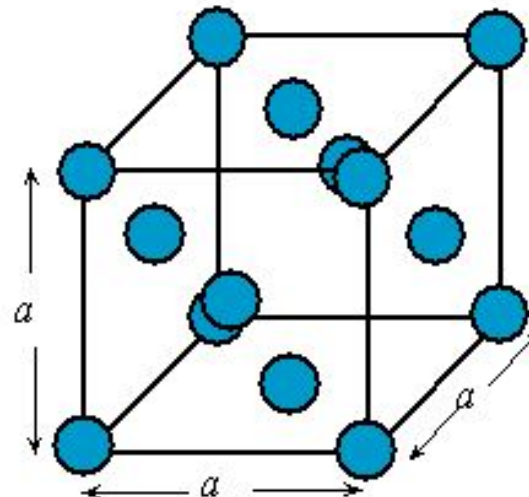
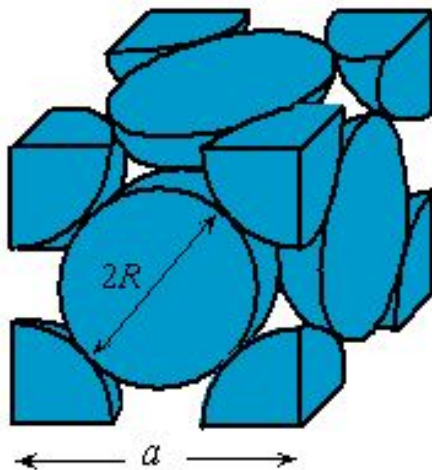
# SIECI KRYSTALICZNE



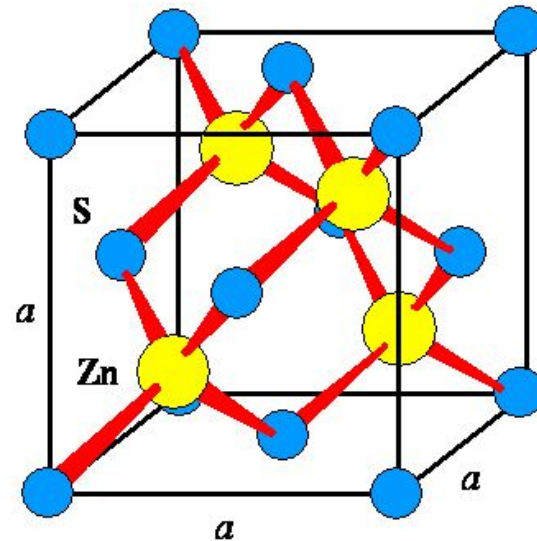
Ag, Al, Au, Ca, Cu,

$\gamma$ -Fe ( $>912^\circ\text{C}$ ), Ni, Pd, Pt, Rh

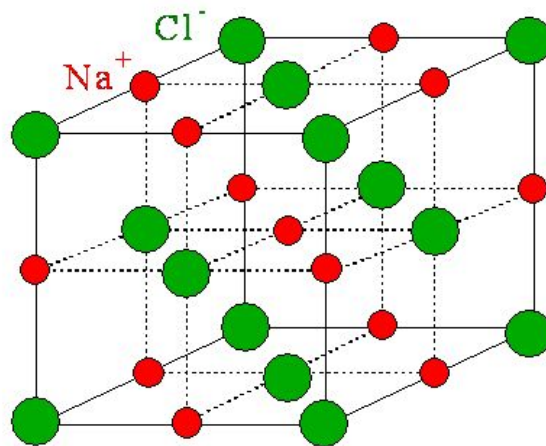
FCC Unit Cell



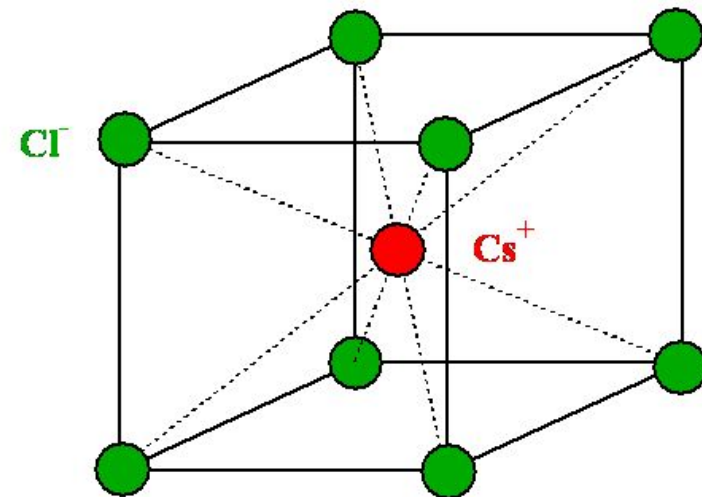
# SIECI KRystaliczne



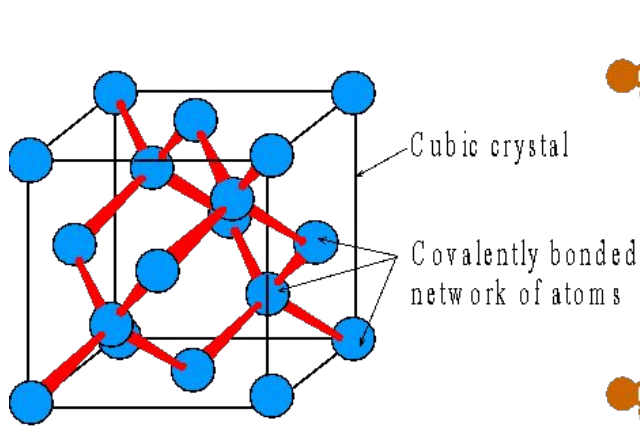
AlAs, GaAs, GaP, GaSb,  
InAs, InP, InSb, ZnS,



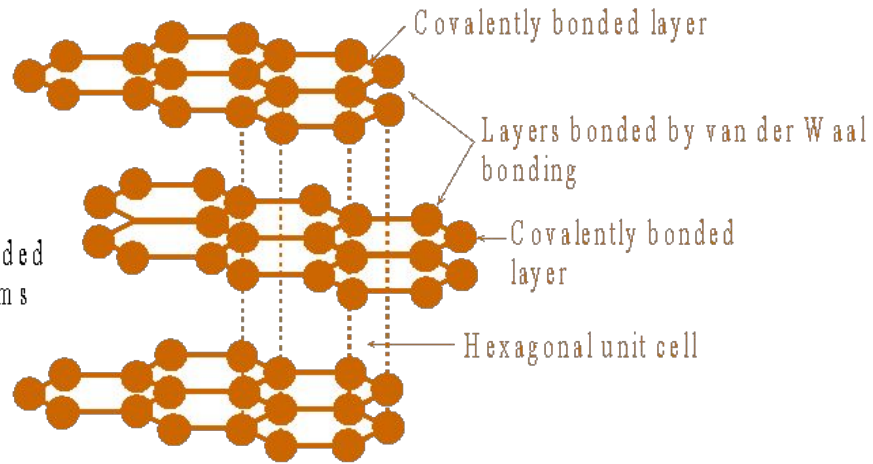
AgCl, CaO, CsF, LiF, LiCl,  
NaF, NaCl, KF, KCl, MgO



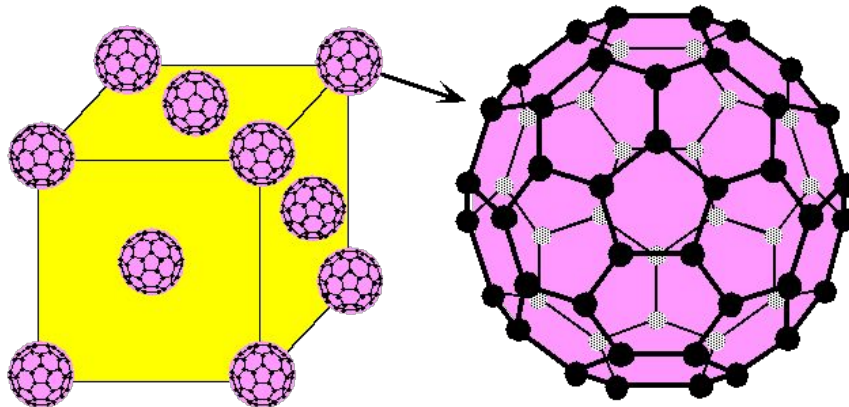
CsCl, CsBr, CsI, TlCl, TlBr, TlI.



(a) Diamond unit cell



(b) Graphite



The FCC unit cell of the Buckminsterfullerene crystal. Each lattice point has a  $C_{60}$  molecule

Buckminsterfullerene ( $C_{60}$ ) molecule (the "buckyball" molecule)

(c) Buckminsterfullerene

# ALLOTROPIA

## Porównanie krystalicznych odmian alotropowych węgla

	grafit	diament	fulleren C <sub>60</sub>
struktura wiązań	Wiązania kowalencyjne wewnątrz warstw. Wiązania Van der Waals pomiędzy warstwami. Heksagonalna komórka podstawowa.	Sieć z wiązaniami kowalencyjnymi. Struktura krystaliczna diamentu.	Sferoidalne molekuly C <sub>60</sub> związane wewnątrz wiązaniami kowalencyjnymi i utrzymywana w sieci regularnej centrowanej powierzchniowo wiązaniami van der Waalsa.
właściwości elektryczne i temperaturowe	Dobry przewodnik elektryczny. Przewodność cieplna podobna do metali.	Bardzo dobry dielektryk. Znakomity przewodnik ciepła, ok. 5 razy lepszy niż srebro.	Półprzewodnik. W połączeniu z metalami alkalicznymi (np. K <sub>3</sub> C <sub>60</sub> ) wykazuje nadprzewodność.
właściwości mechaniczne	Składnik smarów. Silnie anizotropowe właściwości. Grafit objętościowy: Y = 27 GPa, ρ = 2.25 g cm <sup>-3</sup>	Najtwardszy stosowany materiał. Y = 827 GPa, ρ = 3.5 g cm <sup>-3</sup>	Miękki. Y = 18 GPa, ρ = 1.65 g cm <sup>-3</sup>
uwagi	Odmiana alotropowa stabilna w ciśnieniu atmosferycznym.	Odmiana powstająca przy wysokim ciśnieniu.	Wytwarzany w warunkach laboratoryjnych. Pojawia się w sadzach po częściowym spalaniu
zastosowania	Tygle metalurgiczne, elementy grzejne, kontakty elektryczne.	Narzędzia tnące, pokrycia wietel, ostrz, itp. Biżuteria. Odprowadzanie ciepła z układów scalonych. W przyszłości możliwe zastosowania jako półprzewodniki (układy w.cz.i wysokiej mocy).	W przyszłości możliwe zastosowania jako półprzewodnik lub nadprzewodnik

(ρ - gęstość, Y – moduł sprężystości Younga )

# DEFEKTY SIECI KRYSTALICZNYCH

- **Defekty powierzchniowe**

powierzchnie zewnętrzne, powierzchnie wewnętrzne, granice ziaren, itp.

- **Defekty liniowe**

dyslokacje

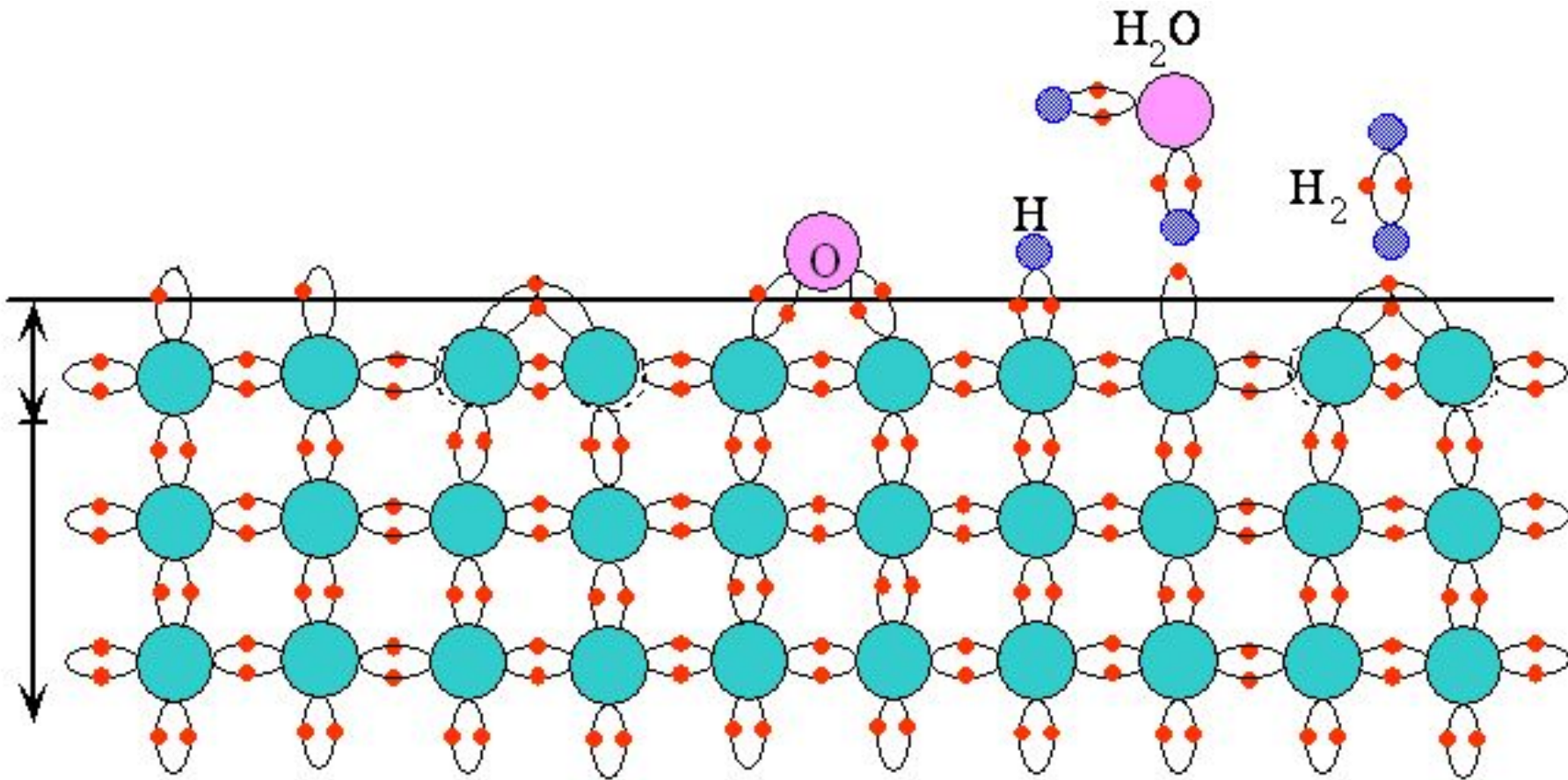
- **Defekty punktowe**

luki, atomy międzywęzłowe, atomy domieszkowe, atomy substytucyjne, atomy zanieczyszczeń

- **Drgania cieplne atomów**

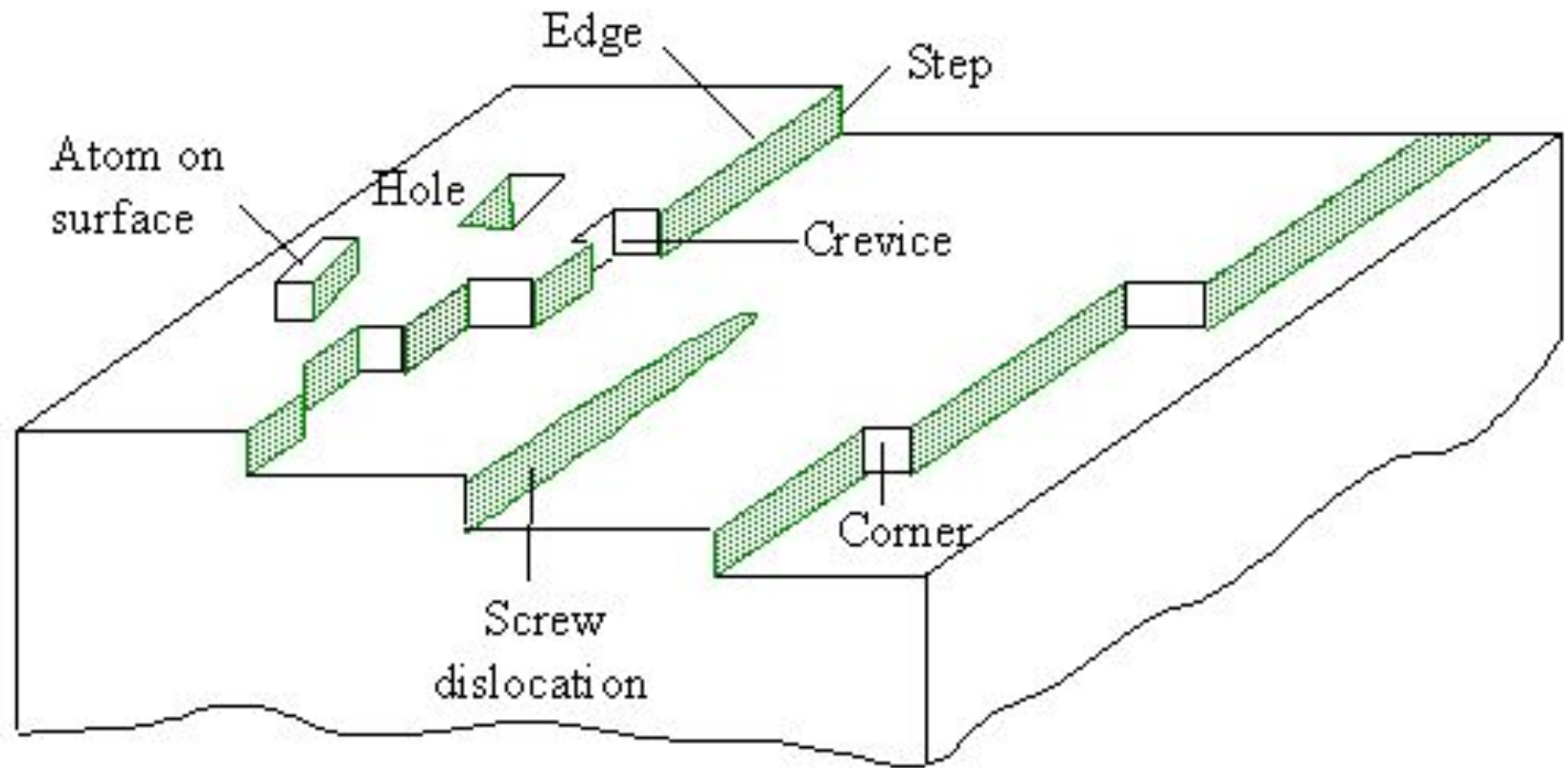


# DEFEKTY POWIERZCHNIOWE



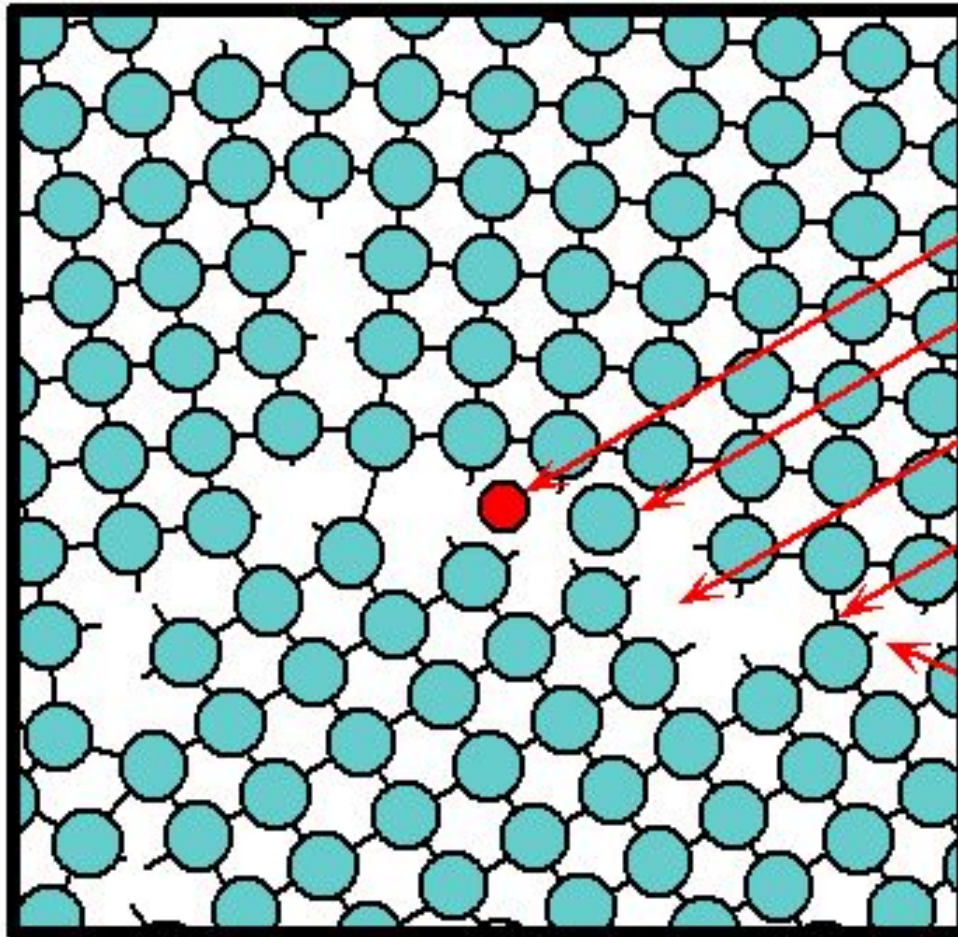
From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>

# DEFEKTY POWIERZCHNIOWE



From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.USask.Ca>

# DEFEKTY POWIERZCHNIOWE



obcy atom

niezwiązany atom

wolna przestrzeń

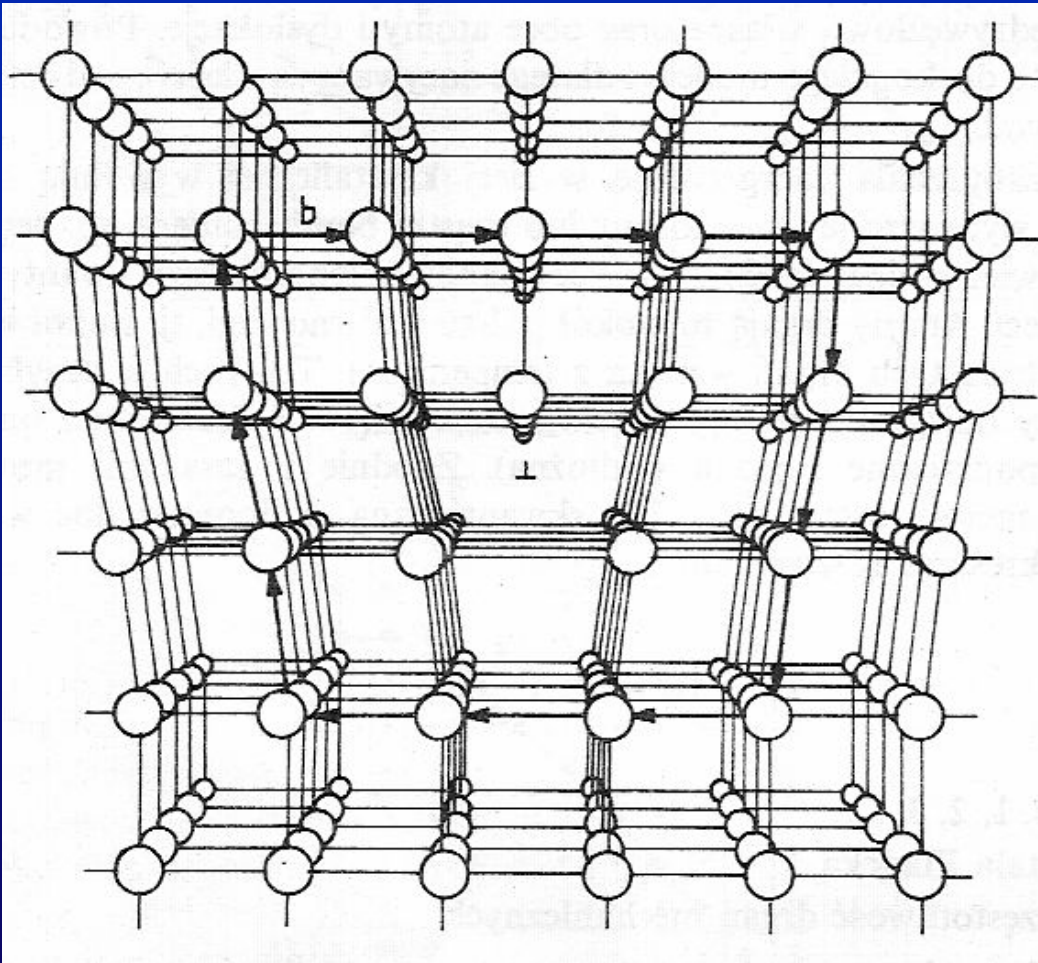
„naprężone” wiązanie

granica ziarna

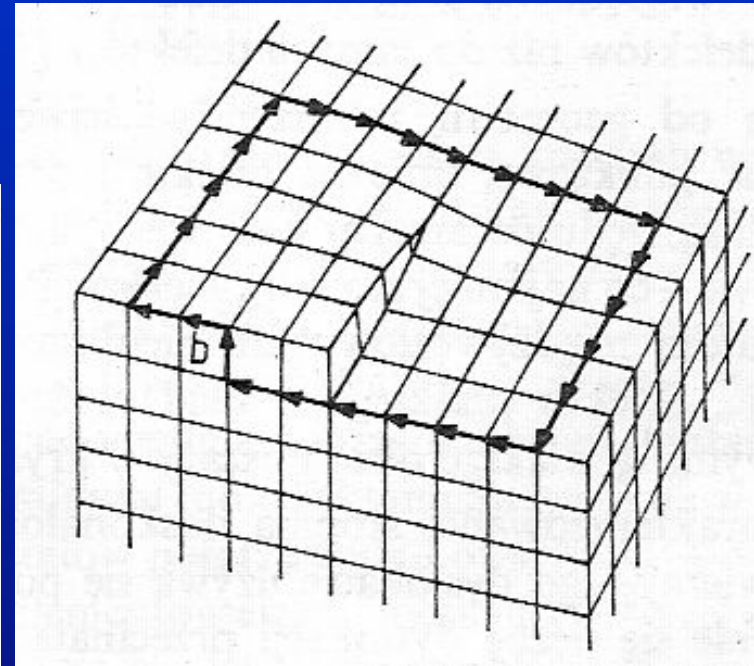
„nieobsadzone” wiązanie



# DEFEKTY LINIOWE

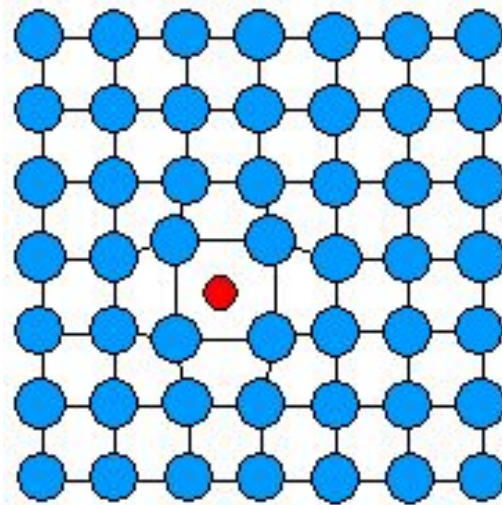
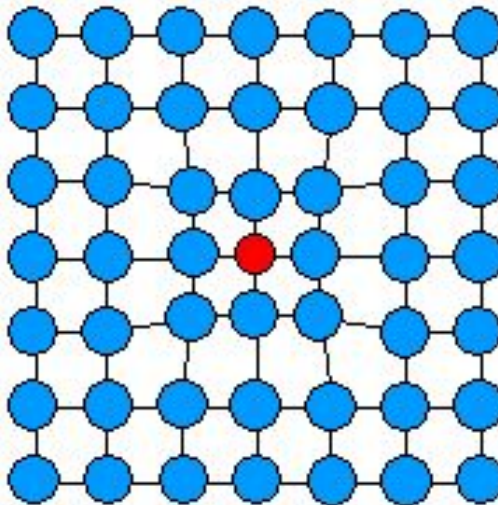
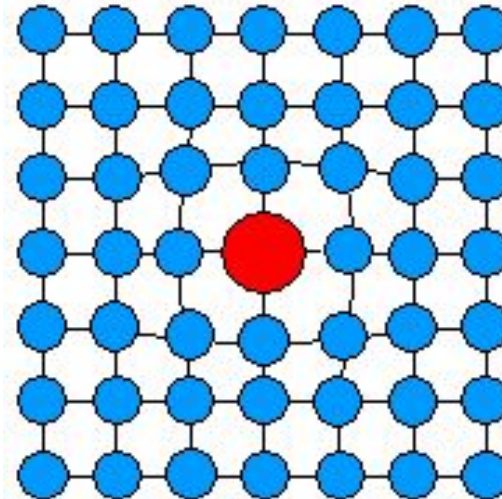
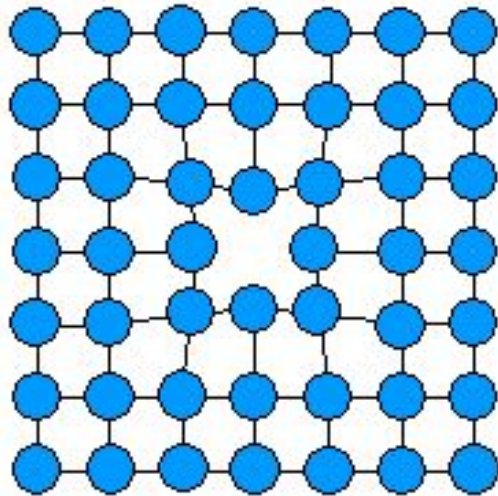


Model dyslokacji krawędziowej



Model dyslokacji śrubowej

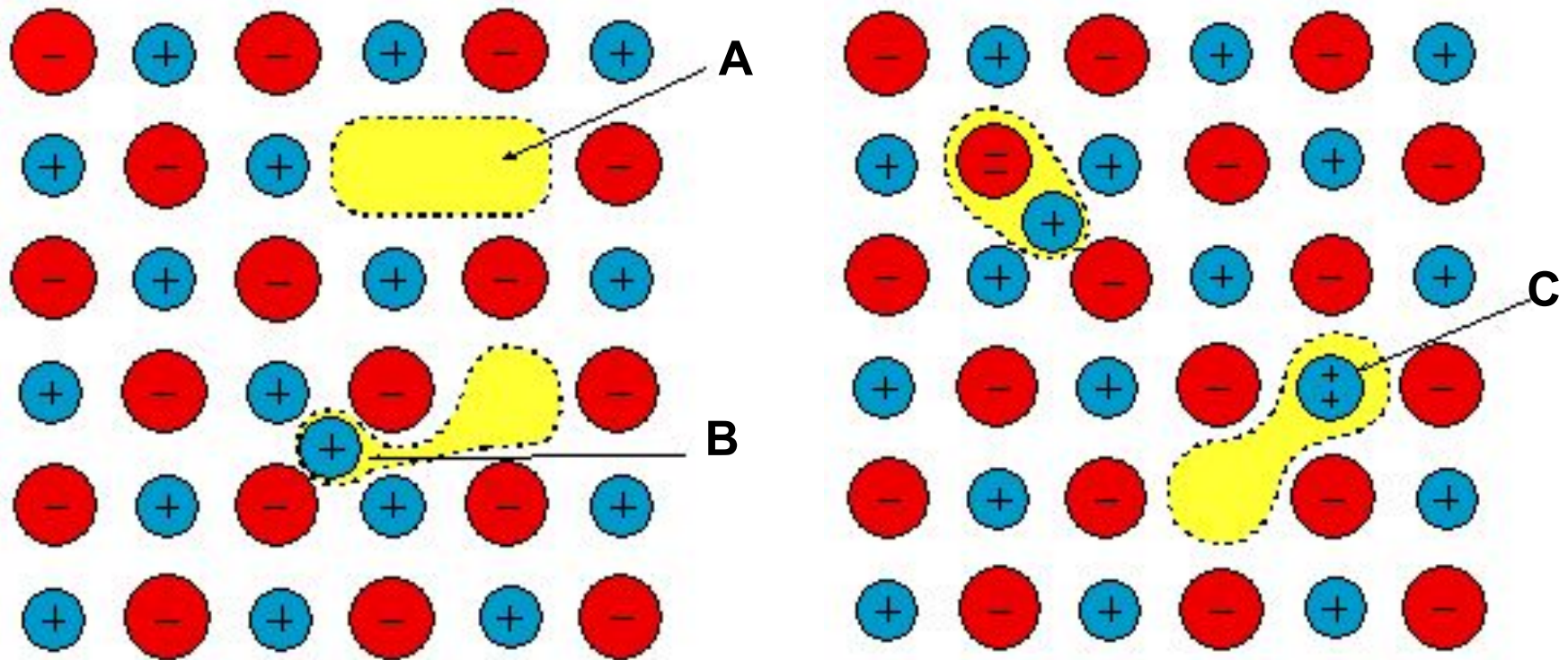
# DEFEKTY PUNKTOWE



\*



# DEFEKTY PUNKTOWE



A – defekt Schottky'ego, B – defekt Frenkla, C - podstawienie

