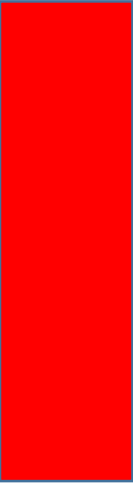


Materiały i przyrządy półprzewodnikowe



Wykład 1: Półprzewodniki – ogólna charakterystyka

Paweł Wójcik



Literatura:

1. S. M. Sze, Kwok K Ng, „Physics of Semiconductor Devices”
2. M. Balkanski, R. F. Wallis, „Semiconductor Physics and Applications”
3. H. Wolf, „Półprzewodniki”
4. D. A. Neamen, „Semiconductor Physics and devices”
5. M. S. Tyagi, „Semiconductor Physics and Devices”
6. W. Marciniak, „Przyrządy półprzewodnikowe”
7. Ferry, Goodnick, Bird, „Transport in nanostructures”
8. S. Datta, „Electronic transport in mesoscopic system”



Plan wykładu:

1. Cechy materiałów półprzewodnikowych
2. Przegląd materiałów półprzewodnikowych
3. Struktura krystalograficzna i wiązania chemiczne
4. Zastosowania materiałów półprzewodnikowych
5. Metody wytwarzania materiałów półprzewodnikowych

Cechy charakterystyczne półprzewodników

1. Zachowanie nieomowe, czyli opór elektryczny półprzewodników (na ogół) nie podlega prawu Ohma.

$$R \neq \frac{U}{I}$$

2. Silny wpływ domieszek na własności elektryczne.
3. Nośniki prądu posiadają ładunek ujemny (elektrony) jak i dodatni (dziury).
4. Duża siła termoelektryczna.
5. Duża czułość na światło – powstanie napięcia oraz zmiana oporu pod wpływem światła.

Klasyfikacja materiałów według oporu elektrycznego

Krótkie przypomnienie

Prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I}$$

Opór elektryczny i opór właściwy

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Przewodnictwo właściwe

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Różniczkowe prawo Ohma

$$j = \sigma E$$

Opór właściwy w temperaturze pokojowej (T=300 K)

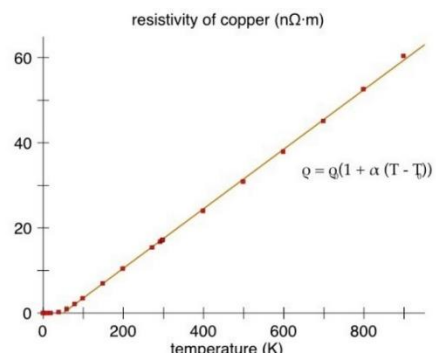
Kategoria	$\rho(\Omega m)$
Izolator	$> 10^8$
Półprzewodnik	$10^{-6} - 10^8$
Metal	$< 10^{-6}$

Bardzo szeroki zakres zmian oporu właściwego – 14 rzędów wielkości

Classification	Material	$\rho (\Omega m)$
conductors	silver	1.6×10^{-8}
	copper	1.7×10^{-8}
	aluminium	2.7×10^{-8}
	iron	10×10^{-8}
Semiconductors	germanium	0.46
	silicon	2300
Insulators	glass	$10^{10} - 10^{14}$
	wood	$10^8 - 10^{11}$
	quartz	10^{13}
	rubber	$10^{13} - 10^{16}$

Zależność temperaturowa oporu właściwego

Metale

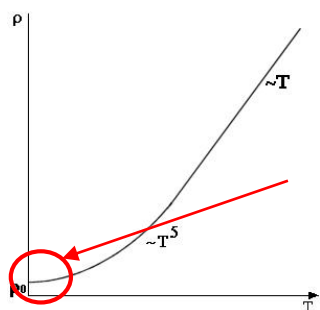


$$\rho(T) = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

α - temperaturowy współczynnik oporu ($\alpha > 0$)
 ρ_0 - opór właściwy w temperaturze $T_0 = 290 - 300K$

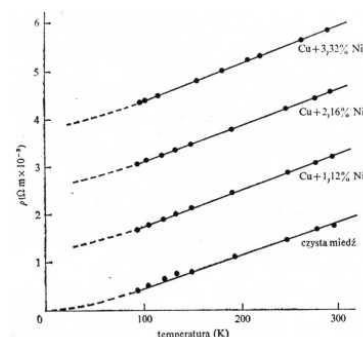
Główny wkład do oporu metalu pochodzi od rozpraszania elektronów na drgających jonach sieci krystalicznej.

Przyczyną liniowego wzrostu oporu wraz z temperaturą jest liniowy wzrost amplitudy drgań jonów wokół położenia równowagi

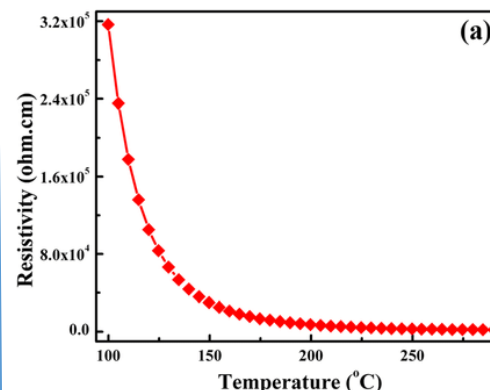


Opór reszkowy.

Inne defekty tj. wakanse, dyslokacje, domieszki, itd



Półprzewodniki



$$\rho(T) = \rho_0 \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad A > 0$$

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

Energia aktywacji E_a

$$E_a = \begin{cases} E_g & \text{- samoistny} \\ E_c^{min} - E_D & \text{- domieszkowany typu n} \\ E_v^{max} - E_A & \text{- domieszkowany typu p} \end{cases}$$

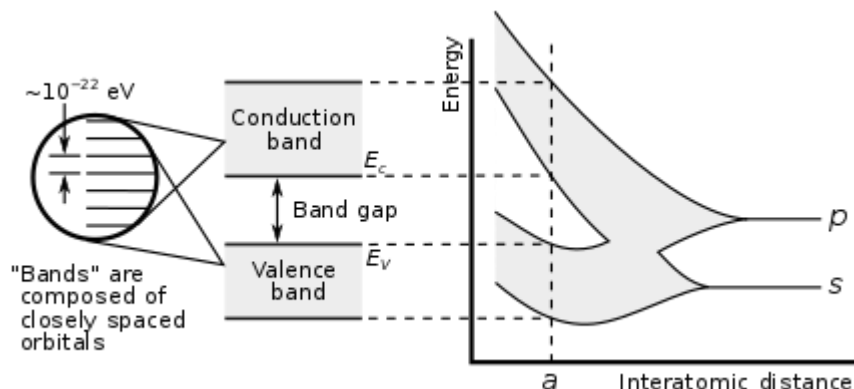
E_D - Energia poziomu donorowego,
 E_A - Energia poziomu akceptorowego,

Przyczyną wykładniczego wzrostu przewodności właściwej jest wzrost liczby nośników w pasmie przewodnictwa zgodny z rozkładem Boltzmanna $N(E) = \exp(-E_a/k_B T)$.

Dla niskich temperatur $T \rightarrow 0$ $\rho_0 = \begin{cases} 0 \\ \rho_0^{domieszk} \end{cases}$

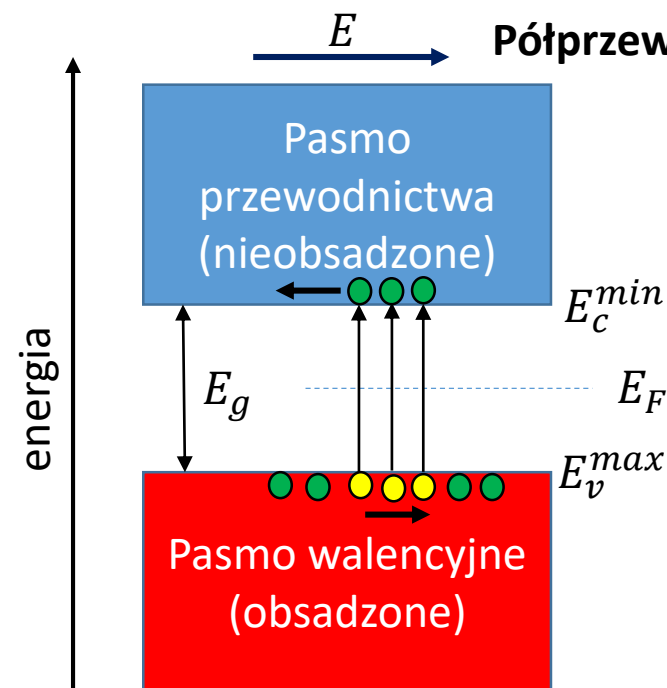
Struktura pasmowa – ilustracja poglądowa

Co się dzieje jak zbliżamy atomy ?



Schematyczna struktura pasmowa w półprzewodniku

Stany elektronów walencyjnych w atomach tworzą w kryształach elektronowe **pasmo walencyjne**. Kolejne wzbudzone stany atomowe (nieobsadzone w stanie podstawowym) tworzą **pasmo przewodnictwa**

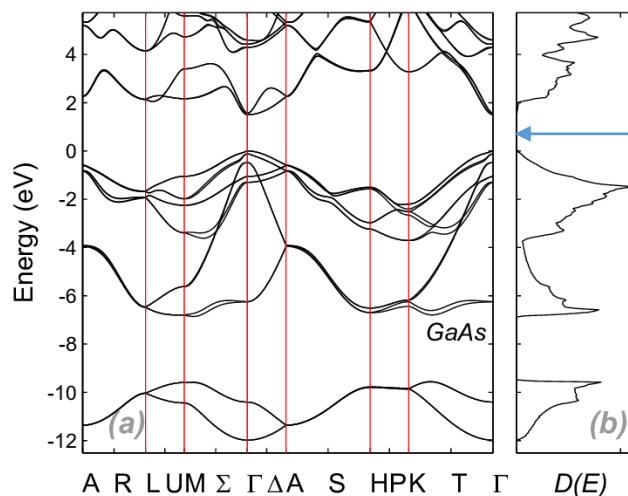


Półprzewodnik samoistny

Co to tłumaczy:

1. Wykładniczy wzrost oporu od temperatury. Gdy $E_g \approx k_B T$ następują przeskoki elektronów z pasma przewodnictwa do walencyjnego
2. Nośnikami prądu są zarówno ładunki dodatnie, jak i ujemne.

Obliczona struktura pasmowa GaAs

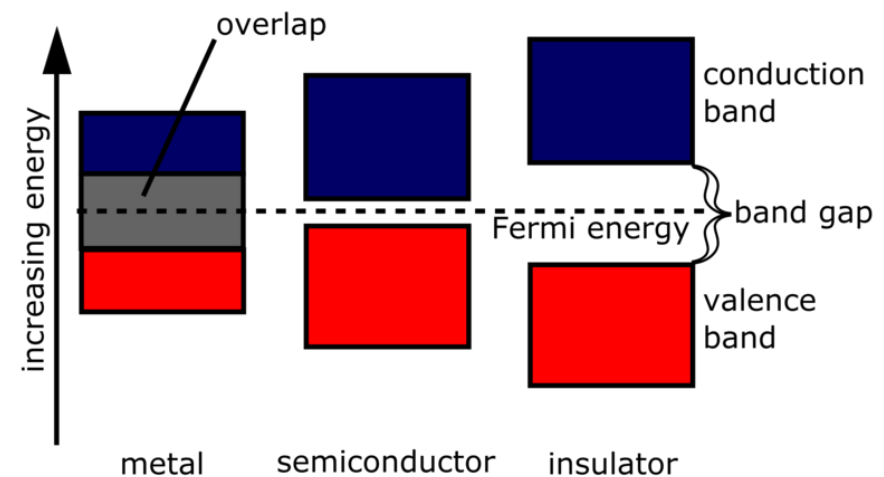


Przerwa energetyczna

Energie Fermiego E_F definiuje się jako maksymalną energię stanu jednoelektronowego obsadzonego w temperaturze $T=0$



Klasyfikacja materiałów według wielkości przerwy E_g



Wartości przerwy energetycznej niektórych półprzewodników

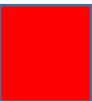
materiał	E_g [eV]
Ge	0.7
Si	1.1
GaAs	1.4
AlAs	2.1
CdS	2.6
ZnSe	2.8
GaN	3.5
AgBr	2.68
AgCl	3.35
NaCl	8.5
KCl	8.5
LiF	11.0

Kategoria	E_g (eV)
Metal	$E_g < 0, E_F \in \text{pasmo przewodnictwa}$
Półprzewodnik	$0 < E_g < \sim 3 \text{ eV}, E_v^{max} < E_F < E_c^{min}$
Izolator	$E_g > 3 \text{ eV}, E_v^{max} < E_F < E_c^{min}$

Dla porównania zakres promieniowania widzialnego

$$1,5 \text{ eV} < h\nu_{\text{widzialne}} < 3 \text{ eV},$$

Umowna granica $E_g = 3 \text{ eV}$ oznacza, że półprzewodniki są nieprzeźroczyste dla promieniowania nadfioletowego, a dielektryki stają się przeźroczyste dla tego promieniowania



Przegląd materiałów półprzewodnikowych

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

GROUP

1

IA

1

1.0079

H

HYDROGEN

2

IIA

4

9.0122

Be

BERYLLIUM

3

IIIB

13

10.811

B

BORON

5

IIIA

11

22.990

Na

SODIUM

12

IIA

12

24.305

Mg

MAGNESIUM

19

IB

39

39.098

K

POTASSIUM

20

IIA

40

40.078

Ca

CALCIUM

21

IIIB

41

44.956

Sc

SCANDIUM

22

IVB

42

47.867

Ti

TITANIUM

23

VB

43

50.942

V

VANADIUM

24

VIB

44

51.996

Cr

CHROMIUM

25

VIB

45

54.938

Mn

MANGANESE

26

VIB

46

55.845

Fe

IRON

27

VIB

47

58.933

Co

COBALT

28

VIB

48

58.693

Ni

NICKEL

29

IB

49

63.546

Cu

COPPER

30

IB

50

65.39

Zn

ZINC

31

IIIB

51

69.723

Ga

GALLIUM

32

IVB

52

72.64

Ge

GERMANIUM

33

V

53

74.922

As

ARSENIC

34

VIA

54

78.96

Se

SELENIUM

35

VIA

55

79.904

Br

BROMINE

36

VIA

56

83.80

Kr

KRYPTON

37

IB

57

85.468

Rb

RUBIDIUM

38

IIA

58

87.62

Sr

STRONTIUM

39

IIIB

59

88.906

Y

YTTORIUM

40

IVB

60

91.224

Zr

ZIRCONIUM

41

VB

61

92.906

Nb

NIوبيUM

42

VIB

62

95.94

Mo

MOLYBDENUM

43

VIB

63

(98)

Tc

TECHNETIUM

44

VIB

64

101.07

Ru

RUTHENIUM

45

VIB

65

102.91

Rh

RHODIUM

46

VIB

66

106.42

Pd

PALLADIUM

47

IB

67

107.87

Ag

SILVER

48

IB

68

112.41

Cd

CADMIUM

49

IIIB

69

114.82

In

INDIUM

50

IVB

70

118.71

Sn

TIN

51

V

71

121.76

Sb

ANTIMONY

52

VIA

72

127.60

Te

TELLURIUM

53

VIA

73

126.90

I

IODINE

54

VIA

74

131.29

Xe

XENON

55

IB

75

132.91

Cs

CAESIUM

56

IIA

76

137.33

Ba

BARIUM

57-71

IIIB

72

178.49

Hf

HAFNIUM

73

IVB

74

180.95

Ta

TANTALUM

75

V

76

183.84

W

TUNGSTEN

77

VIB

78

186.21

Re

RHENIUM

79

VIB

79

196.97

Au

GOLD

80

IB

80

200.59

Hg

MERCURY

81

IIIB

81

204.38

Tl

THALLIUM

82

IVB

82

207.2

Pb

LEAD

83

V

83

208.98

Bi

BISMUTH

84

VIA

84

(209)

Po

POLONIUM

85

VIA

85

(210)

At

ASTATINE

86

VIA

86

(222)

Rn

RADON

87

IB

87

(223)

Fr

FRANCIUM

88

IIA

88

(226)

Ra

RADIUM

89-103

IIIB

90

(261)

Rf

RUTHERFORDIUM

91

IVB

91

(262)

Db

DUBNIUM

92

V

92

(266)

Sg

SEABORGIUM

93

VIB

93

(264)

Bh

BOHRNIUM

94

VIB

94

(277)

Hs

HASSIUM

95

VIB

95

(268)

Mt

MEITNERIUM

96

VIB

96

(281)

Uun

UNUNNIUM

97

IB

97

(272)

Uuu

UNUNUNIUM

98

IB

98

(285)

Uub

UNUNBIUM

99

IIIB

99

(289)

Uuq

UNUNQUADIUM

13

IIIA

13

10.811

B

BORON

14

IVA

14

12.011

C

CARBON

15

VA

15

14.007

N

NITROGEN

16

VIA

16

15.999

O

OXYGEN

17

VIA

17

18.998

F

FLUORINE

18

VIA

18

20.180

Ne

NEON

19

IB

19

22.990

Na

SODIUM

20

IIA

20

24.305

Mg

MAGNESIUM

21

IIIB

21

44.956

Sc

SCANDIUM

22

IVB

22

47.867

Ti

TITANIUM

23

V

23

50.942

V

VANADIUM

24

VIB

24

51.996

Cr

CHROMIUM

25

VIB

25

54.938

Mn

MANGANESE

26

VIB

26

55.845

Fe

IRON

27

VIB

27

58.933

Co

COBALT

28

VIB

28

58.693

Ni

NICKEL

29

IB

29

63.546

Cu

COPPER

30

IB

30

65.39

Zn

ZINC

31

IIIB

31

69.723

Ga

GALLIUM

32

IVB

32

72.64

Ge

GERMANIUM

33

V

33

74.922

As

ARSENIC

34

VIA

34

78.96

Se

SELENIUM

35

VIA

35

79.904

Br

BROMINE

36

VIA

36

83.80

Kr

KRYPTON

37

IB

37

85.468

Rb

RUBIDIUM

38

IIA

38

87.62

Sr

STRONTIUM

39

IIIB

39

88.906

Y

YTTORIUM

40

IVB

40

91.224

Zr

ZIRCONIUM

41

V

41

92.906

Nb

NIوبيUM

42

VIB

42

95.94

Mo

MOLYBDENUM

43

VIB

43

(98)

Tc

TECHNETIUM

44

VIB

44

101.07

Ru

RUTHENIUM

45

VIB

45

102.91

Rh

RHODIUM

46

VIB

46

106.42

Pd

PALLADIUM

47

IB

47

107.87

Ag

SILVER

48

IB

48

112.41

Cd

CADMIUM

49

IIIB

49

114.82

In

INDIUM

50

IVB

50

118.71

Sn

TIN

51

V

51

121.76

Sb

ANTIMONY

52

VIA

52

127.60

Te

TELLURIUM

53

VIA

53

126.90

I

IODINE

54

VIA

54

131.29

Xe

XENON

55

IB

55

132.91

Cs

CAESIUM

56

IIA

56

137.33

Ba

BARIUM

57-71

IIIB

57

178.49

Hf

HAFNIUM

72

IVB

72

180.95

Ta

TANTALUM

73

V

73

183.84

W

TUNGSTEN

74

VIB

74

186.21

Re

RHENIUM

75

VIB

75

196.97

Au

GOLD

76

IB

76

200.59

Hg

MERCURY

77

IIIB

77

204.38

Tl

THALLIUM

78

IVB

78

207.2

Pb

LEAD

79

V

79

208.98

Bi

BISMUTH

80

VIA

80

(209)

Po

POLONIUM

81

VIA

81

(210)

At

ASTATINE

82

VIA

82

(222)

Rn

RADON

83

IB

83

(223)

Fr

FRANCIUM

84

IIA

84

(226)

Ra

RADIUM

85-103

IIIB

85

(261)

Rf

RUTHERFORDIUM

86

IVB

86

(262)

Db

DUBNIUM

87

V

87

(266)

Sg

SEABORGIUM

88

VIB

88

(264)

Bh

BOHRNIUM

89

VIB

89

(277)

Hs

HASSIUM

90

VIB

90

(268)

Mt

MEITNERIUM

91

VIB

91

(281)

Uun

UNUNNIUM

92

IB

92

(272)

Uuu

UNUNUNIUM

93

IB

93

(285)

Uub

UNUNBIUM

94

IIIB

94

(289)

Uuq

UNUNQUADIUM

13

IIIA

13

10.811

B

BORON

14

IVA

14

12.011

C

CARBON

15

VA

15

14.007

N

NITROGEN

16

VIA

16

15.999

O

OXYGEN

17

VIA

17

18.998

F

FLUORINE

18

VIA

18

20.180

Ne

NEON

19

IB

19

22.990

Na

SODIUM

20

IIA

20

24.305

Mg

MAGNESIUM

21

IIIB

21

44.956

Sc

SCANDIUM

22

IVB

22

47.867

Ti

TITANIUM

23

V

23

50.942

V

VANADIUM

24

VIB

24

51.996

Cr

CHROMIUM

25

VIB

25

54.938

Mn

MANGANESE

26

VIB

26

55.845

Fe

IRON

27

VIB

27

58.933

Co

COBALT

28

VIB

28

58.693

Ni

NICKEL

29

IB

29

63.546

Cu

COPPER

30

IB

30

65.39

Zn

ZINC

31

IIIB

31

69.723

Ga

GALLIUM

32

IVB

32

72.64

Ge

GERMANIUM

33

V

33

74.922

As

ARSENIC

34

VIA

34

78.96

Se

SELENIUM

35

VIA

35

79.904

Br

BROMINE

36

VIA

36

83.80

Kr

KRYPTON

37

IB

37

85.468

Rb

RUBIDIUM

38

IIA

38

87.62

Sr

STRONTIUM

39

IIIB

39

88.906

Y

YTTORIUM

40

IVB

40

91.224

Zr

ZIRCONIUM

41

V

41

92.906

Nb

NIوبيUM

42

VIB

42

95.94

Mo

MOLYBDENUM

43

VIB

43

(98)

Tc

TECHNETIUM

44

VIB

44

101.07

Ru

RUTHENIUM

45

VIB

45

102.91

Rh

RHODIUM

46

VIB

46

106.42

Pd

PALLADIUM

47

IB

47

107.87

Ag

SILVER

48

IB

48

112.41

Cd

CADMIUM

49

IIIB

49

114.82

In

INDIUM

50

IVB

50

118.71

Sn

TIN

51

V

51

121.76

Sb

ANTIMONY

52

VIA

52

127.60

Te

TELLURIUM

53

VIA

53

126.90

I

IODINE

54

VIA

54

131.29

Xe

XENON

55

IB

55

132.91

Cs

CAESIUM

56

IIA

56

137.33

Ba

BARIUM

57-71

IIIB

57

178.49

Hf

HAFNIUM

72

IVB

72

180.95

Ta

TANTALUM

73

V

73

183.84

W

TUNGSTEN

74

VIB

74

186.21

Re

RHENIUM

75

VIB

75

196.97

Au

GOLD

76

IB

76

200.59

Hg

MERCURY

77

IIIB

77

204.38

Tl

THALLIUM

78

IVB

78

207.2

Pb

LEAD

79

V

79

208.98

Bi

BISMUTH

80

VIA

80

(209)

Po

POLONIUM

81

VIA

81

(210)

At

ASTATINE

82

VIA

82

(222)

Rn

RADON

83

IB

83

(223)

Fr

FRANCIUM

84

IIA

84

(226)

Ra

RADIUM

85-103

IIIB

85

(261)

Rf

RUTHERFORDIUM

86

IVB

86

(262)

Db

DUBNIUM

87

V

87

(266)

Sg

SEABORGIUM

88

VIB

88

(264)

Bh

BOHRNIUM

89

VIB

89

(277)

Hs

HASSIUM

90

VIB

90

(268)

Mt

MEITNERIUM

91

VIB

91

(281)

Uun

UNUNNIUM

92

IB

92

(272)

Uuu

UNUNUNIUM

93

IB

93

(285)

Uub

UNUNBIUM

94

IIIB

94

(289)

Uuq

UNUNQUADIUM

13

IIIA

13

10.811

B

BORON

14

IVA

14

12.011

C

CARBON

15

VA

15

14.007

N

NITROGEN

16

VIA

16

15.999

O

OXYGEN

17

VIA

17

18.998

F

FLUORINE

18

VIA

18

20.180

Ne

NEON

19

IB

19

22.990

Na

SODIUM

20

IIA

20

24.305

Mg

MAGNESIUM

21

IIIB

21

44.956

Sc

SCANDIUM

22

IVB

22

47.867

Ti

TITANIUM

23

V

23

50.942

V

VANADIUM

24

VIB

24

51.996

Cr

CHROMIUM

25

VIB

25

54.938

Mn

MANGANESE

26

VIB

26

55.845

Fe

IRON

27

VIB

27

58.933

Co

COBALT

28

VIB

28

58.693

Ni

NICKEL

29

IB

29

63.546

Cu

COPPER

30

IB

30

65.39

Zn

ZINC

31

IIIB

31

69.723

Ga

GALLIUM

32

IVB

32

72.64

Ge

GERMANIUM

33

V

33

74.922

As

ARSENIC

34

VIA

34

78.96

Se

SELENIUM

35

VIA

35

79.904

Br

BROMINE

36

VIA

36

83.80

Kr

KRYPTON

37

IB

37

85.468

Rb

RUBIDIUM

38

IIA

38

87.62

Sr

STRONTIUM

39

IIIB

39

88.906

Y

YTTORIUM

40

IVB

40

91.224

Zr

ZIRCONIUM

41

V

41

92.906

Nb

NIوبيUM

42

VIB

42

95.94

Mo

MOLYBDENUM

43

VIB

43

(98)

Tc

TECHNETIUM

44

VIB

44

101.07

Ru

RUTHENIUM

45

VIB

45

102.91

Rh

RHODIUM

46

VIB

46

106.42

Pd

PALLADIUM

47

IB

47

107.87

Ag

SILVER

48

IB

48

112.41

Cd

CADMIUM

49

IIIB

49

114.82

In

INDIUM

50

IVB

50

118.71

Sn

TIN

51

V

51

121.76

Sb

ANTIMONY

52

VIA

52

127.60

Te

TELLURIUM

53

VIA

53

126.90

I

IODINE

54

VIA

54

131.29

Xe

XENON

55

IB

55

132.91

Cs

CAESIUM

56

IIA

56

137.33

Ba

BARIUM

57-71

IIIB

57

178.49

Hf

HAFNIUM

72

IVB

72

180.95

Ta

TANTALUM

73

V

73

183.84

W

TUNGSTEN

74

VIB

74

186.21

Re

RHENIUM

7

Przegląd materiałów półprzewodnikowych

- 1. Pierwiastki grupy IV** – materiały (zwykle krystaliczne) o strukturze diamentu i wiązaniu kowalencyjnym. Każdy posiada czterech najbliższych sąsiadów (liczba koordynacyjna = 4), tworzących czworościan foremny (tetraedr), hybrydyzacja sp^3 . **Przykłady:** krzem (**Si**) – materiał obecnej i przyszłej elektroniki german (**Ge**) – materiał elektroniki przyszłości, szara cyna (**α -Sn**) – materiał raczej nie stosowany w elektronice.
- 2. Pierwiastki grupy V** - P, As, Sb (pierwiastki o liczbie koordynacyjnej = 3).
- 3. Pierwiastki grupy VI** - S, Se, Te (pierwiastki o liczbie koordynacyjnej = 2). Występują w różnych strukturach krystalicznych np. selen (Se) tworzy kryształy o strukturze jednoskośnej i trójskośnej, a ponadto występuje jako szkło.
- 4. Związki półprzewodnikowe III-V** - Przykłady: GaAs, AlAs, InP, InAs, GaP, InSb, GaN. Tworzą kryształy o wiązaniu mieszanym (kowalencyjno-jonowym) z dominującym wiązaniem kowalencyjnym i niewielką domieszką wiązania jonowego. Wykazują własności podobne do swoich odpowiedników z grupy IV., np. GaAs wykazuje pewne podobieństwo do Ge. Są to materiały obecnej i przyszłej elektroniki oraz optoelektroniki.

Przegląd materiałów półprzewodnikowych

- 5. Związki półprzewodnikowe II-VI** - Przykłady: ZnS, ZnO, ZnSe, CdS, CdSe, CdTe. Są to kryształy o wiązaniu mieszanym kowalencyjno-jonowym. Duża domieszka wiązania jonowego powoduje wzrost przerwy energetycznej (na ogół $E_g > 1$ eV). Wyjątkami są związki rtęci, np. dla HgTe, $E_g = 0$ (jest to tzw. półmetal).
- 6. Związki półprzewodnikowe I-VII** - Przykłady: CuCl, CuBr. Są to tzw. kryształy jonowe o typowym wiązaniu jonowym, które prowadzi do szerokiej przerwy energetycznej ($E_g > 3$ eV).
- 7. Związki IV-VI** - Przykłady: PbS, PbSe, PbTe.
- 8. Związki IV-IV** - Przykłady: SiC, SiGe.
- 9. Stopy półprzewodnikowe** - Przykłady: $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$; $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. W materiałach tych możemy w znacznym stopniu modyfikować (w sposób zaplanowany) strukturę pasmową, a w szczególności zmieniać przerwę energetyczną i pasmową masę efektywną elektronu (dziury). Są to typowe materiały półprzewodnikowej inżynierii materiałowej.

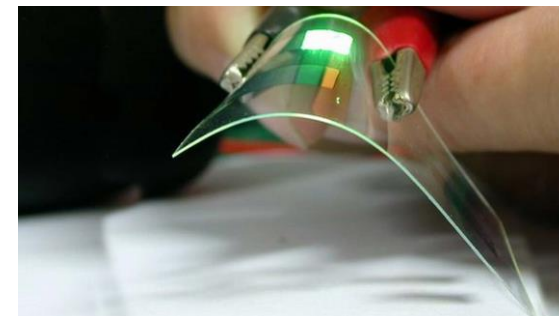
Przegląd materiałów półprzewodnikowych

10. Półprzewodniki magnetyczne - związki i stopy półprzewodnikowe zawierające mangan (Mn) i europ (Eu). Przykłady: $\text{Cd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Te}$, EuS. Stopy (związki) zawierające mangan (Mn) są podstawowymi materiałami spintroniki.



Prof. Tomasz Dietl - Związany z Instytutem Fizyki Teoretycznej UW i Instytutem Fizyki PAN.

11. Półprzewodniki organiczne - materiały plastyczne zbudowane głównie z poliacetylenu $(\text{CH}_2)_n$. Są to materiały tzw. plastycznej elektroniki.



Przegląd materiałów półprzewodnikowych

12. Heterostrukтуры i nanostrukтуры półprzewodnikowe

Są to sztucznie wytworzone przez człowieka materiały, złożone z warstw (obszarów) różnych półprzewodników. Obszary te posiadają najczęściej rozmiary nanometrowe. Przewidujemy szerokie zastosowanie nanostruktur półprzewodnikowych w elektronice przyszłości.

Nanostrukтуры półprzewodnikowe:

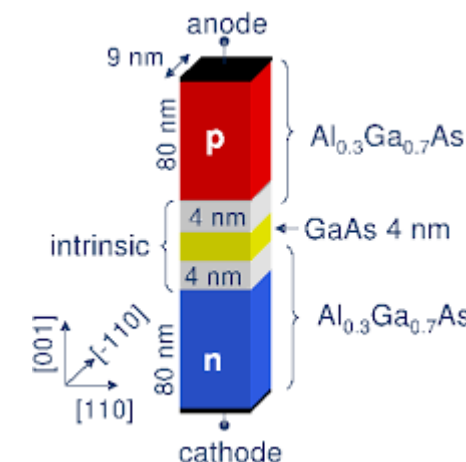
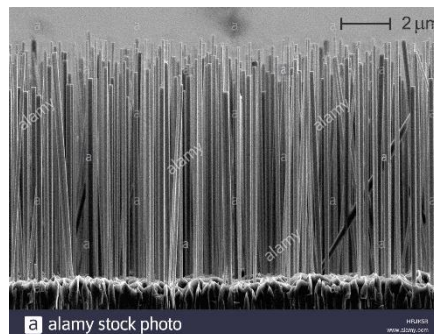
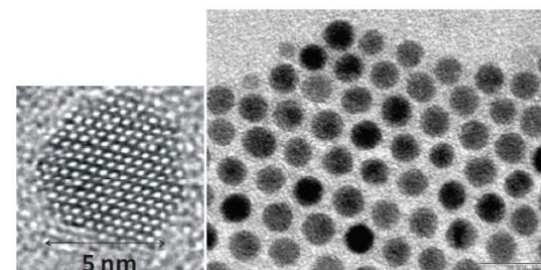
W nanostrukturach co najmniej jeden rozmiar przestrzenny nie przekracza 100 nm.

(1) Pojedyncze studnie kwantowe (QW) i studnie kwantowe wielokrotne (MQW)

(2) Supersieci (SL)

(3) Druty kwantowe (nanodruty, NW)

(4) Kropki kwantowe (QD)



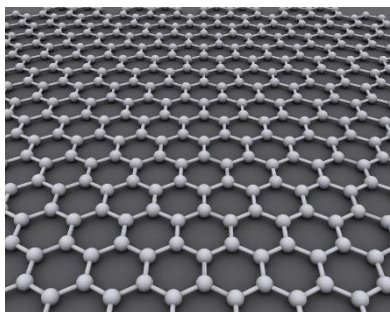
Przegląd materiałów półprzewodnikowych

12. Układu dwuwymiarowe - płatki grafitu (prawie dwuwymiarowe powierzchnie złożone z atomów węgla) o bardzo ciekawych właściwościach fizycznych i niezwykle obiecujących zastosowaniach.

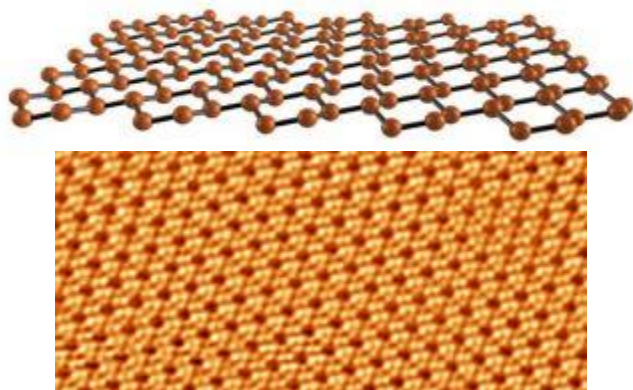
Materiały 2D:

- (1) Grafen może stanowić zamiennik krzemu.
- (2) Silicen: struktura quasi-dwuwymiarowa krzemu
- (3) germanen (Ge)
- (4) stanen (Sn)
- (5) 2D-Pb
- (6) MoS₂; MoSe₂; MoTe₂ (dichalkogenki metali przejściowych)

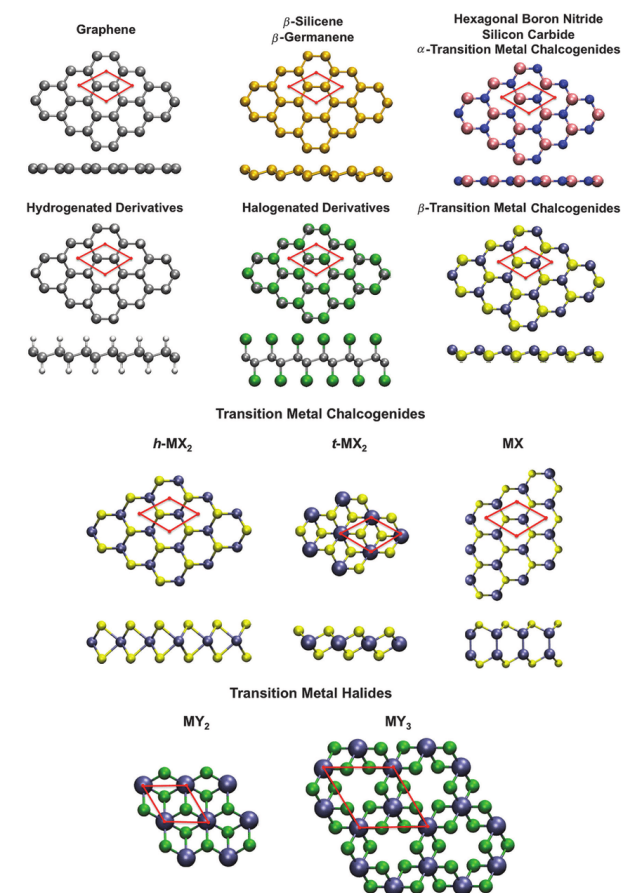
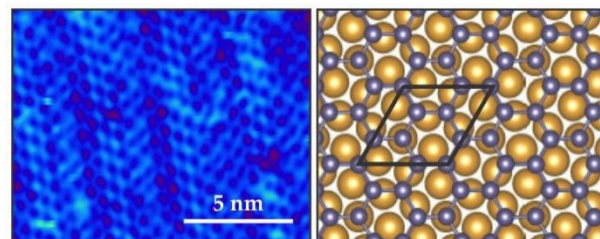
Grafen



Silicen

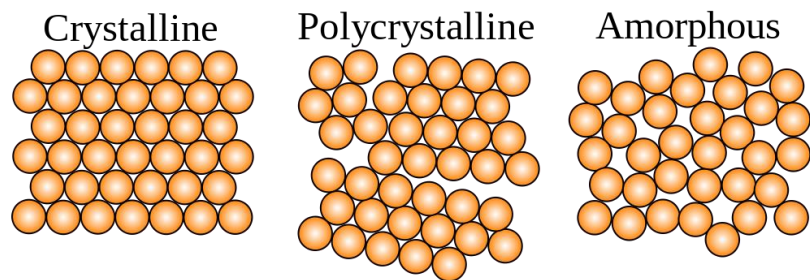


Germanen



Struktura krystaliczna

RODZAJE MATERIAŁÓW



Materiały krystaliczne – materiały których atomy ułożone są w ściśle określony sposób tworząc strukturę krystaliczną

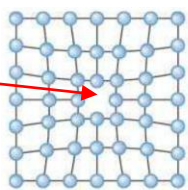
Materiały polikrystaliczne – materiały zbudowane z ziaren krystalicznych ułożonych względem siebie w przypadkowy sposób

Materiały amorficzne – materiały nie wykazujące struktury krystalicznej (szkło)

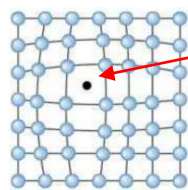
DEFEKTY STRUKTURY KRYSTALICZNEJ

DEFEKTY PUNKTOWE

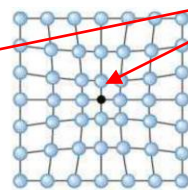
wakancja



(a)



(b)

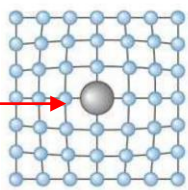


(c)

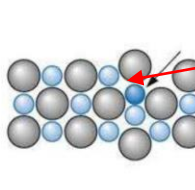
atomy
domieszki

Defekt Frenkela
i Shottky'ego

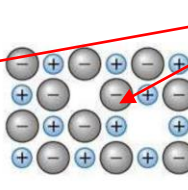
atom
domieszki



(d)

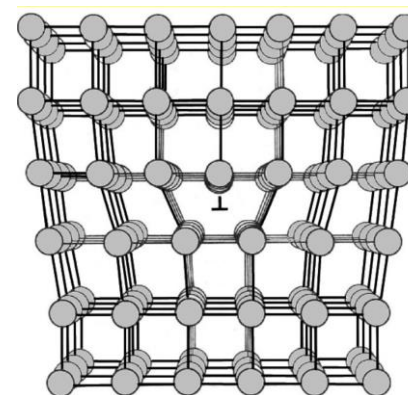


(e)

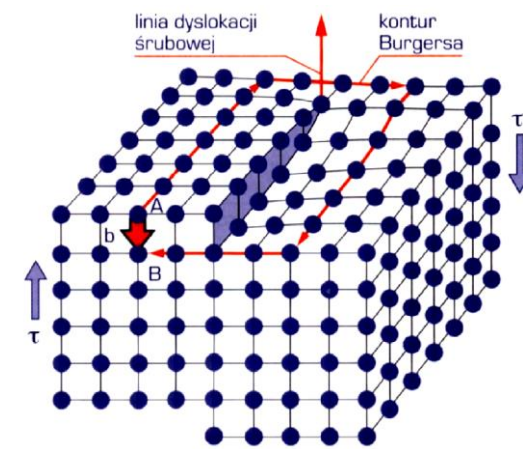


(f)

DEFEKTY LINIOWE



Dyslokacja krawędziowa



Dyslokacja śrubowa

Struktura krystaliczna półprzewodników

struktura krystaliczna = sieć krystaliczna + baza

Sieć krystaliczną definiuje się poprzez wektory bazy (translacji) $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$

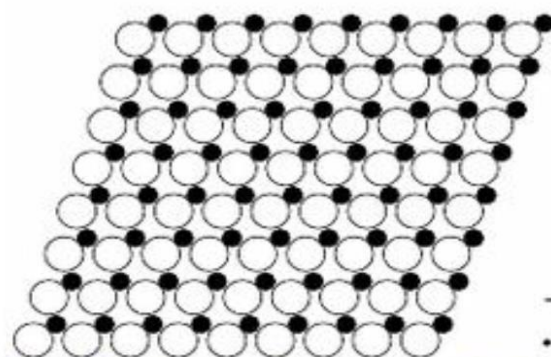
$$\vec{r} = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3 \quad \text{gdzie} \quad n_{1,2,3} \in \mathbb{Q}$$

Zbiór wektorów $\vec{r}$ wypełnia całą przestrzeń kryształu

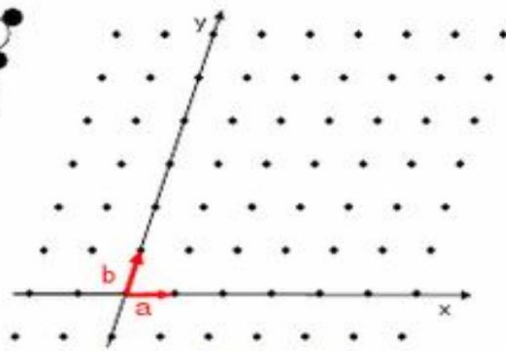
Baza – zbiór atomów (jednostka strukturalna) stowarzyszona z każdym węzłem sieci.

Położenie i-tego atomu w węzle sieci

$$\vec{r}_i = x_i \vec{a}_1 + y_i \vec{a}_2 + z_i \vec{a}_3 \quad \text{gdzie} \quad x_i, y_i, z_i \in (0,1)$$



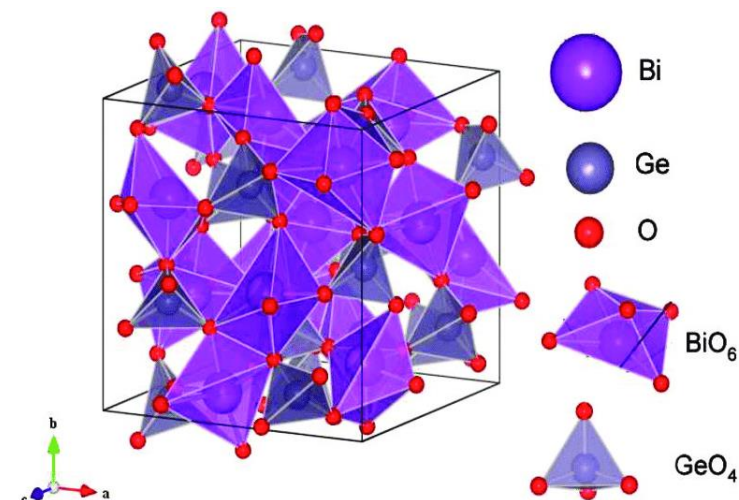
Struktura krystaliczna
składająca się z jednego lub kilku atomów ułożonych w powtarzający się sposób



Sieć przestrzenna (punktowa)
– sieć geometrycznych punktów (węzłów) odtwarzająca powtarzalność struktury krystalicznej

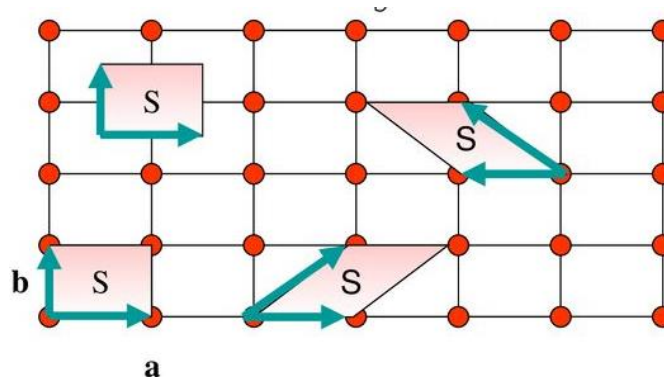


Baza
jeden lub kilka atomów, które należy przypisać do jednego węzła

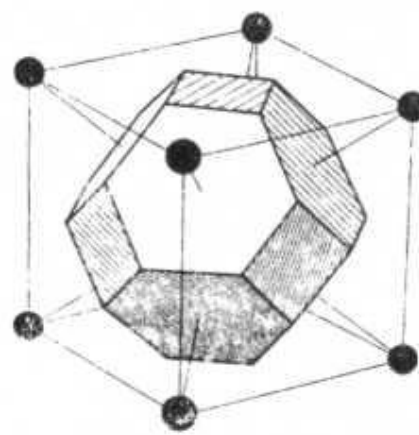
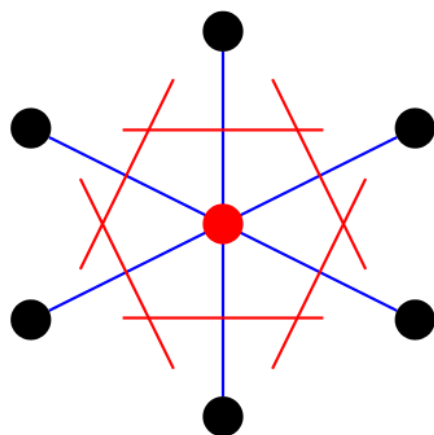


Struktura krystaliczna półprzewodników

Komórka elementarna – równoległoscian zbudowany przez trzy wektory bazy $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$. Powielając ten równoległoscian o wektory translacji wypełnimy całą przestrzeń. Dla danej sieci można wybrać wektory translacji oraz komórkę elementarną na wiele sposobów.



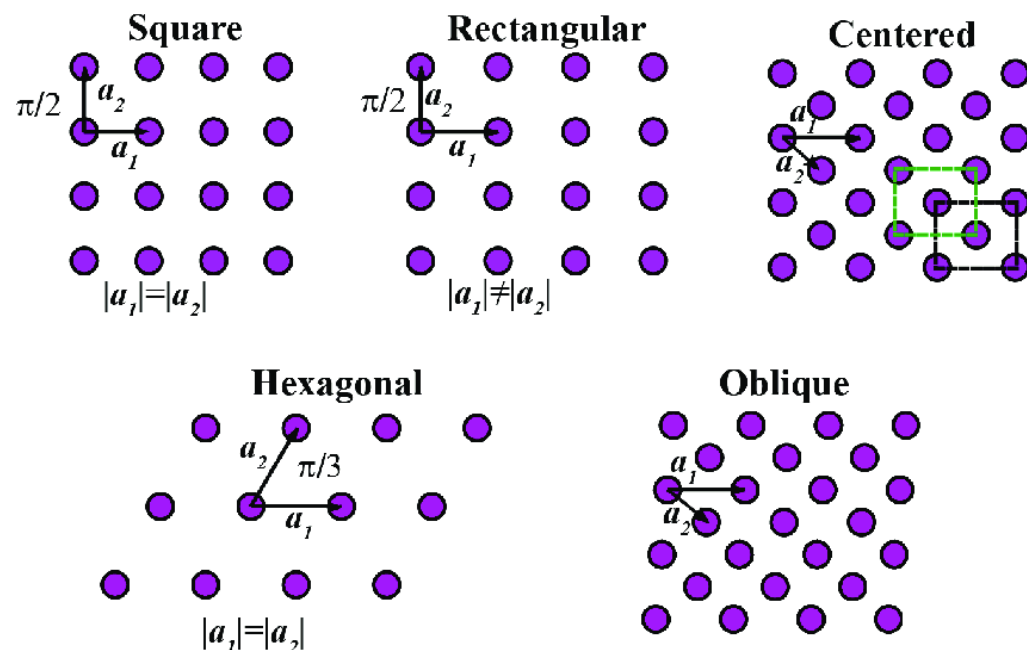
Komórka prymitywna – komórka elementarna o najmniejszej możliwej objętości.



Komórka Wignera-Seitz –
Komórka prymitywna posiadające
symetrię sieci.

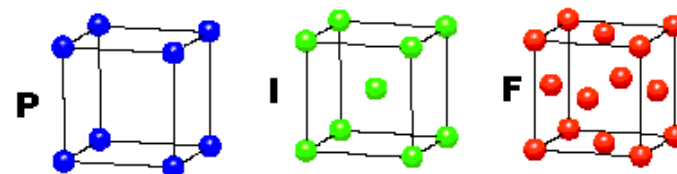
Struktura krystaliczna półprzewodników

SIECI BRAVAIS 2D

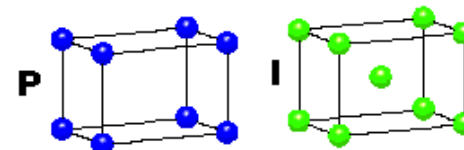


SIECI BRAVAIS 3D

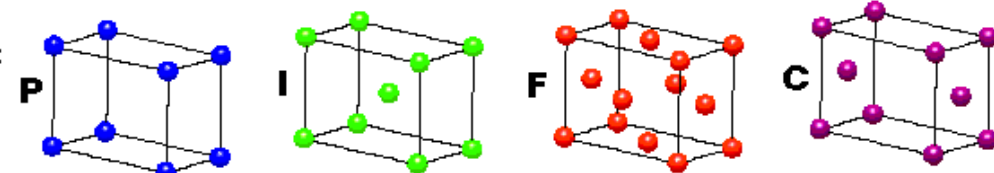
CUBIC
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



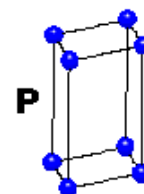
TETRAGONAL
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



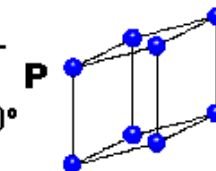
ORTHORHOMBIC
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



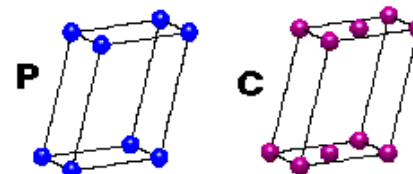
HEXAGONAL
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ$
 $\gamma = 120^\circ$



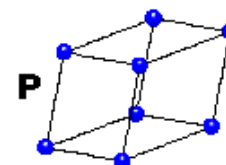
TRIGONAL
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$



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



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

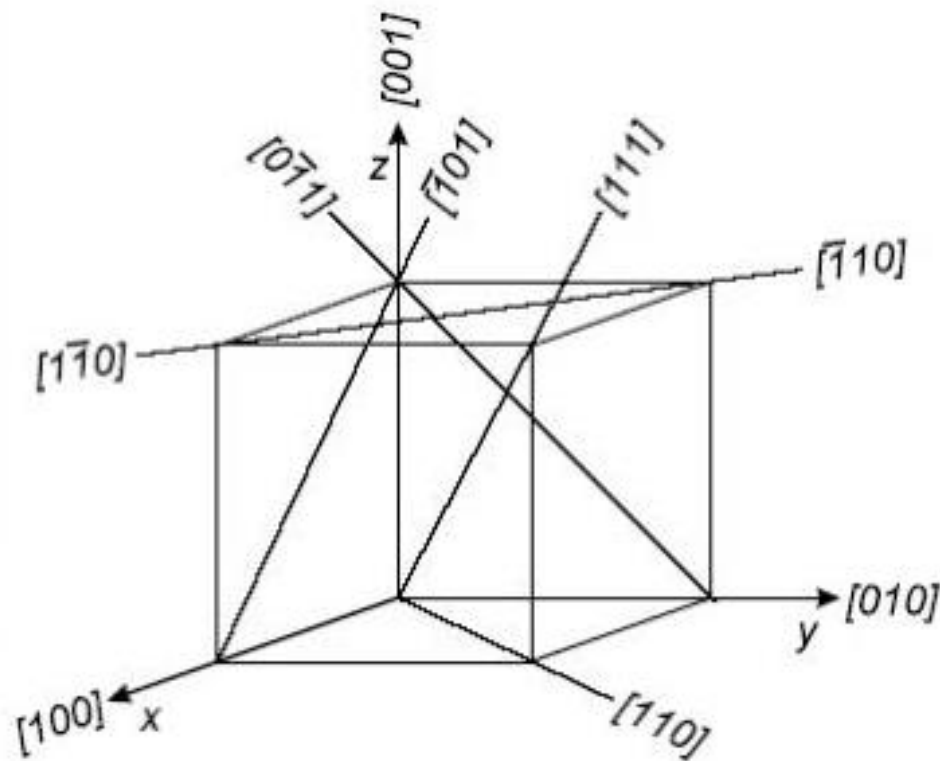


4 Types of Unit Cell
P = Primitive
I = Body-Centred
F = Face-Centred
C = Side-Centred
 +
7 Crystal Classes
 → **14 Bravais Lattices**

Struktura krystaliczna półprzewodników

WSKAŹNIKI MILLERA

Wskaźniki kierunkowe – do opisu kierunku biera się prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Kierunek tej prostej jest jednoznacznie określony przez wskaźniki $[m\ n\ p]$ pierwszego węzła przez który przechodzi ta prosta.



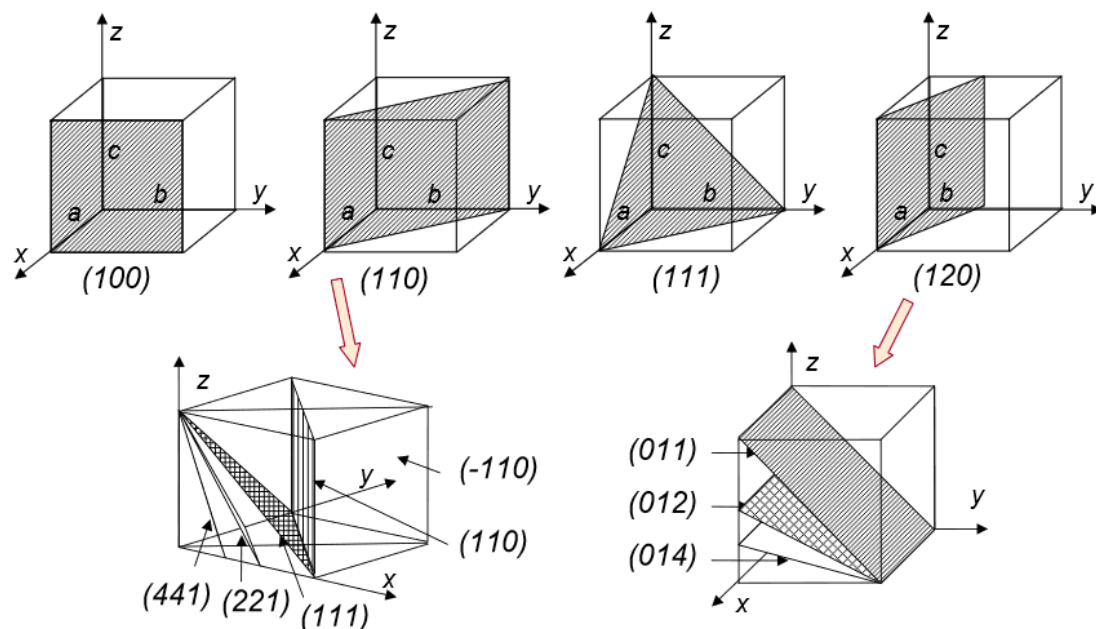
Wskaźniki głównych kierunków w sieci regularnej

Struktura krystaliczna półprzewodników

WSKAŹNIKI MILLERA

Wskaźniki płaszczyznowe – do opisania płaszczyzn krystalograficznych wykorzystywane są wskaźniki (h,k,l).

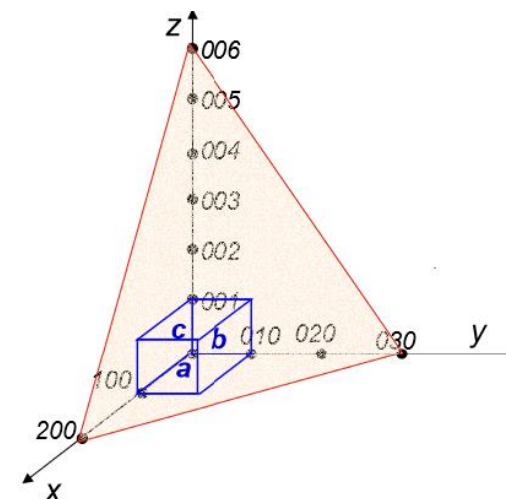
Płaszczyzna przecina osie kryształu w pewnych punktach, odcinając odcinki o pewnej długości. Stosunki stałej sieciowej do długości tych odcinków, pomnożone przez stałą dają wskaźniki Millera tej płaszczyzny. Stała musi być tak dobrana, aby wskaźniki miały jak najmniejszą wartość bezwzględną. W przypadku, gdy płaszczyzna jest równoległa do którejś z osi, to punkt przecięcia znajduje się w nieskończoności, co daje wskaźnik Millera równy 0.



Jakie są wskaźniki Millera dla płaszczyzny przechodzącej Przez punkty 200, 030, 006 ?

$$(h:k:l) = a/n_1 : b/n_2 : c/n_3$$

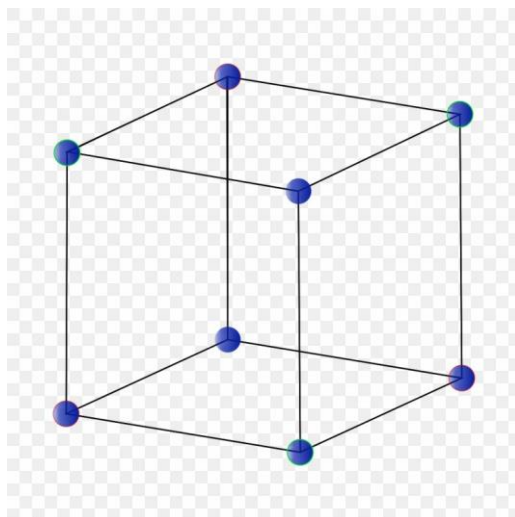
$$(h:k:l) = 1/2 : 1/3 : 1/6$$



Zapis sprowadzamy do liczb całkowitych $(hkl) = (321)$

Struktura krystaliczna półprzewodników

PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH STRUKTUR KRystalicznych



kubiczna

$$\vec{a}_1 = a(1,0,0)$$

$$\vec{a}_2 = a(0,1,0)$$

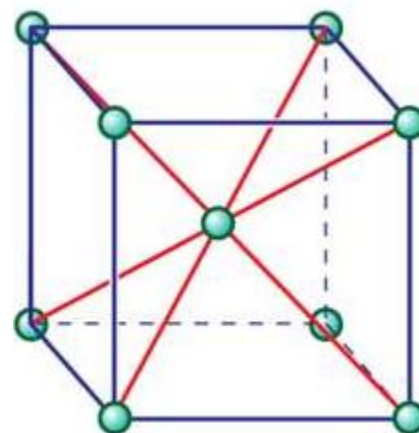
$$\vec{a}_3 = a(0,0,1)$$

Objętość: a^3

Liczba węzłów = 1

Liczba sąsiadów = 6

Upakowanie = 52%



kubiczna przestrzenno-centrowana (BCC)

$$\vec{a}_1 = a/2 (1,1,-1)$$

$$\vec{a}_2 = a/2 (-1,1,1)$$

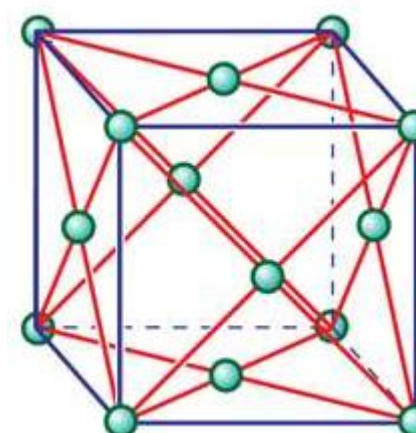
$$\vec{a}_3 = a/2 (1,-1,1)$$

Objętość: a^3

Liczba węzłów = 2

Liczba sąsiadów = 8

Upakowanie = 68%



kubiczna powierzchniowo-centrowana (FCC)

$$\vec{a}_1 = a/2 (1,1,0)$$

$$\vec{a}_2 = a/2 (0,1,1)$$

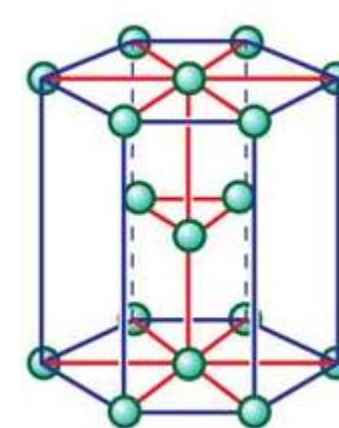
$$\vec{a}_3 = a/2 (1,0,1)$$

Objętość: a^3

Liczba węzłów = 4

Liczba sąsiadów = 6

Upakowanie = 74%



gęstego upakowania (HCP)

$$\vec{a}_1 = a(1,0,0)$$

$$\vec{a}_2 = a(-1/2, 0, \sqrt{3}/2)$$

$$\vec{a}_3 = c(0,0,1)$$

Objętość: $a^2 c 3\sqrt{3}/2$

Liczba węzłów = 3

Liczba sąsiadów = 12

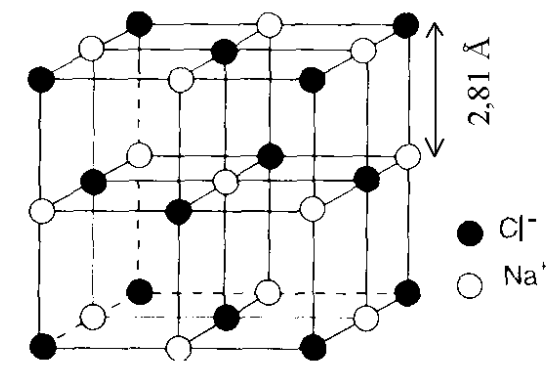
Upakowanie = 74%

W tych strukturach krystalizują głównie metale.

Struktura krystaliczna półprzewodników

PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH STRUKTUR KRYSTALICZNYCH

➤ Struktura NaCl



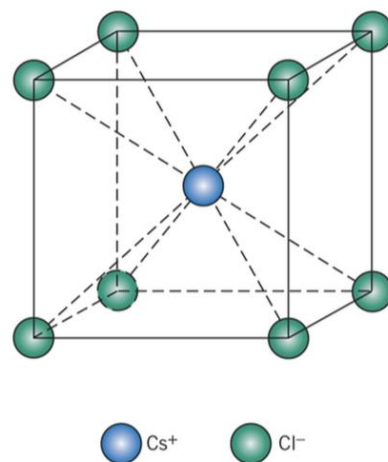
Struktura FCC:

Cl: (0,0,0) (1/2,1/2,0), (0,1/2,1/2), (1/2,0,1/2)

Na: (1/2,1/2,1/2), (0,0,1/2), (0,1/2,0), (1/2,0,0)

Struktura półprzewodników IV-VI: PbS PbTe

➤ Struktura CsCl



Struktura BCC:

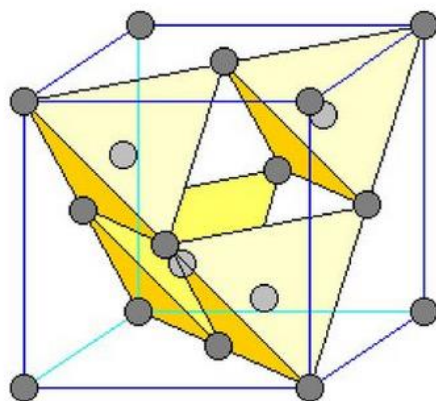
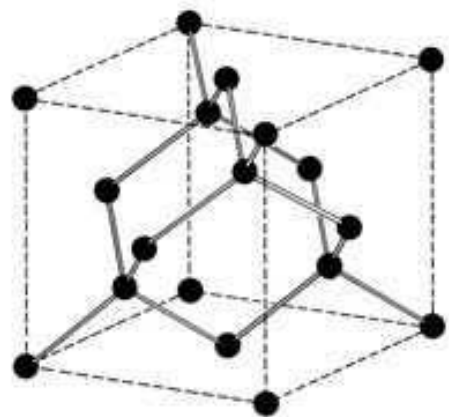
Cl: (0,0,0)

Cs: (1/2,1/2,1/2)

Struktura krystaliczna półprzewodników

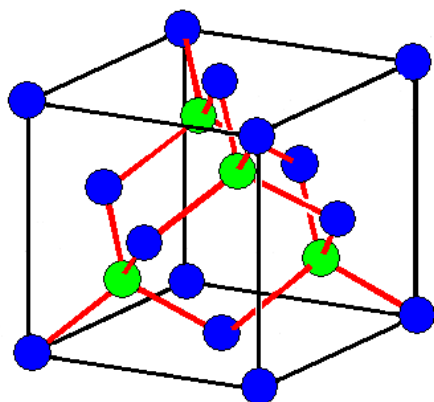
PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH STRUKTUR KRYSTALICZNYCH

➤ Struktura diamentu



- Dwie sieci FCC przesunięte o $(1/4, 1/4, 1/4)$
- Sieć krystaliczna półprzewodników grupy IV tj. C, Si, Ge
- Charakterystyczny tetraedr w wiązaniach chemicznych
- Liczba najbliższych sąsiadów = 4
- 8 atomów na komórkę elementarną

➤ Struktura blendy cynkowej



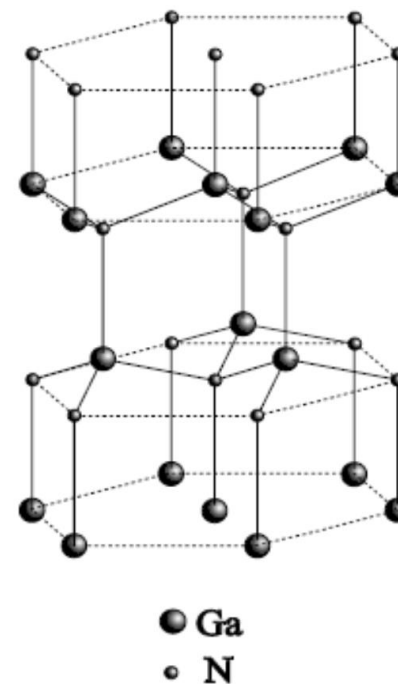
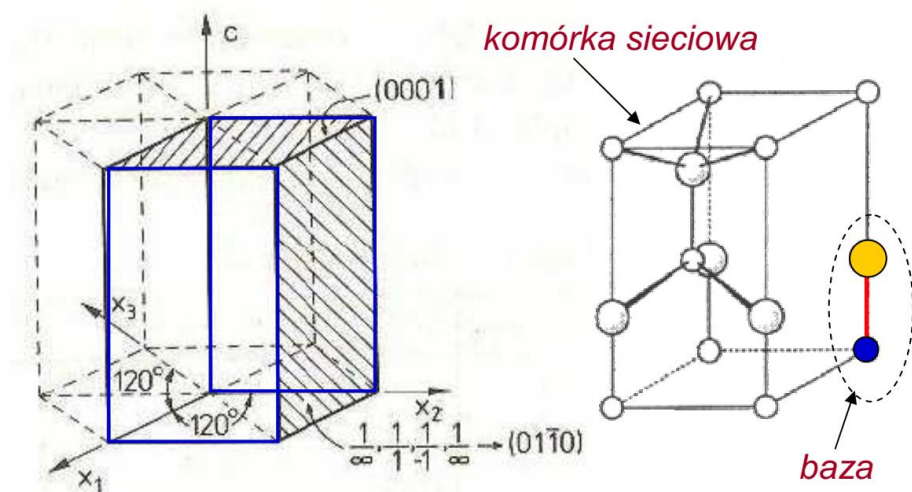
- Dwie sieci FCC przesunięte o $(1/4, 1/4, 1/4)$ zbudowane z dwóch atomów Zn, S
- Sieć krystaliczna półprzewodników grupy III-V tj. GaAs, InAs, InSb
- Charakterystyczny tetraedr w wiązaniach chemicznych
- Liczba najbliższych sąsiadów = 4
- 8 atomów na komórkę elementarną

Struktura krystaliczna półprzewodników

PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH STRUKTUR KRYSTALICZNYCH

➤ Struktura wurcytu

- Struktura heksagonalna z bazą dwuatomową
- Sieć krystaliczna półprzewodników II-VI: GaN, CdS, ZnO
- Struktura o wiązaniach tetraedrycznych
- Dwie gęsto upakowane sieci heksagonalne przesunięte wzdłuż osi c

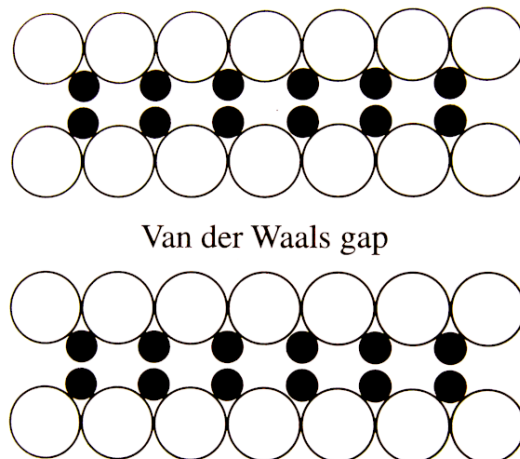


Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

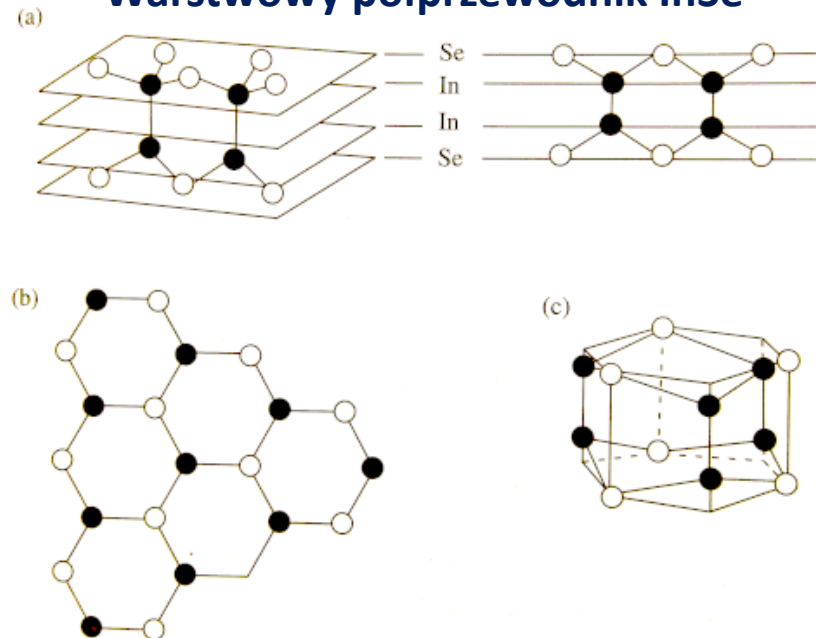
➤ Oddziaływanie van der Waalsa

- ✓ Bardzo słabe oddziaływanie występujące w gazach szlachetnych (Ne, Ar, Xe, Kr) – atomy gazów szlachetnych mają całkowicie zapełnione powłoki (sferyczne) które są elektrycznie obojętne. Ale atomy indukują wzajemne momenty dipolowe które są źródłem oddziaływania pomiędzy nimi. Gazy szlachetne posiadają dużą energię jonizacji.
- ✓ Oddziaływanie dipol-dipol (najprostszy model to układ dwóch naładowanych oscylatorów)
- ✓ Energia wiązania 0.1 eV/atom

Struktura warstwowa Półprzewodniki 2D TMCD



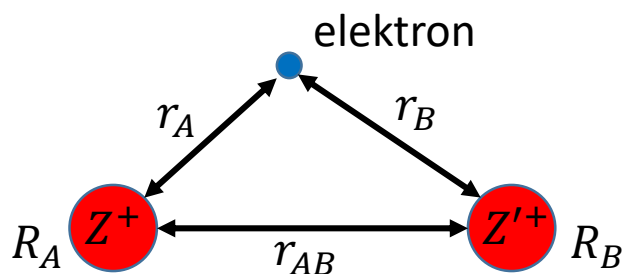
Warstwowy półprzewodnik InSe



Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

➤ Wiązanie kowalencyjne

- ✓ Uwspólnienie pary elektronowej pomiędzy dwoma atomami o podobnej liczbie elektronów walencyjnych
- ✓ Energia wiązania 5-7 eV/atom
- ✓ Najprostszy model – model zjonizowanej cząsteczki wodoru



Hamiltonian

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{Ze^2}{r_A} - \frac{Z'e^2}{r_B} + \frac{ZZ'e^2}{r_{AB}} \right)$$

Funkcja próbna

$$\psi = c_A\psi_A + c_B\psi_B$$

Zasada wariacyjna. Szukamy minimum energii

$$E = \frac{\langle \psi | H | \psi \rangle}{\langle \psi | \psi \rangle} = \frac{\langle c_A\psi_A + c_B\psi_B | H | c_A\psi_A + c_B\psi_B \rangle}{\langle c_A\psi_A + c_B\psi_B | c_A\psi_A + c_B\psi_B \rangle} = \frac{c_A^2 H_{AA} + 2c_A c_B H_{AB} + c_B^2 H_{BB}}{c_A^2 + c_B^2 + 2c_A c_B S}$$

Minimalizacja

$$\frac{\partial E}{\partial c_A} = \frac{\partial E}{\partial c_B} = 0$$

Równania wiekowe (sekularne)

$$\begin{cases} c_A(H_{AA} - E) + c_B(H_{AB} - SE) = 0 \\ c_A(H_{AB} - ES) + c_B(H_{BB} - E) = 0 \end{cases}$$

gdzie

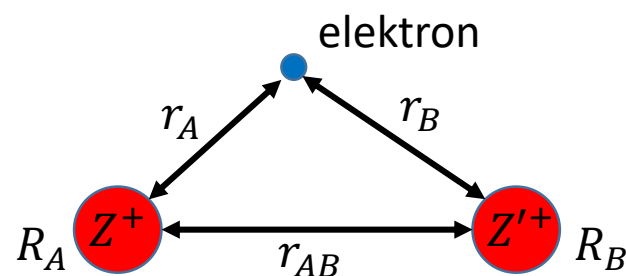
$$\begin{aligned} H_{AA} &= H_{BB} = \langle \psi_{A(B)} | H | \psi_{A(B)} \rangle \\ H_{AB} &= H_{BA} = \langle \psi_A | \psi_B \rangle \end{aligned}$$

Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

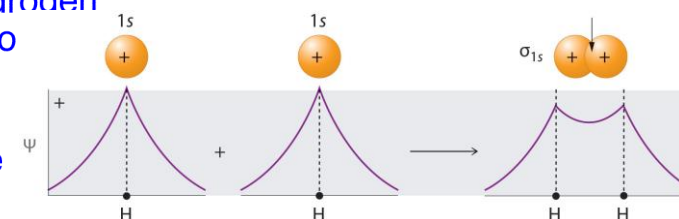
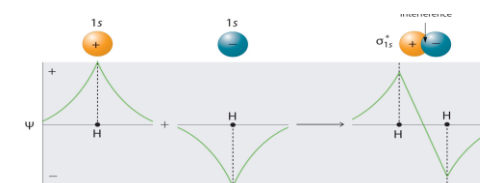
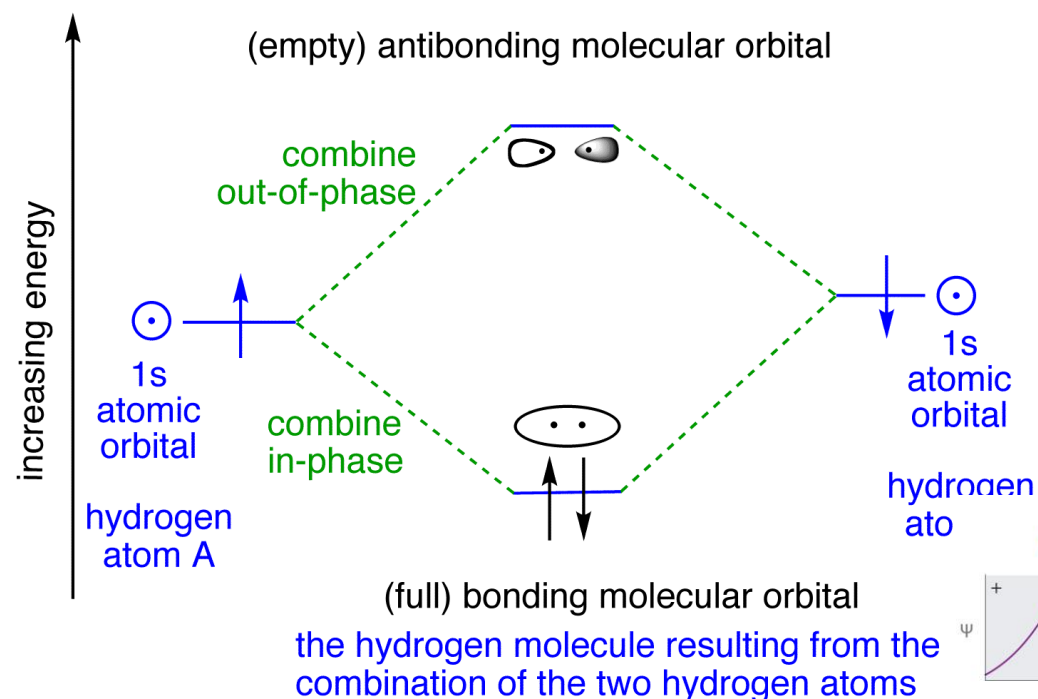
➤ Wiązanie kowalencyjne

Ostatecznie energia dana jest wzorem

$$E = \frac{H_{AA} \pm H_{AB}}{1 \pm S}$$

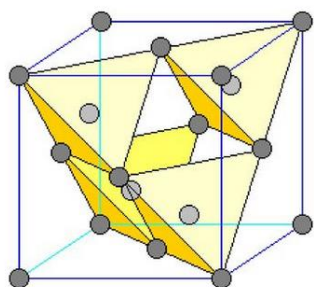


Orbital wiążący (wiązanie kowalencyjne) - silne nagromadzenie ładunku pomiędzy atomami. Korzyść energetyczna związana z przekrywaniem się funkcji falowych.



Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

➤ Wiązanie kowalencyjne w strukturze diamentu (Si, Ge)



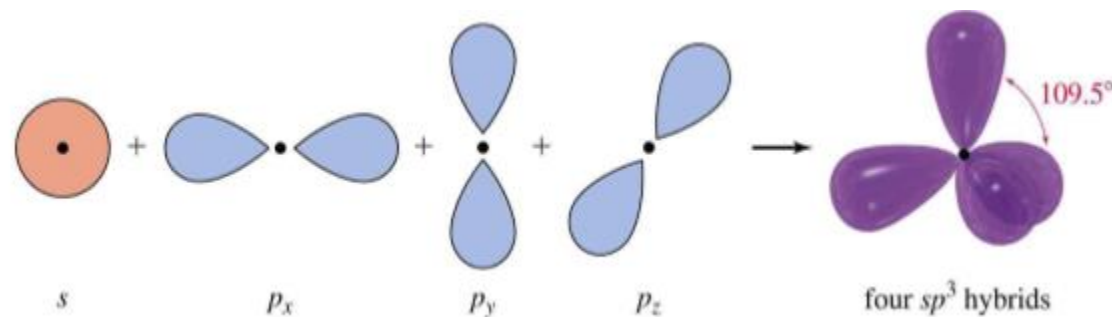
Orbitale atomowe – 4 elektrony walencyjne, 2 typu s oraz 2 typu p

$$\text{C: } (1s)^2(2s)^2(2p)^2$$

$$\text{Si: } (1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^2$$

$$\text{Ge: } (1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(4s)^2(4p)^2$$

Kwantowo mechanicznie, korzyść z związania jest tym większa im większe przekrywanie orbitali atomowych. Takie podejście promuje wzbudzenie jednego elektronu ze stanu s do stanu p tj. Si: $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^1(3p)^3$ a następnie ich hybrydyzacje tak by przekrywanie orbitali było jak największe. Koszt takiego wzbudzenia to 3.5 eV i mniejszy niż korzyść z przekrywania orbitali. Oznaczając orbitale $3s$ i $3p$ jako s , p_x , p_y , p_z , orbitale zhybrydyzowane mają postać (hybrydyzacja sp^3 , Pauling 1960)



$$\varphi_{t1} = \frac{1}{2}(s + p_x + p_y + p_z)$$

$$\varphi_{t2} = \frac{1}{2}(s + p_x - p_y - p_z)$$

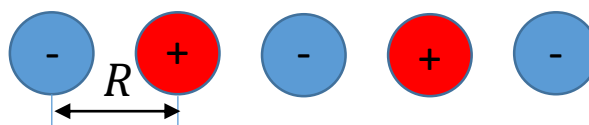
$$\varphi_{t3} = \frac{1}{2}(s - p_x + p_y - p_z)$$

$$\varphi_{t4} = \frac{1}{2}(s - p_x - p_y + p_z)$$

Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

➤ Wiązanie jonowe

- ✓ Pomiedzy atomami o malej energii jonizacji oraz duzym powinowactwie elektronowym
 Na: $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^1$ - mala energia jonizacji (-5,1 eV), latwo oderwac elektron
 Cl: $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^5$ - duze powinowactwo elektronowe (+3,6 eV), chetnie przyjmie elektron
 Przeniesienie elektronu wymaga zatem dostarczenia 1.5 eV ale energia oddziaływania pomiedzy stworzonymi jonami rekompensuje ten ubytek tak, ze korzysc energetyczna z wiązania (przeniesienia elektronu z jednego atomu na drugi) wynosi 7,9 eV/atom.
- ✓ Ładunek prawie symetryczny z niewielką koncentracją pomiedzy atomami.



Zakładając, że każdy jon oddziałuje ze wszystkimi jonami w sieci (N – liczba jonów)

$$U_{tot} = NU_i = N \sum_j U_{ij} = N \sum_j \lambda e^{-\frac{r_{ij}}{\varrho}} \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q^2}{r_{ij}}$$

Oddychanie, gdy cząstki są blisko
bo zakaz Pauliego

Oddziaływanie elektrostatyczne

Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

➤ Wiązanie jonowe

Jeżeli założymy, że odpychanie może występować tylko między najbliższymi jonami

$$U_{ij} = \begin{cases} \lambda e^{-\frac{R}{\varrho}} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q^2}{R} \\ \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{p_{ij}} \frac{q^2}{R} \end{cases}$$

to
$$U_{tot} = N \left(\lambda e^{-\frac{R}{\varrho}} - \frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q^2}{R} \right)$$

gdzie

$$\alpha = \sum_j \frac{\pm 1}{p_{ij}}$$

Stała Madelunga

Punkt równowagi pomiędzy jonami

$$\frac{\partial U_{tot}}{\partial R} = N \left(-\frac{1}{\varrho} \lambda e^{-\frac{R}{\varrho}} + \frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q^2}{R^2} \right) = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{\varrho} \lambda e^{-\frac{R}{\varrho}} = \frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q^2}{R^2}$$

Spełnione dla R_0

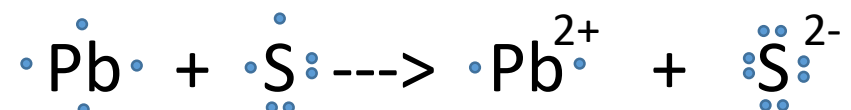
A zatem energia wiązania

$$U_{tot} = -\frac{N\alpha q^2}{R_0} \left(1 - \frac{\varrho}{R_0} \right)$$

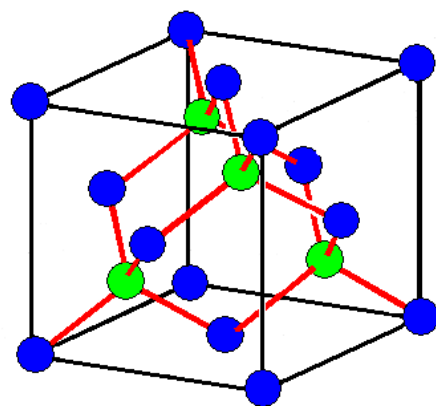
Wiązania chemiczne w półprzewodnikach

Wiązania chemiczne w półprzewodnikach nigdy nie są jednego typu. Są pewną kombinacją wiązania kowalencyjnego i jonowego z różnymi ich wkładami w zależności od typu półprzewodnika

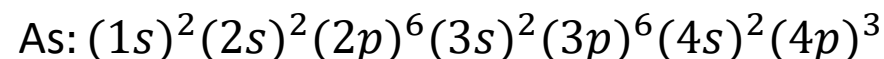
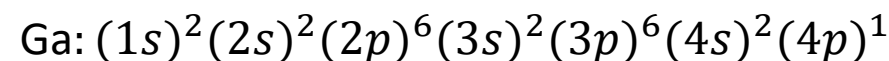
- Wiązanie jonowe – największy wkład od wiązania jonowego występuje w półprzewodnikach IV-VI które krystalizują w strukturze NaCl, tj. PbSe, PbS



- Wiązanie w strukturze blendy cynkowej – wiązania kowalencyjno - jonowe



GaAs



- ✓ Przeskok elektronu z As do Ga, tak aby oba atomy miały po 4 elektrony. Wówczas hybrydyzacja sp^3 tworzy wiązanie kowalencyjne między jonami As^+ , Ga^-
- ✓ Możliwe jest również przeniesienie trzech elektronów z Ga do As i stworzenie wiązania jonowego pomiędzy jonami As^{3-} , Ga^{3+}

W rzeczywistości jest to pewna mieszanina wiązania kowalencyjnego i jonowego

Metody wytwarzania półprzewodników

Materiały półprzewodnikowe, otrzymywane obecnie w warunkach laboratoryjnych, charakteryzują się niezwykle wysoką czystością.

Czystość materiałów półprzewodnikowych:

- Wytwarzane są izotopowo czyste kryształy Ge. Przypomnijmy, że naturalny german zawiera 5 izotopów.
- Wytwarzane są prawie idealne kryształy Si o średnicy rzędu 20 cm.
- W najczystszych wytwarzanych obecnie kryształach Si gęstość dyslokacji jest mniejsza niż 1000 dyslokacji/cm³, a koncentracja domieszek jest mniejsza niż 1 domieszka na 10¹² atomów sieci macierzystej.

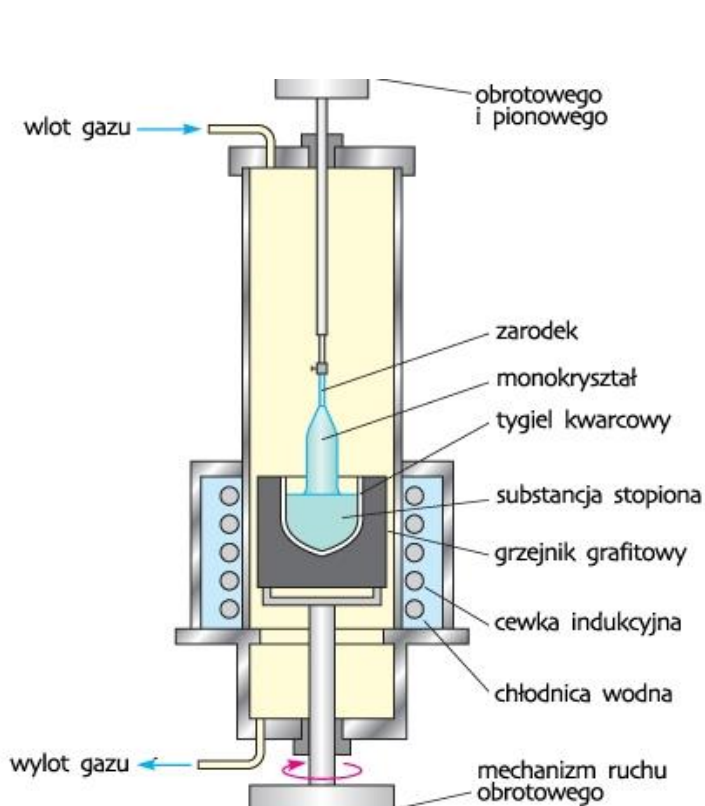


Metody wytwarzania półprzewodników



Metoda Czochralskiego

Technika otrzymywania monokryształów opracowana w 1916 roku przez polskiego chemika Jana Czochralskiego. Jest ona najstarszą i jedną z najpowszechniej stosowanych na świecie metod wytwarzania monokryształów półmetali, zwłaszcza krzemu do produkcji półprzewodników, metali i ich stopów.



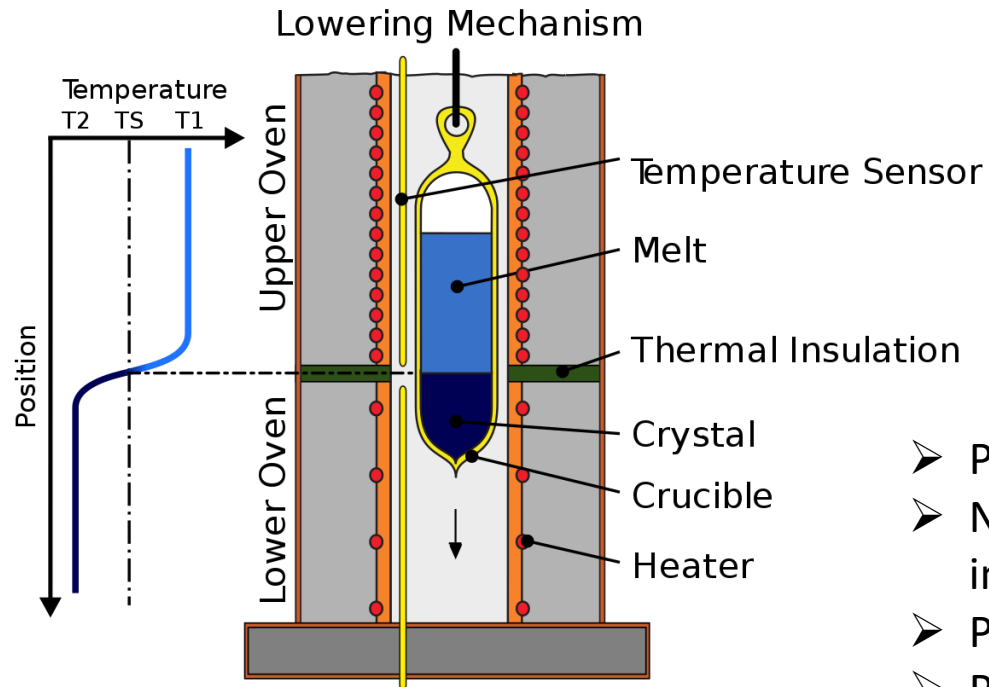
Otrzymywanie monokryształu polega na powolnym i stopniowym wyciąganiu z roztopionego materiału zarodka krystalicznego o pewnej orientacji krystalicznej, w sposób zapewniający kontrolowaną i stabilną krystalizację na jego powierzchni. Dodatkowo, jeśli wymagają tego warunki przebiegu krystalizacji, zarodek oraz tygiel mogą zostać wprowadzone w ruch obrotowy (celem poprawy warunków transportu masy i ciepła)

- Technika stosowana w przemyśle do wytwarzania Si dla potrzeb elektroniki
- Możliwość osiągnięcia wysokiej czystości do 99.999999999 %
- Szeroki zakres stosowalności: Si, Ge, GaAs, GaP, InP itd.
- Szybkość hodowli kryształu od 1 do 40 mm/h w zależności od materiału

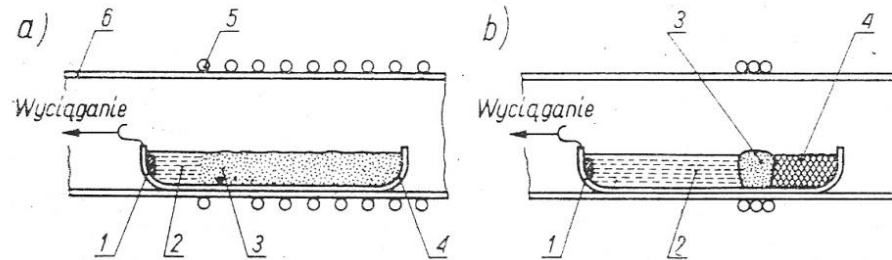
Metody wytwarzania półprzewodników

Metoda Bridgmana-Stockbargera

Technika otrzymywania monokrystalicznych materiałów oparta na stopniowym schładzaniu wcześniej stopionej masy krystalizowanego materiału.



Wersja pozioma metody Bridgmana



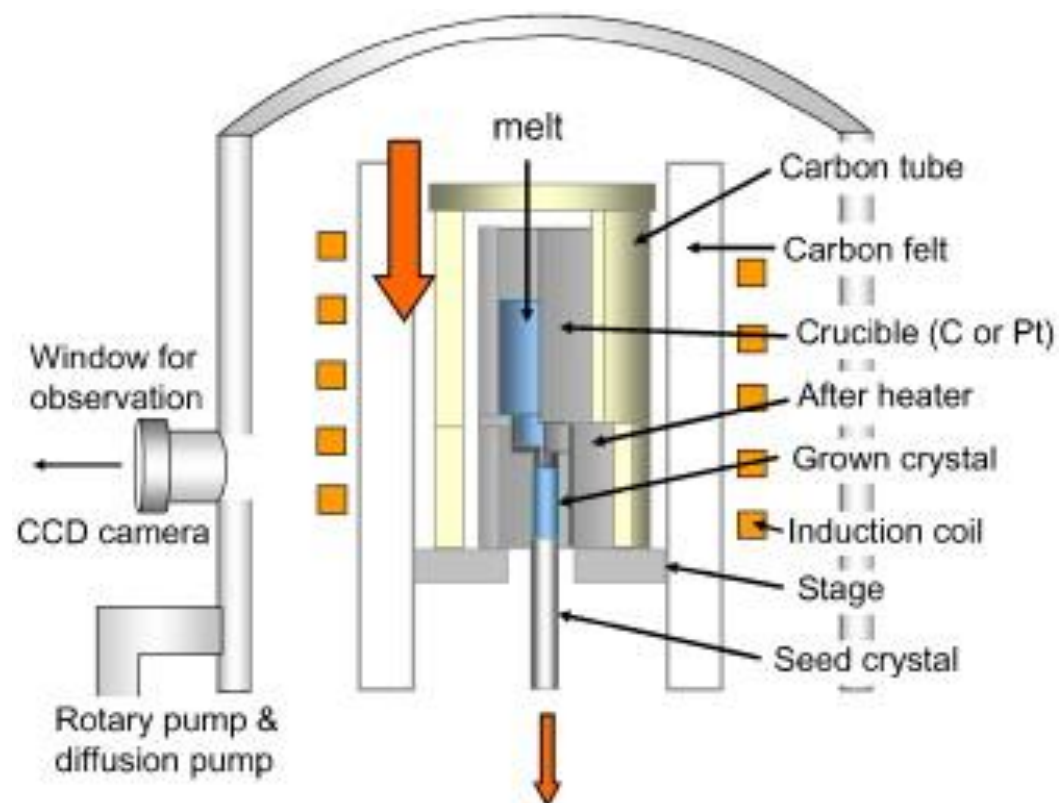
Rys. 1-11. Wzrost kryształu z cieczy w łódce: a) krystalizacja z jednego końca cieczy (metoda Bridgmana) 1 — zarodek; 2 — kryształ; 3 — stopiony materiał; 4 — łódka; 5 — grzejnik; 6 — r
b) topienie i krystalizacja w ruchomej strefie 1 — zarodek; 2 — kryształ; 3 — stopiona strefa; 4 — polikryształ

- Prostota – kształt kryształu zdeterminowany przez kształt naczynia
- Nieduże naprężenia termiczne, a co za tym idzie nieduża ilość dyslokacji indukowanych naprężeniem,
- Proces nie wymaga wielkiej dbałości.
- Prędkość krystalizacji do 10 mm/h

Metody wytwarzania półprzewodników

Micro pulling down method

Technika otrzymywania monokryształów oparta na ciągłym transporcie substancji stopionej przez mikro-kanal wykonany w dole tygla.



Metody wytwarzania półprzewodników

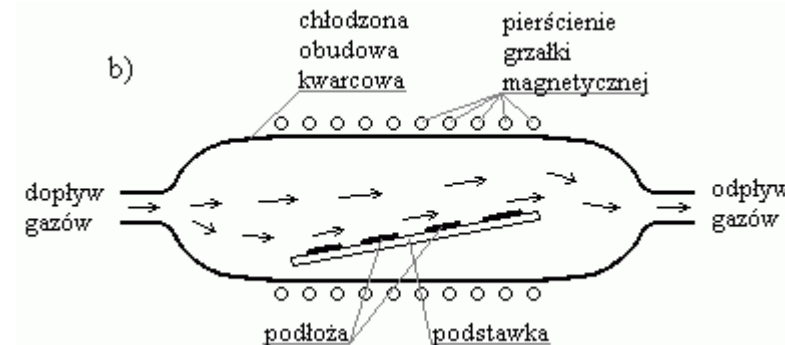
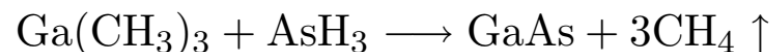
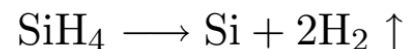
Epitaksja z fazy gazowej i ciekłej

Metoda ta stosowana do wytwarzania cienkich warstw na podłożu. Atomy tworzące cienką warstwę budują strukturę uporządkowaną o tej samej strukturze krystalicznej co podłoże

homoepitaksja = cienka warstwa i podłoże mają ten sam skład chemiczny, np. Si na Si

heteroepitaksja = skład chemiczny cienkiej warstwy i podłoża jest różny, ale struktura krystaliczna jest taka sama (lub podobna), np. GaAs na Si

Przykładowe reakcje:



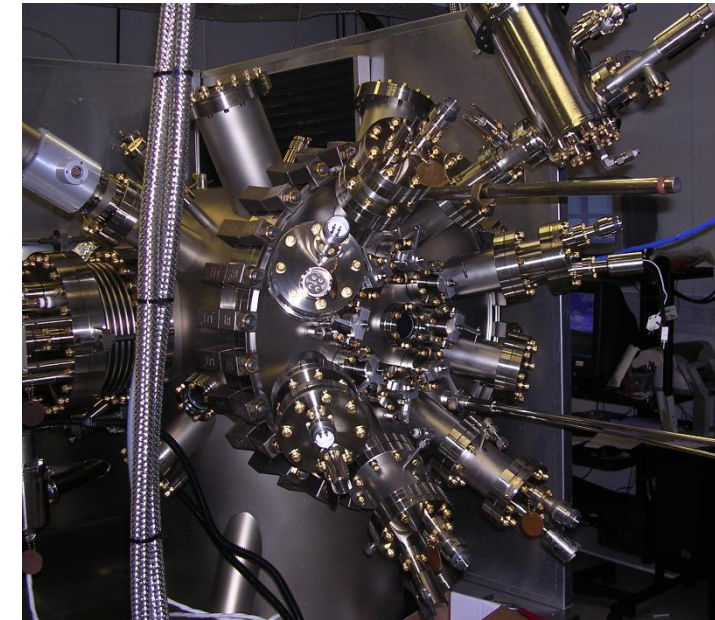
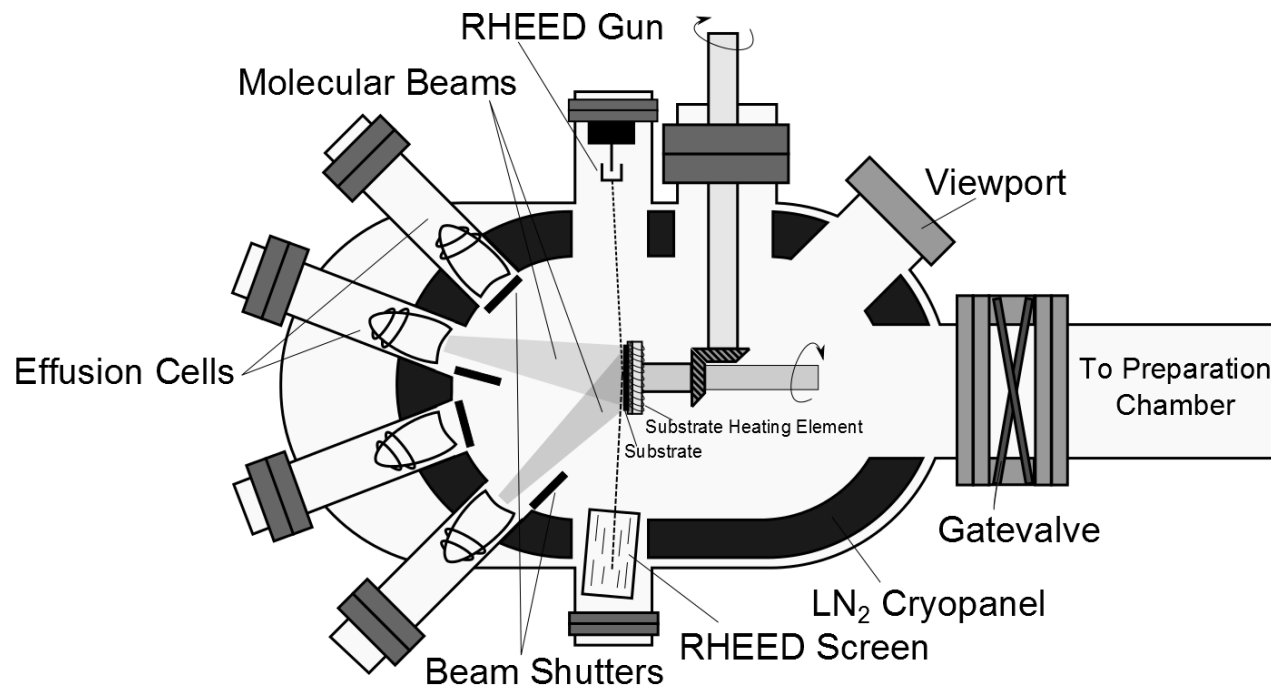
Ta druga reakcja prowadzi do otrzymania cienkiej warstwy z gazowego związku metalo-organicznego. Metoda wykorzystująca tę reakcję nazywana jest

MOCVD = Metal-Organic Chemical Vapor Deposition

Metody wytwarzania półprzewodników

MBE – molecular beam epitaxy

Metoda (technologia) MBE jest nowoczesną metodą otrzymywania cienkich warstw i heterostruktur kwantowych (QW, SL, NW, QD) w sposób kontrolowany. Zgodnie z tą metodą cienkie warstwy półprzewodnika (metal, izolator) krystalizują wskutek reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy wiązkami molekularnymi/atomowymi zawierającymi składniki wytwarzanego materiału a powierzchnią podłoża. Podłoże jest utrzymywane w podwyższonej temperaturze w ultra-wysokiej próżni, $p < 10^{-7}$ Pa.



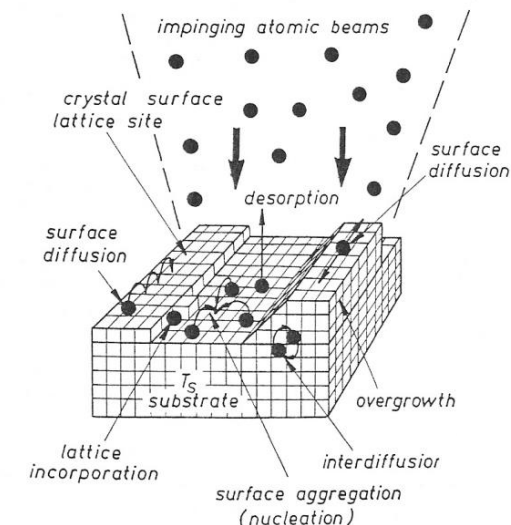
Metody wytwarzania półprzewodników

MBE – molecular beam epitaxy

- Technologia ta umożliwia bardzo precyzyjną kontrolę składu wiązek i warunków wzrostu.
- Daje zatem możliwość precyzyjnej kontroli składu i budowy produkowanej heterostruktury, możliwość produkcji idealnych międzypowierzchni, i heterostruktur.
- Prędkość wzrostu $1\mu\text{m/h}$ lub 1ML/sec .
- Kontrola prowadzona jest *in situ*, czyli w trakcie wzrostu, następującymi metodami:
 - metoda RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction)
 - spektroskopia Augera
 - elipsometria (pomiar zmiany polaryzacji światła odbitego od badanej powierzchni)

Komora reakcyjna MBE składa się z trzech stref:

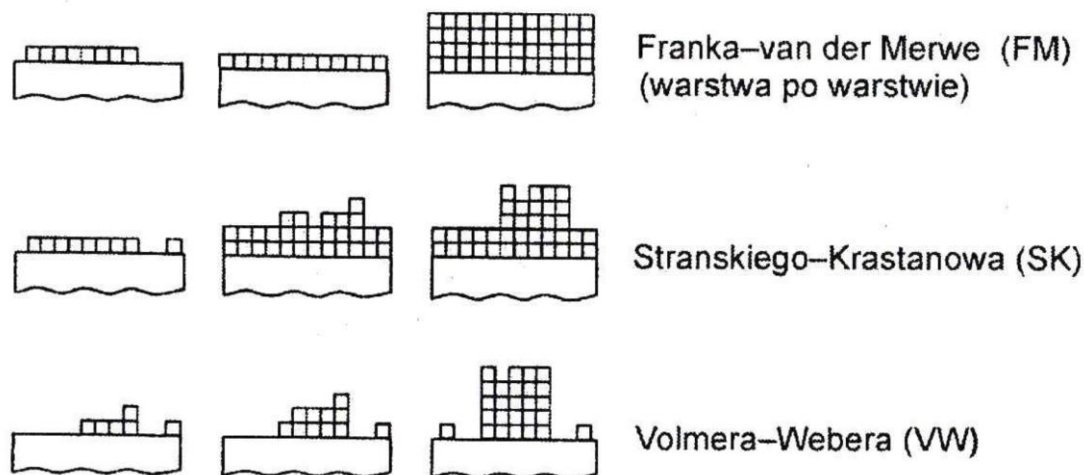
1. Strefa formowania się wiązek molekularnych wytwarzanych w komórkach efuzyjnych.
2. Strefa przecinania się wiązek i mieszania się molekuł,
3. Strefa krystalizacji na podłożu (strefa wzrostu epitaksjalnego).



Metody wytwarzania półprzewodników

Podstawowe typy wzrostu epitaksjalnego:

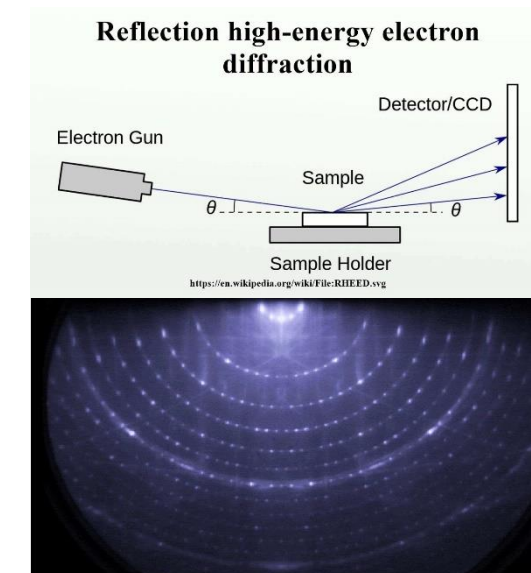
- Dwuwymiarowy (warstwowy) – **tryb Franka-van der Merwe** - krystalizacja zachodzi warstwa po warstwie a powierzchnia pokrywa się warstwą o jednolitej grubości.
- Trójwymiarowy (wyspowy) - **tryb Volmera-Webera** – krystalizacja zachodzi poprzez wzrost trójwymiarowych wysp a powierzchnia nie jest pokryta równomiernie (kropki kwantowe)
- Mieszany – **tryb Straskiego-Krastanowa** – w początkowej fazie wzrostu krystalizacja zachodzi warstwa po warstwie (warstwa zwilżająca) aż do osiągnięcia grubości krytycznej, po przekroczeniu której (krytyczne naprężenia w warstwie) krystalizacja zachodzi zgodnie z trybem Volmera-Webera



Metody wytwarzania półprzewodników

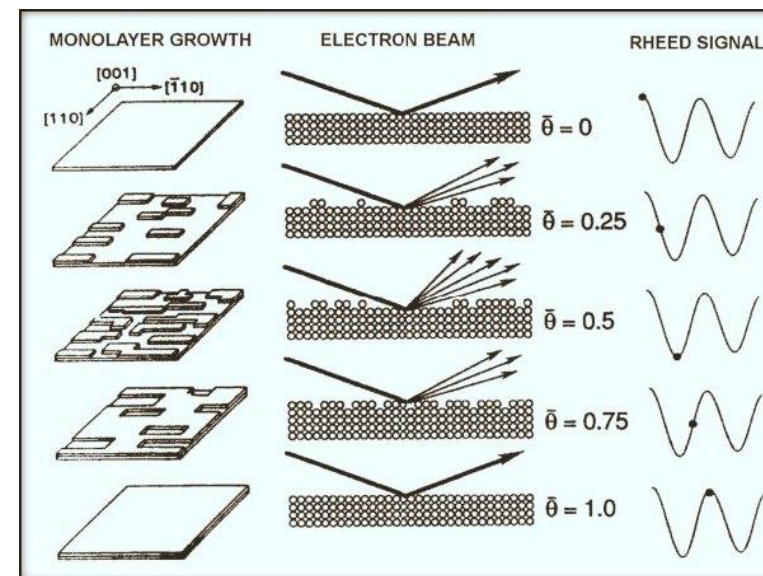
MBE – metoda kontroli wzrostu warstw RHEED

W metodzie dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED – Reflection High Energy Electron Diffraction) wykorzystana jest falowa natura elektronów. Skolimowana, monoenergetyczna wiązka elektronów o energii kilkudziesięciu keV kierowana jest pod niewielkim kątem, zwykle około 1° do powierzchni i podlega rozproszeniu na powierzchniowych atomach. Rozproszone fale de Broglie interferują i tworzą na luminescencyjnym ekranie dyfrakcyjny obraz w postaci świecących plamek. W kształcie, symetrii i szczegółach obrazu zawarta jest informacja o strukturze krystalograficznej, morfologii powierzchni kryształu i o charakterze oddziaływania elektronów z atomami.



Kontrola stopnia pokrycia powierzchni metodą RHEED przez pomiar zmian czasowych oscylacji natężenia dyfrakcji elektronów:

maksyma natężenia odpowiadają powierzchniom gładkim (całkowicie wypełnionym), a minima – powierzchniom wypełnionym w połowie



Zastosowania

- **Elektronika: diody, tranzystory, układy scalone**
- **Optoelektronika: lasery, ogniwa fotowoltaiczne**
- **Nanotechnologia: kropki kwantowe, drutu kwantowe, studnie kwantowe, itd**
- **Elektronika przyszłość: spintronika, valleytronika, qubity, komputery kwantowe, topologiczne stany materii, materiały 2D (grafen, dichalkogenki metali przejściowych)**



Najważniejsze informacje z wykładu - podsumowanie

- Półprzewodniki to materiały o nieomowych własnościach elektrycznych wynikających z ich struktury pasmowej.
- Krystalizują głównie w strukturach diamentu, blendy cynkowej oraz wurcytu.
- Wiązania z większości z materiałów półprzewodnikowych mają charakter kowalencyjno-jonowy. W układach kwazi-dwuwymiarowych pojawia się również oddziaływanie van der Waalsa.
- Do podstawowych metod wytwarzania należą metoda Czochralskiego, Brigmana, MBE
- Zbiór materiałów półprzewodnikowych jest bardzo bogaty a ich zastosowanie obejmuje elektronikę, optoelektronikę, i technologie przyszłości **(zapraszam do projektów inżynierskich, magisterskich, doktorskich z teorii nanostruktur półprzewodnikowych i nadprzewodzących :D)**