

# Fizyka powierzchni

## 1

**Dr Piotr Sitarek**

Katedra Fizyki Doświadczalnej,  
Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska

# Lista zagadnień

- Fizyka powierzchni i międzypowierzchni, struktura powierzchni ciał stałych
- Techniki otrzymywania dobrze zdefiniowanych powierzchni i międzypowierzchni. MBE, MOCVD
- Termodynamika równowagowa i statystyczna
- Adsorpcja, nukleacja i wzrost
- Defekty na powierzchni i ich obserwacja
- Fonony powierzchniowe
- Własności elektronowe
- Rozkład ładunku na powierzchni i międzypowierzchniach

# Lista zagadnień

- Techniki badania powierzchni
  - techniki desorpcji
  - quasi-elastyczne rozpraszanie (LEED)
  - nieelastyczne rozpraszanie (AES)
  - mikroskopia elektronowa (SEM)
  - skaningowa tunelowa mikroskopia (STM)
  - mikroskopia sił atomowych (AFM) - wizyta
  - metody optyczne ...

# Użyteczne informacje

Strona domowa:

**[Sitarek.wppt.pwr.edu.pl](http://Sitarek.wppt.pwr.edu.pl)**

materiały:

**Dydaktyka/Fizyka Powierzchni**

urzęduję:

pokój 319, budynek A-1

# Warunki zaliczenia kursu

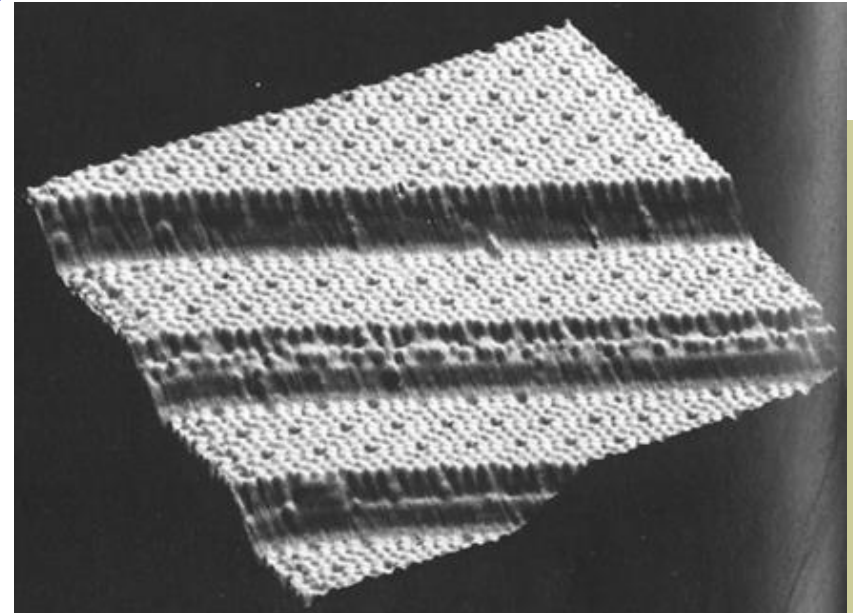
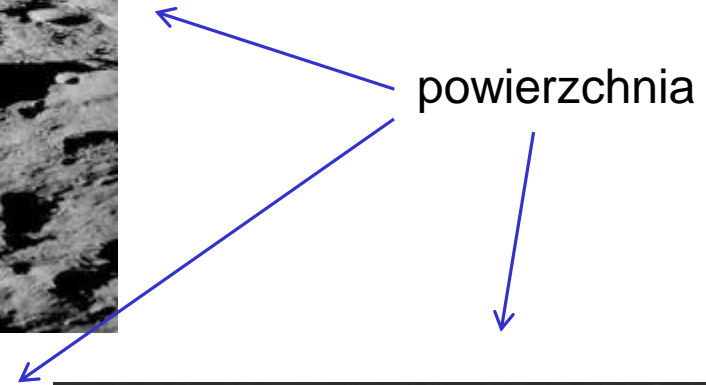
- zaliczenie
- na ostatnim wykładzie (2.02.2024)

(obecności będą brane pod uwagę)

# Literatura

- Anna Szaynok, Stanisław Kuźmiński, *Podstawy fizyki powierzchni półprzewodników*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- Harald Ibach, *Physics of Surfaces and Interfaces*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- Hans Luth, *Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- Andrew Zangwill, *Physics at Surfaces*, Cambridge University Press, 1988.
- M.-C. Desjonqueres D. Spanjaard, *Concepts in Surface Physics*, Springer 1998.
- David B. Williams and C. Barry Carter, *Transmission Electron Microscopy*, Springer, 2009.
- Michael Bowker and Philip R. Davies (editors), *Scanning Tunneling Microscopy in Surface Science, Nanoscience and Catalysis*, WILEY-VCH Verlag GmbH, 2010.
- A. Kiejna and K.F. Wojciechowski, *Metal Surface Electron Physics*, Elsevier Science Ltd. 1996.
- Piotr Sitarek, *Surface physics (selected materials for seminar)*, Project co-financed by European Union within European Social Fund.
- Józef Korecki, *Powierzchnie cienkie warstwy nanostruktury – materiały do wykładu*

# Powierzchnia



# Powierzchnia

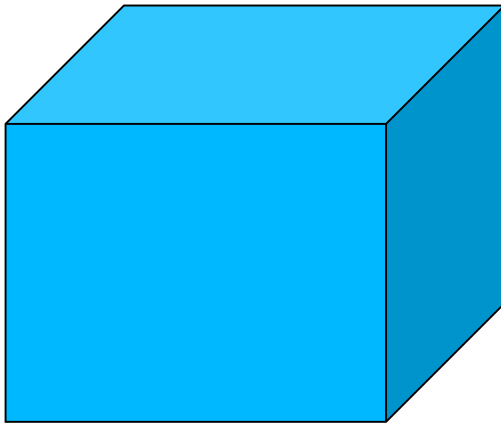
- Powierzchnią ciała stałego nazywamy kilka warstw atomowych, przy czym ostatnia ma kontakt z otaczającą ciało atmosferą (próżnią).
- Międzypowierzchnia zwykle oddziela dwa ciała stałe będące w bardzo bliskim kontakcie.



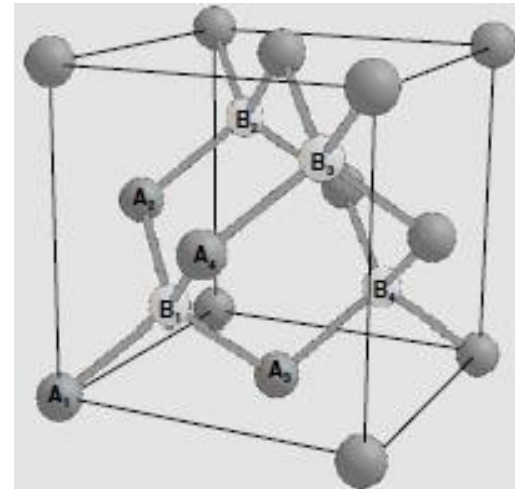
# Powierzchnia

## Obiekt objętościowy (bulk)

$10^{23}$  stopni swobody



periodyczność

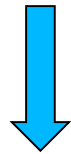


komórka elementarna

# Powierzchnia

## Powierzchnia

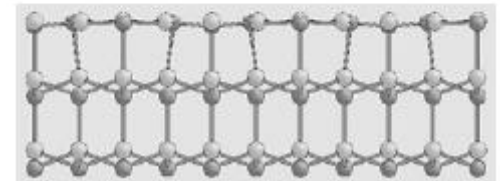
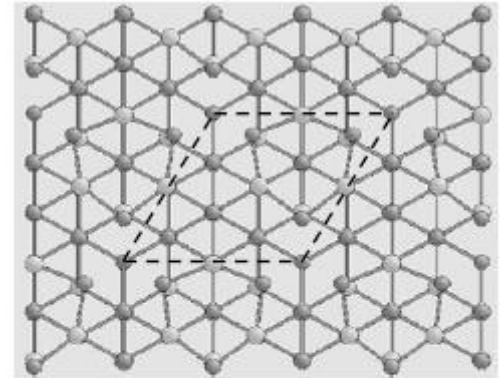
3-wym. symetria jest złamana



komórka elementarna jest większa

rozciąga się na kilka  
monowarstw od „powierzchni”

GaAs



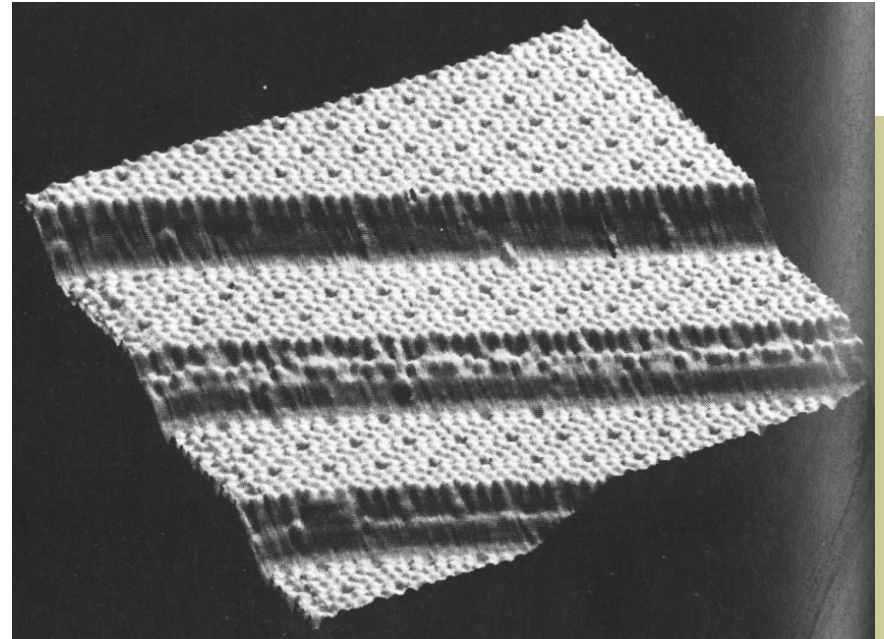
Przykład:

powierzchniowa komórka elementarna czystego Si (111) zawiera 49 atomów w jednej warstwie, do jej restrukturyzacji wymagane jest 4-5 warstw atomowych.

# Powierzchnia

## Własności powierzchni:

- inna struktura elektronowa w porównaniu do ciała stałego,
- niewysyczone wiązania (dangling bonds) – chemicznie aktywne,
- inna struktura krystalograficzna w porównaniu do CS,
- relaksacja,
- adsorpcja, dyfuzja,
- duża gęstość defektów,



# Powierzchnia

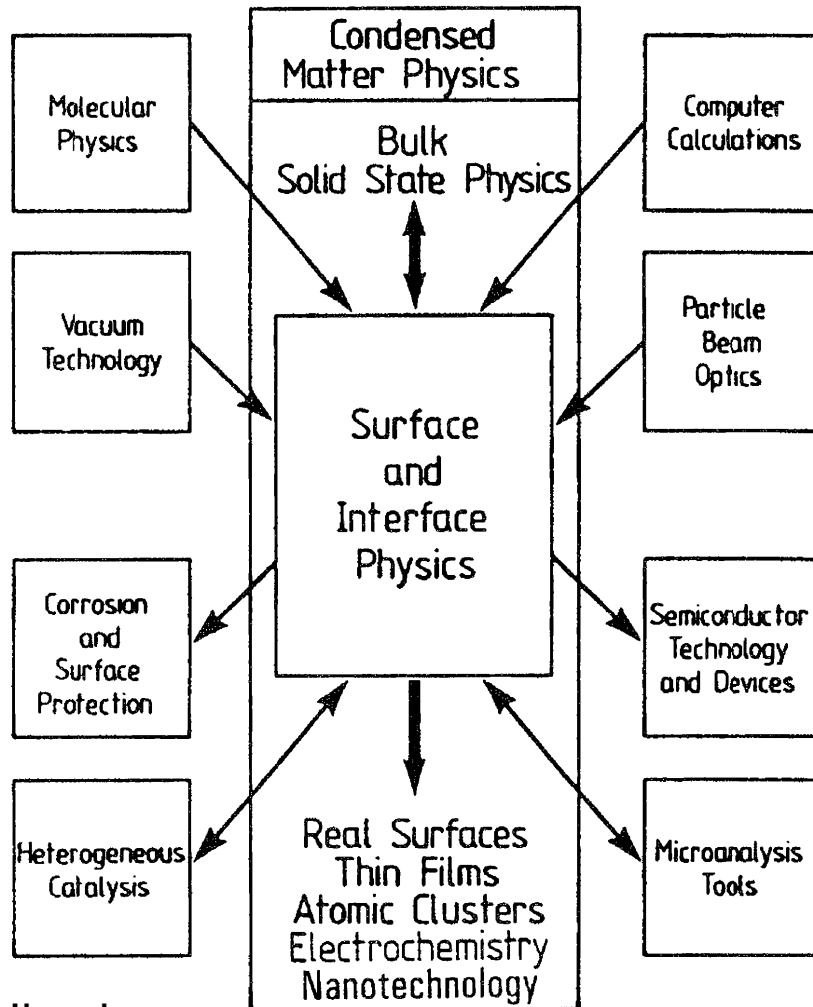
powierzchnia idealna (czysta)



powierzchnia rzeczywista

# Powierzchnia

Wzajemne relacje fizyki powierzchni, jako dyscypliny fizyki ciała stałego i innych dyscyplin



**Fizyka Powierzchni –  
interdyscyplinarna dziedzina  
badań fizycznych**

# Ultra High Vacuum (UHV)

- *Ciśnienie*

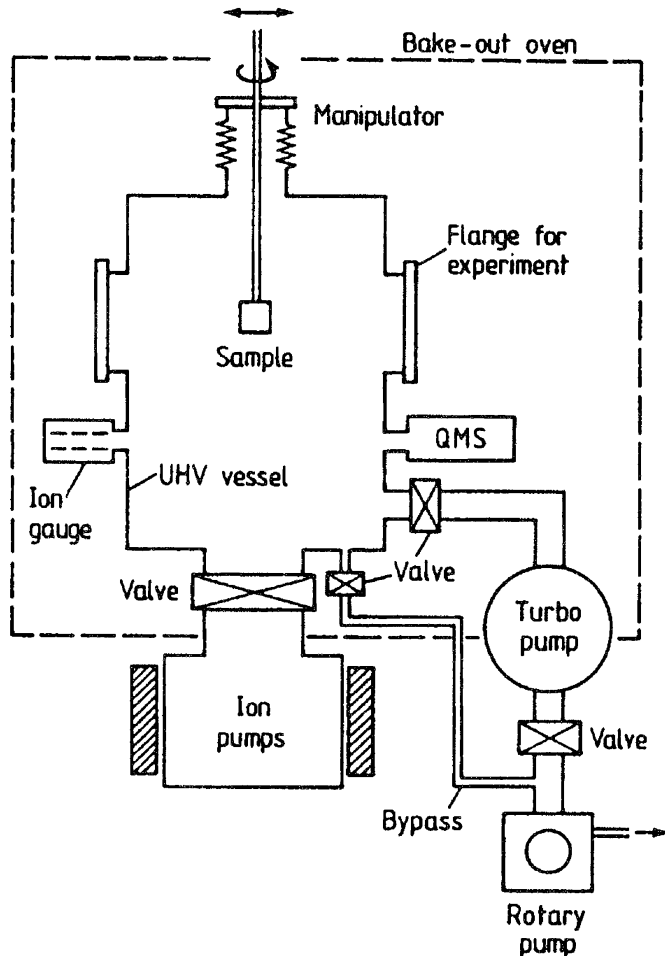
133 Pa = 1 Torr, 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>

- *Próżnia*

niska	$3.3 \times 10^3 < P \text{ (Pa)} < 10^5$
średnia	$10^{-1} < P \text{ (Pa)} < 3.3 \times 10^3$
wysoka	$10^{-4} < P \text{ (Pa)} < 10^{-1}$
bardzo wysoka	$10^{-7} < P \text{ (Pa)} < 10^{-4}$
UHV	$10^{-10} < P \text{ (Pa)} < 10^{-7}$ $P \text{ (Pa)} < 10^{-10}$

# Ultra High Vacuum (UHV)

Przygotowanie dobrze zdefiniowanej (czystej, z zaniedbywalną ilością zanieczyszczeń) powierzchni wymaga ciśnienia niższego niż  $10^{-10}$  Torr ( $10^{-10}$  mbar, ok.  $10^{-8}$  Pa).



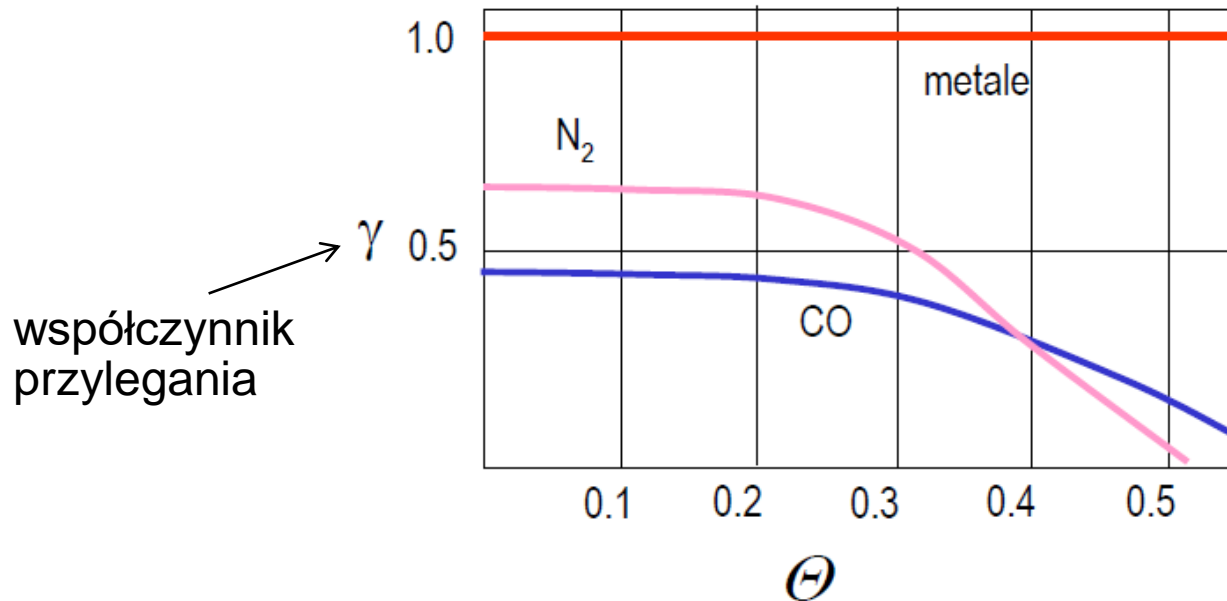
wtedy  
Ilość adsorbowanego gazu / 1h  $\ll$  monowarstwy

komora UHV ze stali nierdzewnej

# Ultra High Vacuum (UHV)

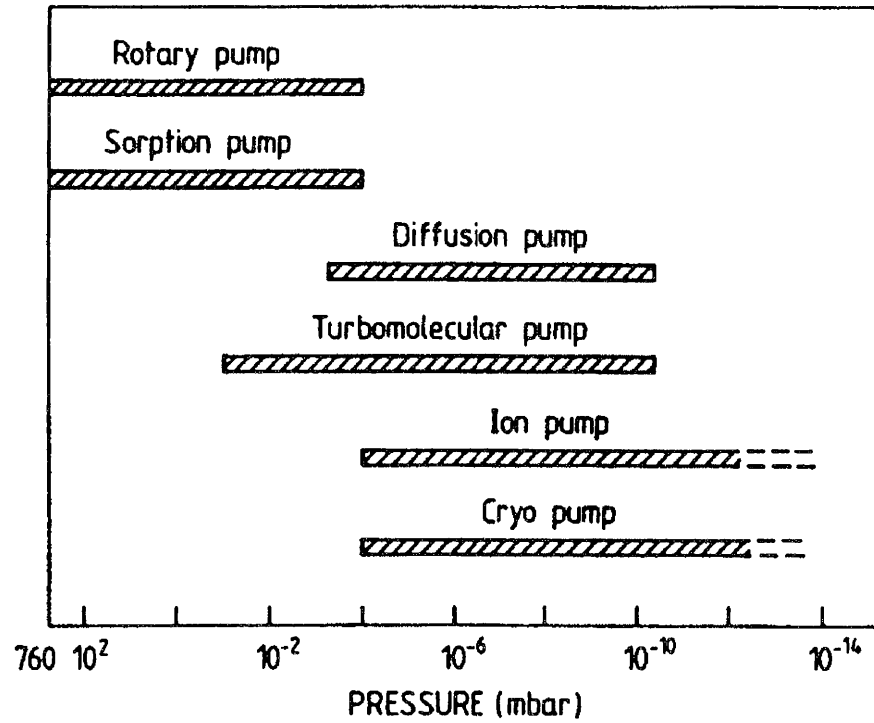
Czas adsorpcji monowarstwy

$p$ [Tr, mbar]	$t_{\text{mono}}$
$10^{-6}$	1 s
$10^{-9}$	1 h
$10^{-11}$	kilka dni

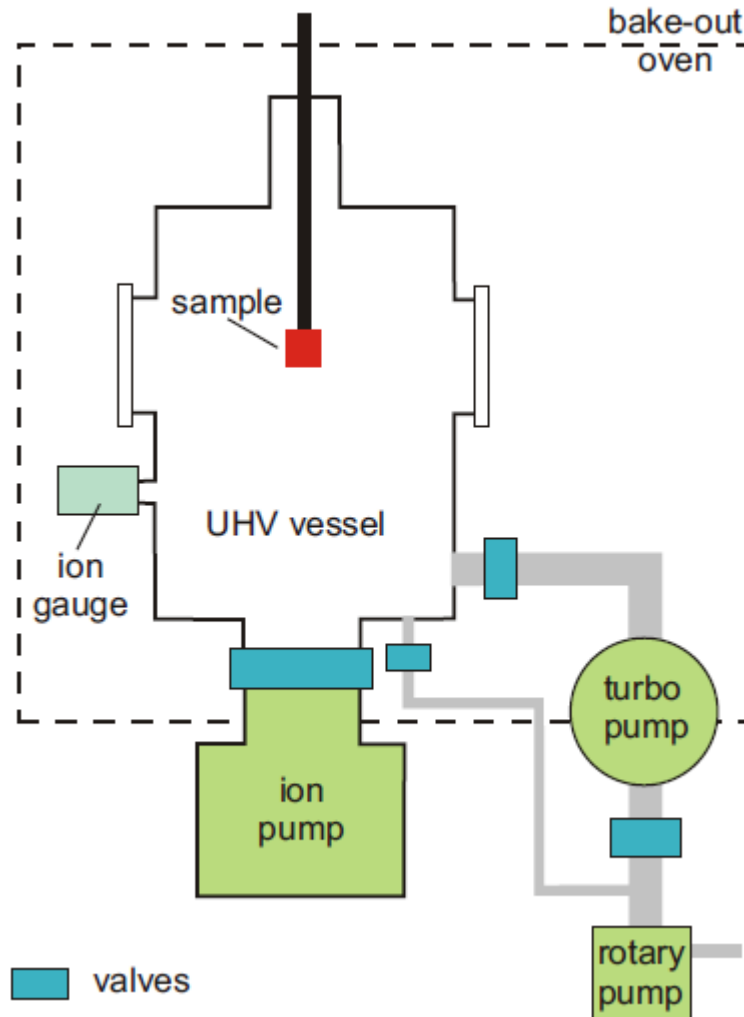




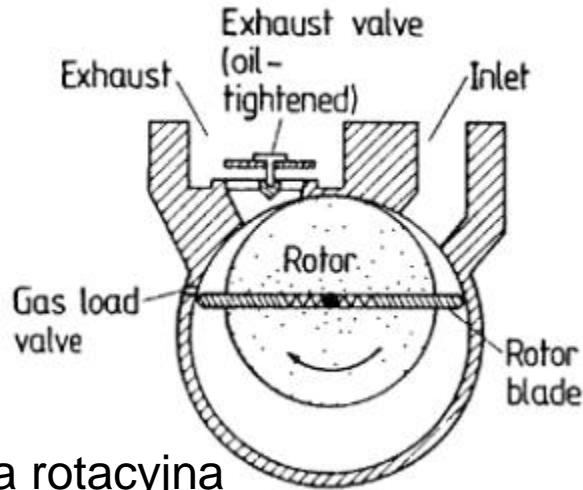
# Ultra High Vacuum (UHV)



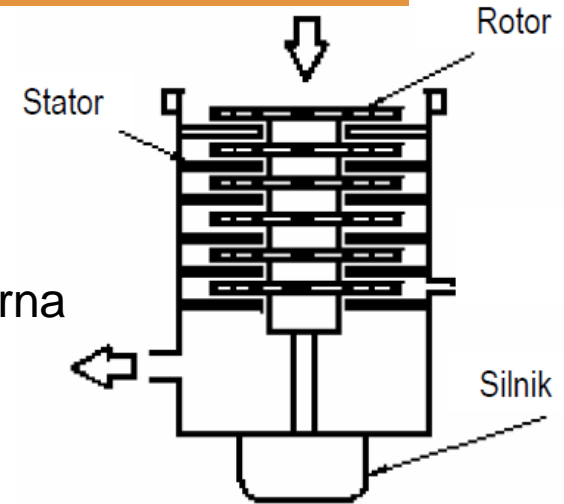
# Ultra High Vacuum (UHV)



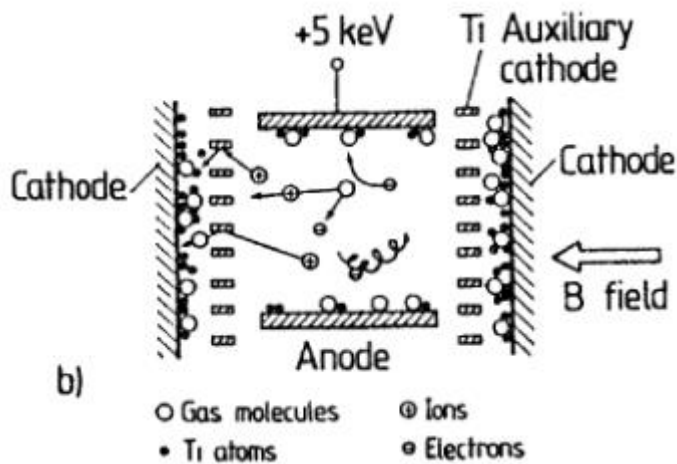
# Ultra High Vacuum (UHV)



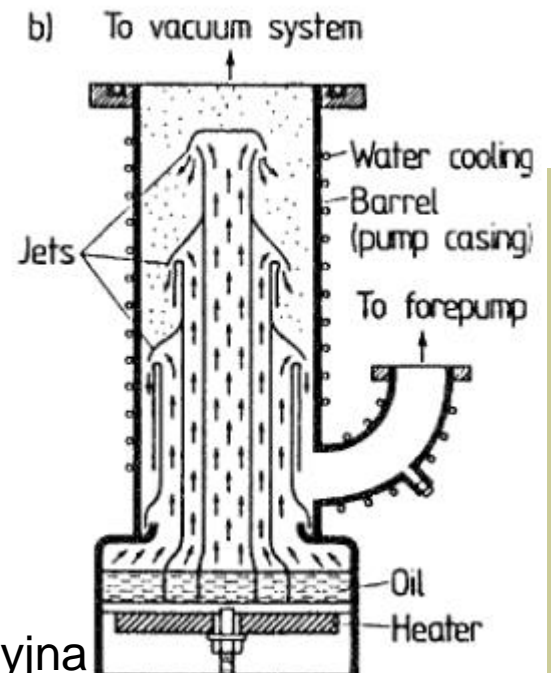
pompa rotacyjna



pompa turbomolekularna

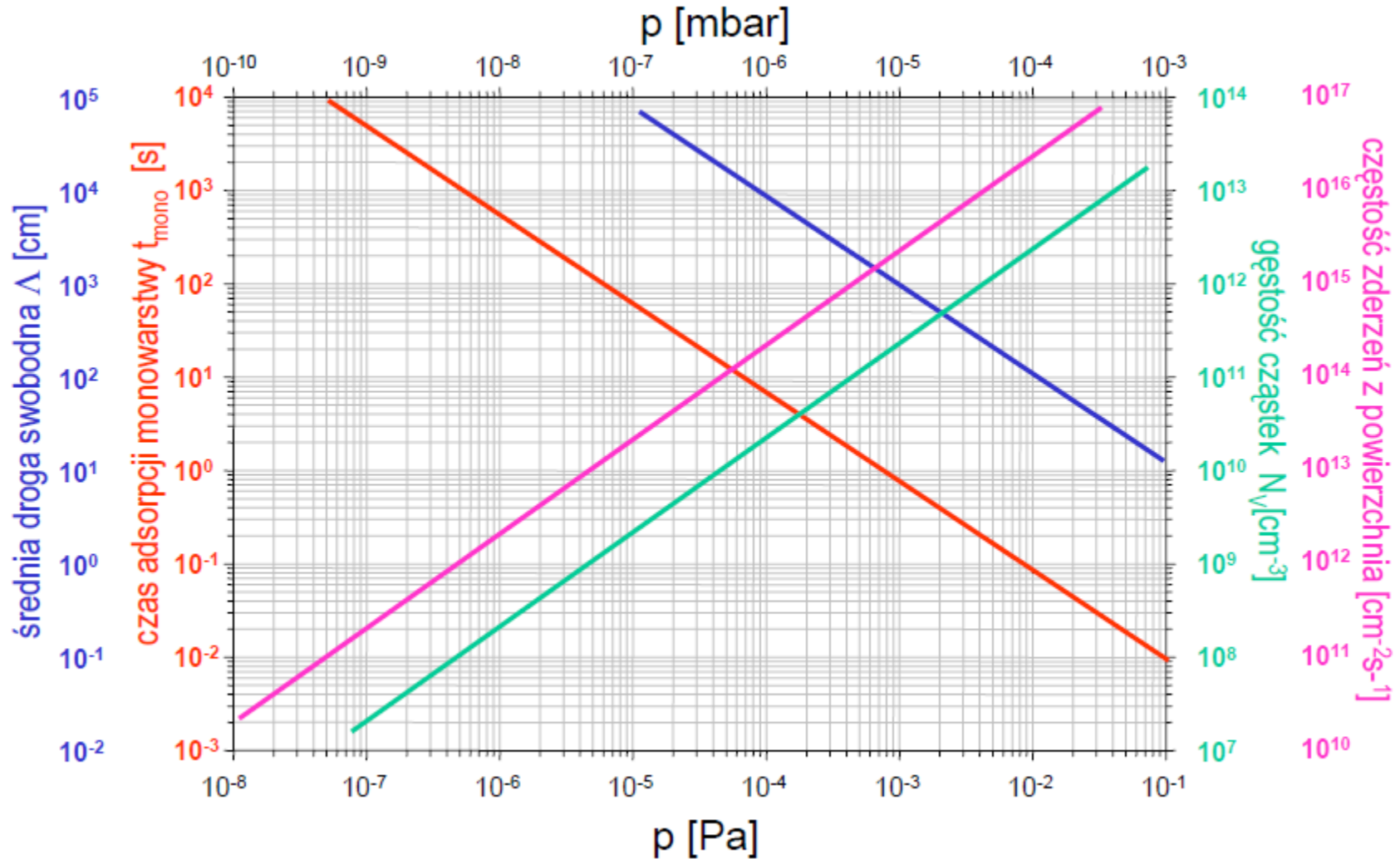


pompa jonowa

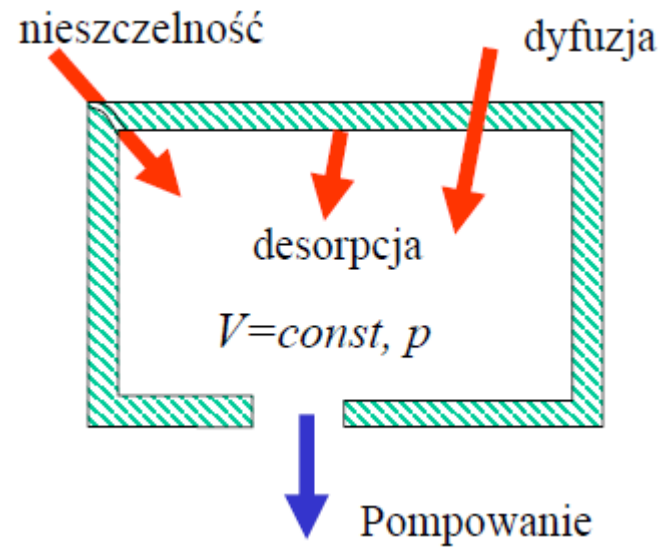


pompa dyfuzyjna

# Ultra High Vacuum (UHV)



# Ultra High Vacuum (UHV)



# Ultra High Vacuum (UHV)

## Desorpcja

TABLICA 3.22. NATĘŻENIE JEDNOSTKOWE DESORPCJI  $I_{1 des(1)}$  i  $I_{1 des(4)}$  PO 1 h I PO 4 h DLA RÓŻNYCH MATERIAŁÓW (METALI, CERAMIK I SZKIEŁ, MAS SYNTETYCZNYCH) PRZY  $T_s = T \approx 300$  K (Wartości orientacyjne wg różnych źródeł)

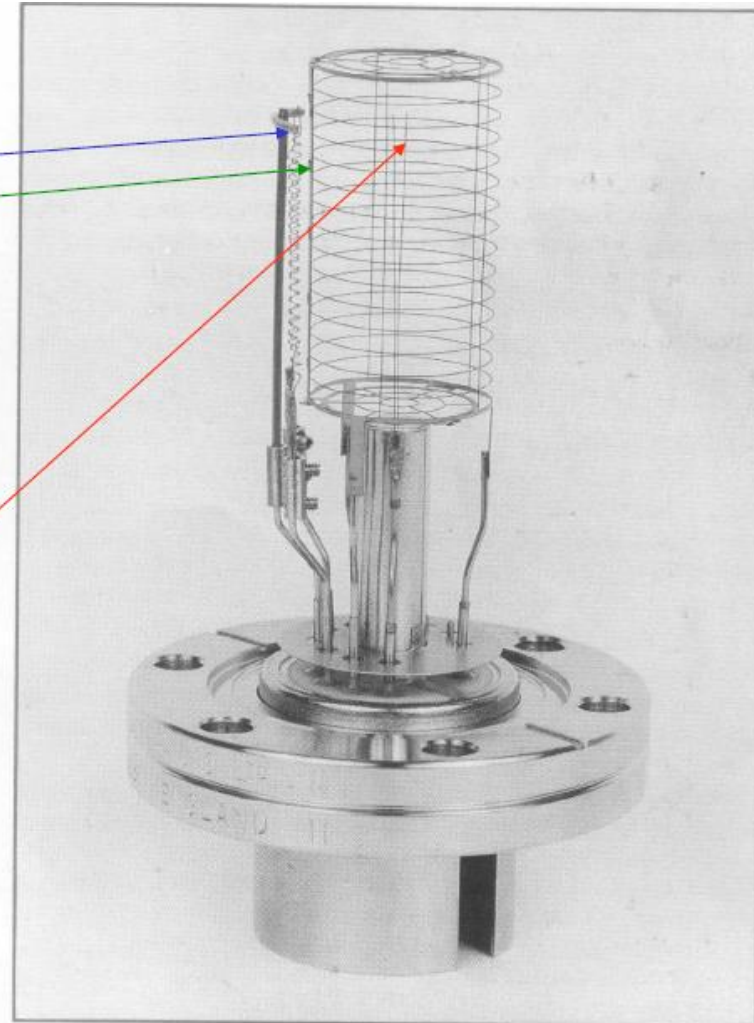
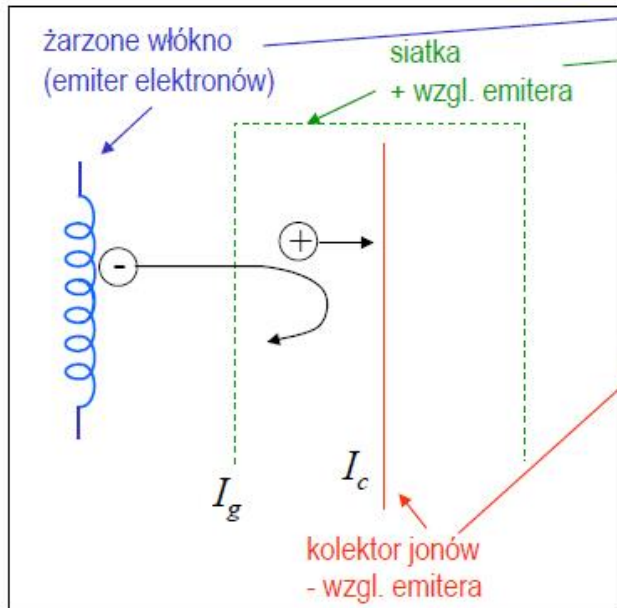
Materiał	$I_{des}$ ( $\text{Pa} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ )				
	po 1 h		po 4 h		
	$I_{1 des(1)}$	$\alpha_{(1)}$	$I_{1 des(4)}$	$\alpha_{(4)}$	
Metale	Stal nierdzewna zwykła dobrze oczyszczona na powierzchni	$(20 \dots 30) \cdot 10^{-6}$	0,8	$6 \cdot 10^{-6}$	0,8–1
	wygrzana w temp. 150°C	$0,1 \cdot 10^{-6}$			
	wygrzana w temp. 250°C	$0,02 \cdot 10^{-6}$			
	wygrzana w temp. 400°C	$0,7 \cdot 10^{-9}$			
	doskonale odgazowana (wolna od CO)	$10^{-15}$			
	Stal miękka (zwykła) lekko zardzewiała	$70 \cdot 10^{-6}$	1...3		1...1, 5
	$0,7 \cdot 10^{-3}$				

# Ultra High Vacuum (UHV)



# Ultra High Vacuum (UHV)

## Pomiar ciśnienia - głowica jonizacyjna Bayarda-Alperta



Vacuum Generators' VIG17M UHV ionisation gauge

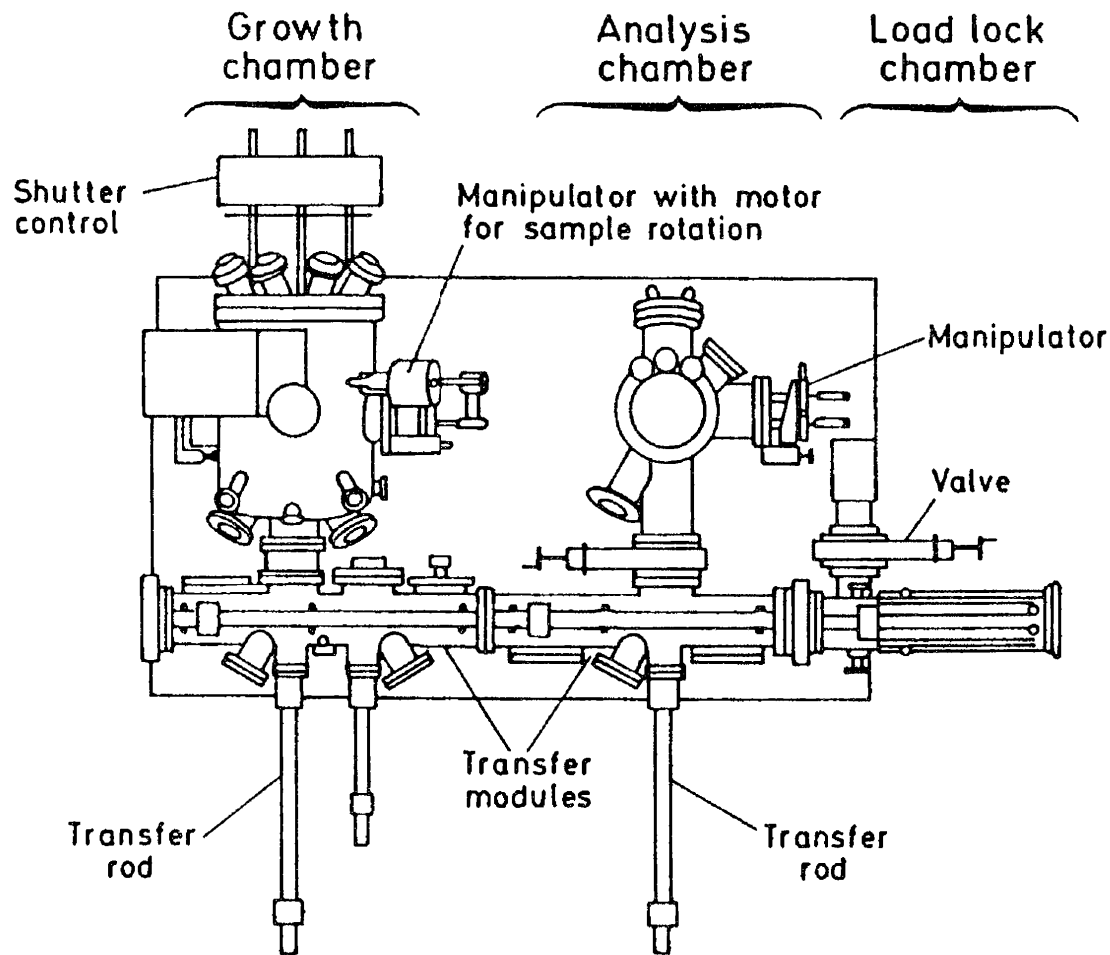
$$I_c = const * n * I_g$$

$$p = nkT$$

$$p = \frac{kT}{const} * \frac{I_c}{I_g} = \frac{1}{S} \frac{I_c}{I_g}$$



# Ultra High Vacuum (UHV)



**Fig. 2.10.** Schematic top view over a combination of growth UHV chamber for MBE (or MOMBE) with analysis and load-lock chamber. All UHV units are separately pumped (ion, cryo and turbo pumps are not shown). The sample, usually wafers, can be moved through the various transfer modules (mechanically or magnetically operated) and transferred into the corresponding chambers by the transfer rods

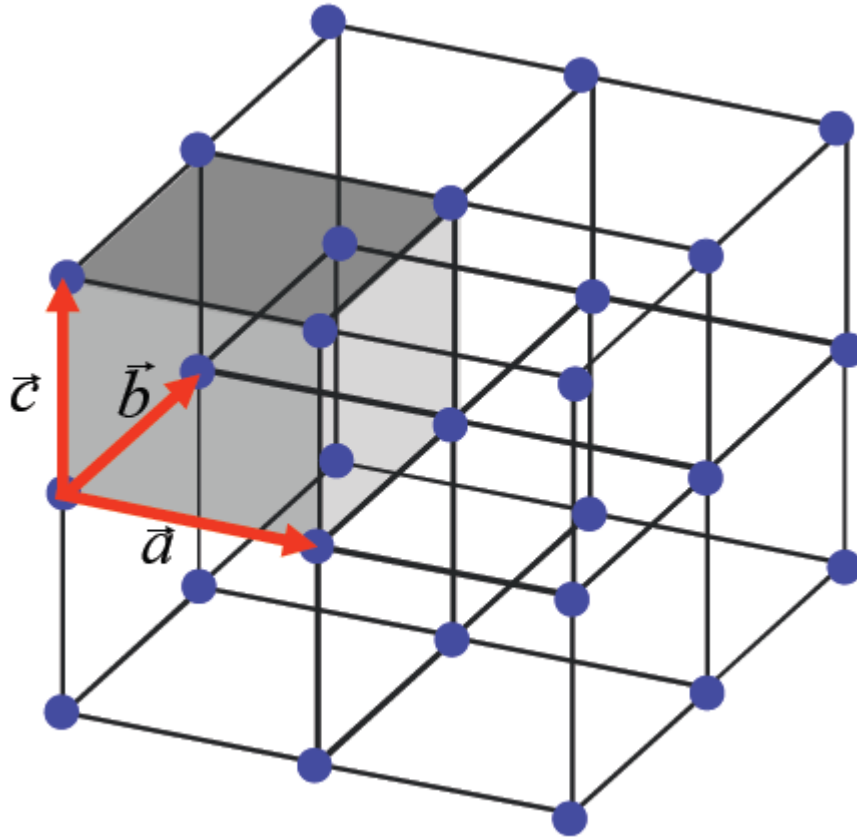
# Powierzchnia idealna

Przygotowanie idealnej (czystej) powierzchni (seminarium 1):

- Łupanie w UHV
- Bombardowanie jonami, wygrzewanie
- Metody wzrostu: MBE, MOCVD
- Inne ?

# Struktura powierzchni ciał stałych

## Struktura (sieć) 3D

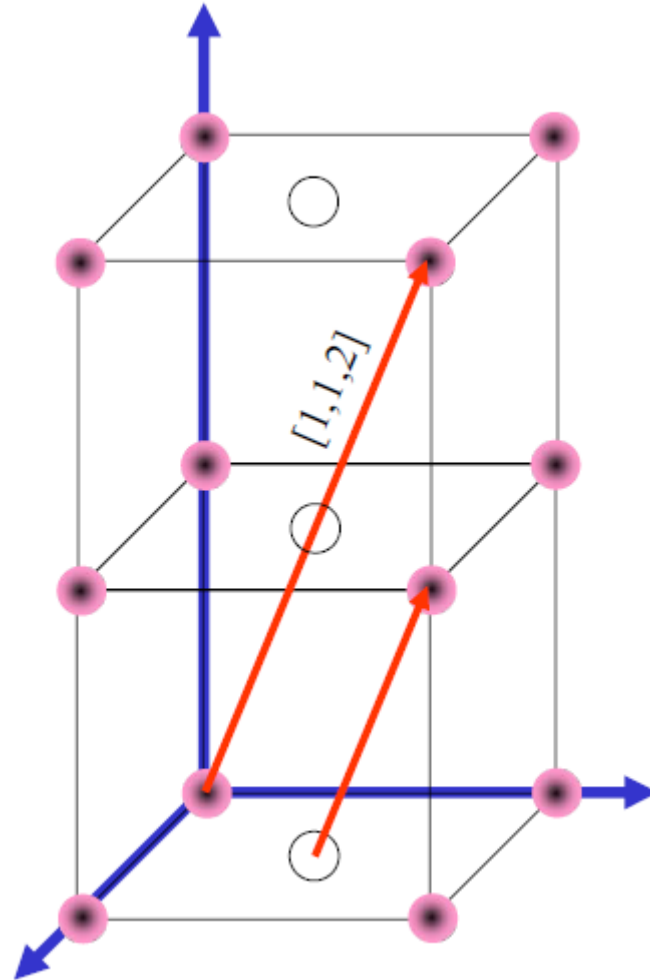


Prowadzi to do:  
7 układów krystalograficznych,  
14 typów sieci Bravais

$$\vec{R}_{fgh} = f\vec{a} + g\vec{b} + h\vec{c}$$

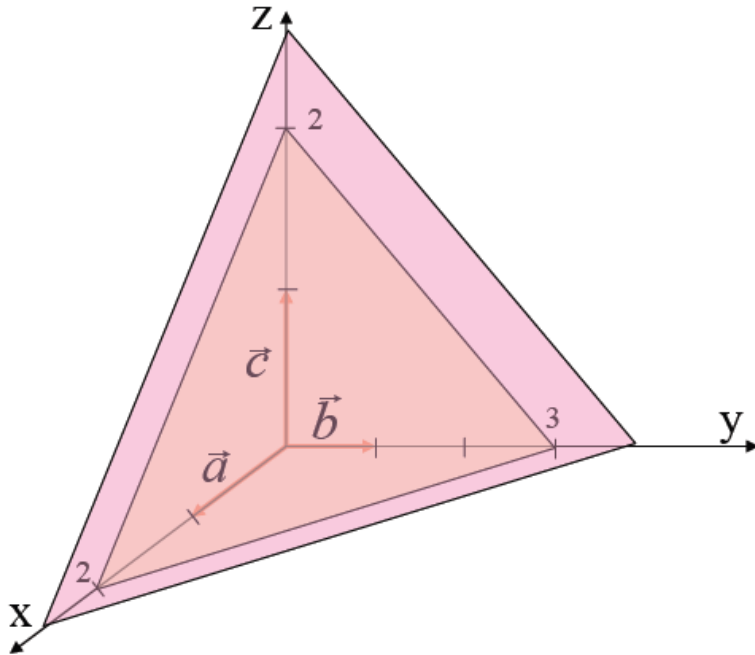
# Struktura powierzchni ciał stałych

Proste sieciowe



# Struktura powierzchni ciał stałych

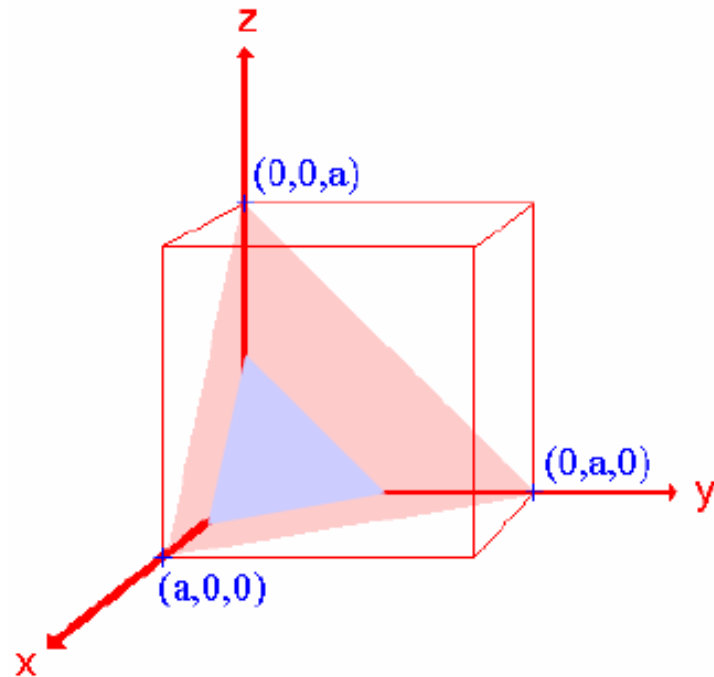
## Płaszczyzny sieciowe – wskaźniki Millera



1. znaleźć współrzędne przecięcia płaszczyzny z osiami: 2, 3, 2
2. utworzyć odwrotności tych liczb:  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/2$
3. znaleźć trzy najmniejsze liczby całkowite o tym samym stosunku: 3, 2, 3
4. liczby te zapisane w nawiasie są wskaźnikami płaszczyzny (hkl) - (323)

# Struktura powierzchni ciał stałych

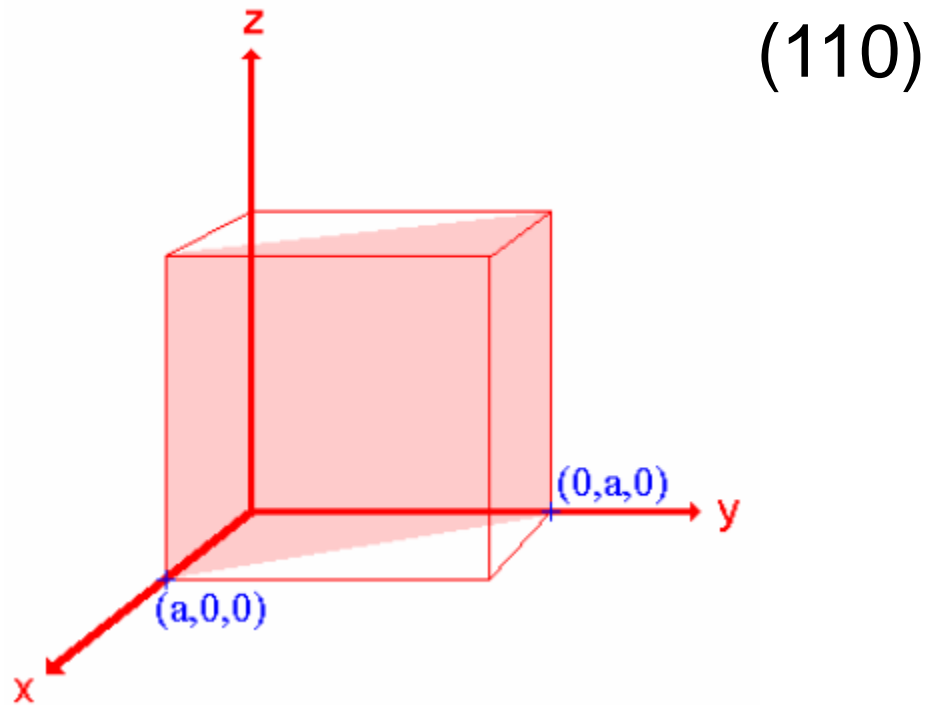
Płaszczyzny sieciowe – wskaźniki Millera  
Przykłady w układzie regularnym



(111)

# Struktura powierzchni ciał stałych

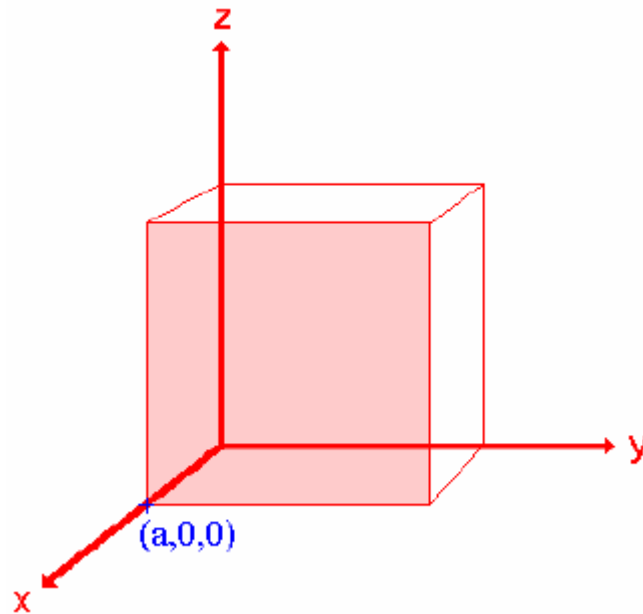
Płaszczyzny sieciowe – wskaźniki Millera  
Przykłady w układzie regularnym



# Struktura powierzchni ciał stałych

Płaszczyzny sieciowe – wskaźniki Millera  
Przykłady w układzie regularnym

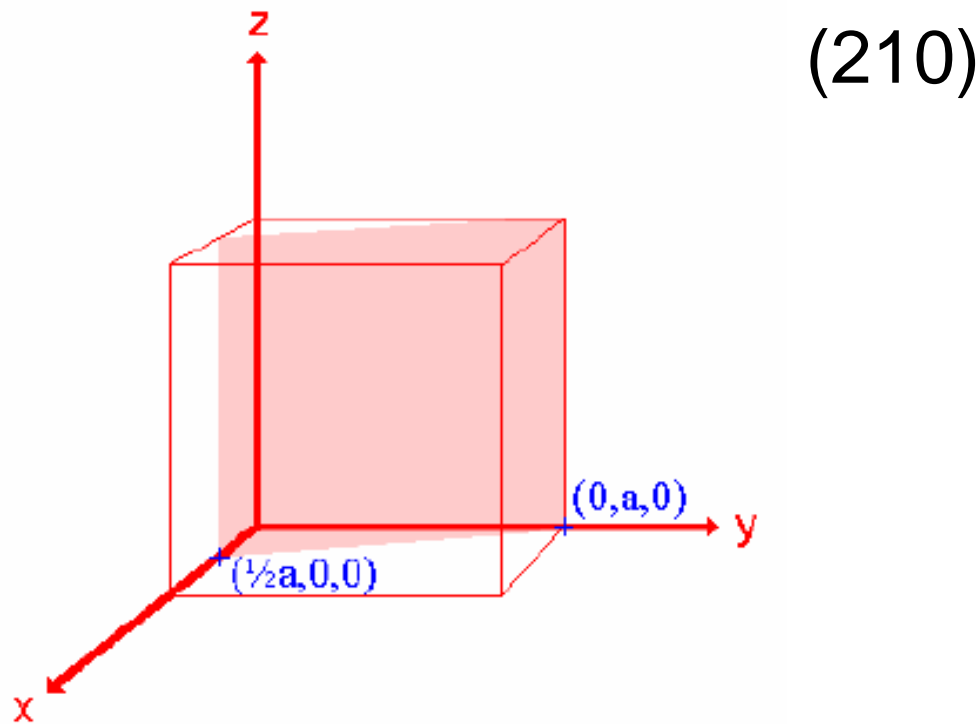
(100)





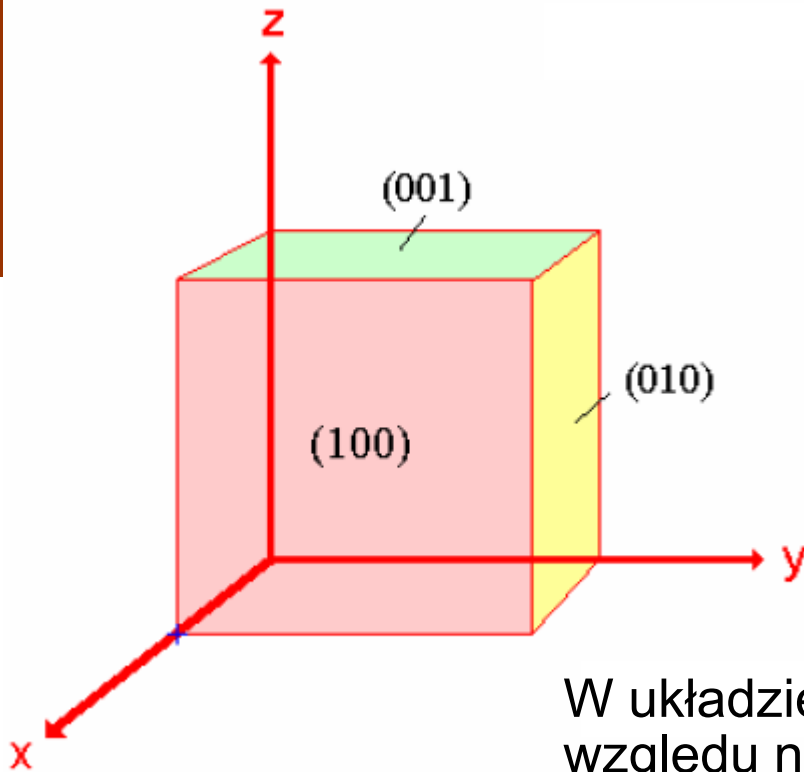
# Struktura powierzchni ciał stałych

Płaszczyzny sieciowe – wskaźniki Millera  
Przykłady w układzie regularnym



# Struktura powierzchni ciał stałych

Płaszczyzny sieciowe – wskaźniki Millera  
Przykłady w układzie regularnym

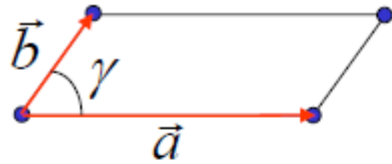


W układzie regularnym wszystkie 6 płaszczyzn, ze względu na symetrię, jest sobie równoważnych.  
zbiór równoważnych płaszczyzn -  $\{100\}$

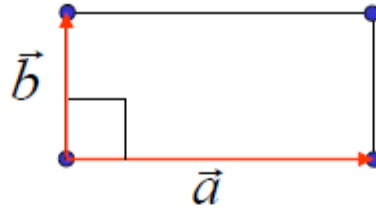
kierunek  $[hkl]$  jest prostopadły do  $(hkl)$

# Struktura powierzchni ciał stałych

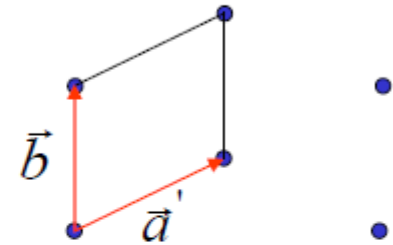
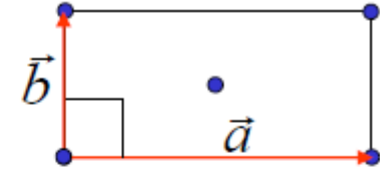
## Struktura (sieć) 2D



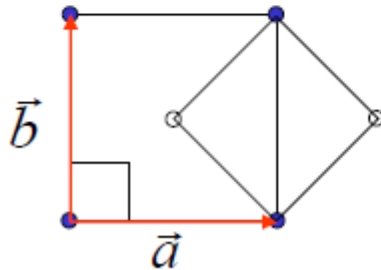
ukośna



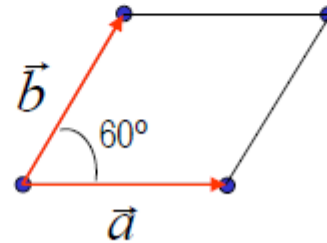
prostokątna



prostokątna  
centrowana



kwadratowa,  $a=b$



heksagonalna  $a=b$

5 typów sieci Bravais

$$\vec{R}_{fg} = f\vec{a} + g\vec{b}$$

# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

Zwykle warstwa powierzchniowa wykazuje inną periodyczność niż warstwy położone niżej – rekonstrukcja powierzchni.

Zapis macierzowy

$\vec{R}^b = f\vec{a}_{1b} + g\vec{a}_{2b}$  - wektor sieci płaskiej podłoża

$$\vec{a}_s = M\vec{a}_b$$

$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$  - macierz transformacji

$$\begin{aligned} \vec{a}_{1s} &= m_{11}\vec{a}_{1b} + m_{12}\vec{a}_{2b} \\ \vec{a}_{2s} &= m_{21}\vec{a}_{1b} + m_{22}\vec{a}_{2b} \end{aligned}$$

$A = B \det M$  – relacja między powierzchnią  $A$  komórki sieciowej  $s$  i powierzchnią  $B$  komórki sieciowej  $b$

# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

relacja prosta –  $M$  jest liczbą całkowitą,

koincydencja –  $M$  jest liczbą wymierną,

komórki niekoherentne –  $M$  jest liczbą niewymierną

# Struktura powierzchni ciał stałych

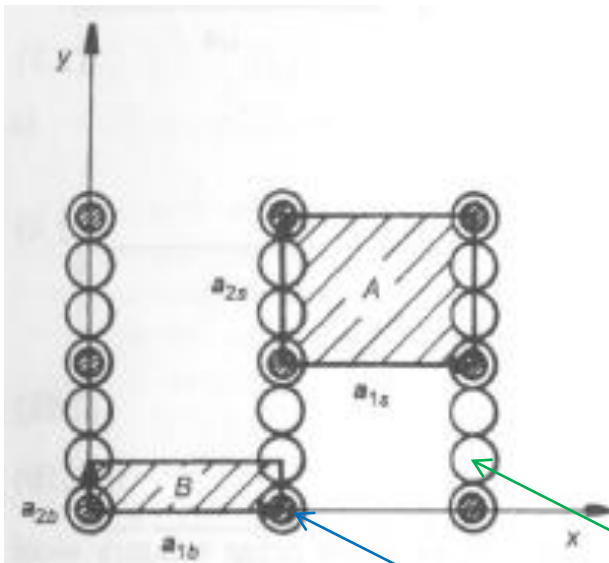
Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

Zapis Wooda

$$(\vec{a}_{1s}/\vec{a}_{1b} \times \vec{a}_{2s}/\vec{a}_{2b})R^\circ$$

Relacja prosta

$$\begin{aligned}\vec{a}_{1s} &= 1\vec{a}_{1b} + 0\vec{a}_{2b} = \vec{a}_{1b} \\ \vec{a}_{2s} &= 0\vec{a}_{1b} + 3\vec{a}_{2b} = 3\vec{a}_{2b}\end{aligned}$$



$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, A = 3B$$

lub

$$(\vec{a}_{1s}/\vec{a}_{1b} \times \vec{a}_{2s}/\vec{a}_{2b})R^\circ = (1 \times 3)$$

węzeł sieci objętościowej  
węzeł sieci powierzchniowej

# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

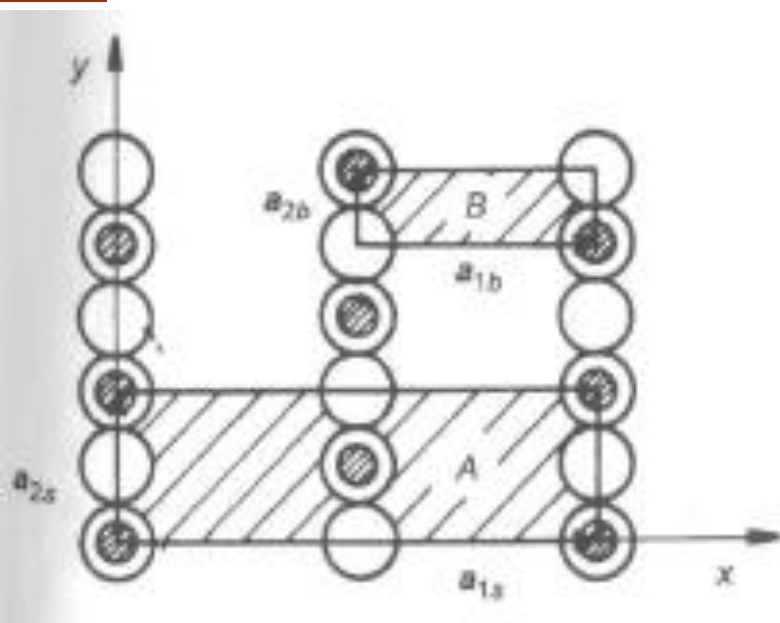
Relacja prosta – komórka powierzchniowo centrowana

$$\begin{aligned}\vec{a}_{1s} &= 2\vec{a}_{1b} + 0\vec{a}_{2b} = 2\vec{a}_{1b} \\ \vec{a}_{2s} &= 0\vec{a}_{1b} + 2\vec{a}_{2b} = 2\vec{a}_{2b}\end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, A = 4B$$

lub

$$(2 \times 2)c$$



# Struktura powierzchni ciał stałych

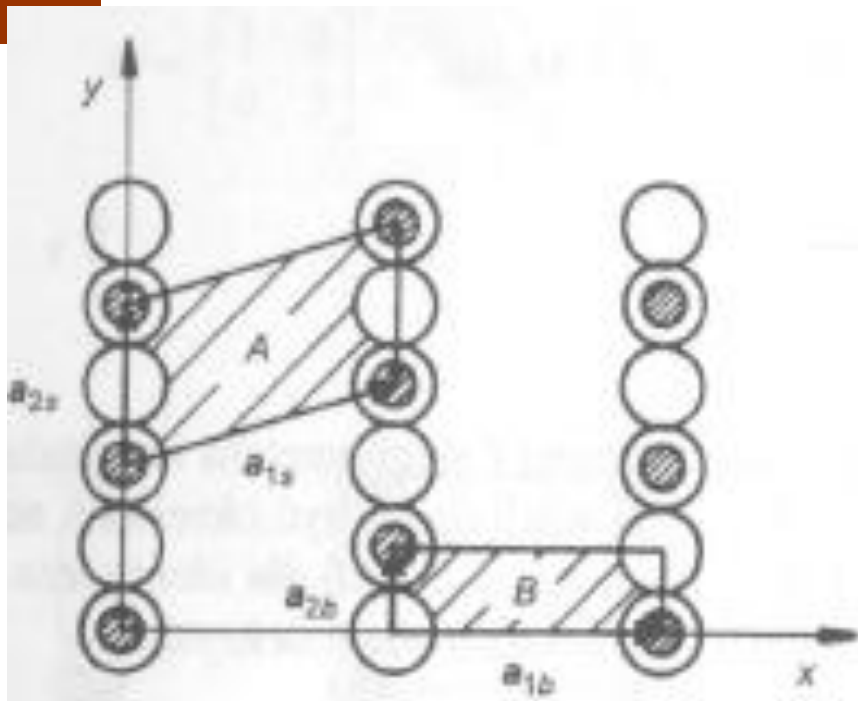
Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

Relacja prosta – komórka powierzchniowa ukośna

$$\begin{aligned}\vec{a}_{1s} &= 1\vec{a}_{1b} + 1\vec{a}_{2b} \\ \vec{a}_{2s} &= 0\vec{a}_{1b} + 2\vec{a}_{2b}\end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, A = 2B$$

brak zapisu Wood'a

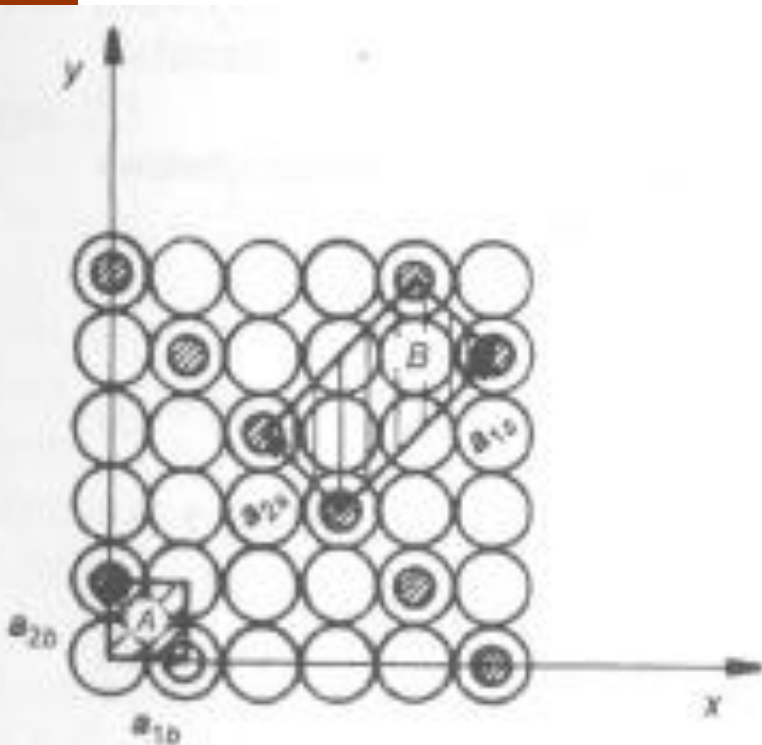




# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

Relacja prosta – prostokątna komórka na sieci kwadratowej



$$\vec{a}_{1s} = 2\vec{a}_{1b} + 2\vec{a}_{2b}$$
$$\vec{a}_{2s} = -1\vec{a}_{1b} + 1\vec{a}_{2b}$$

$$M = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, A = 4B$$

lub

$$(2\sqrt{2} \times \sqrt{2})45^\circ$$

# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

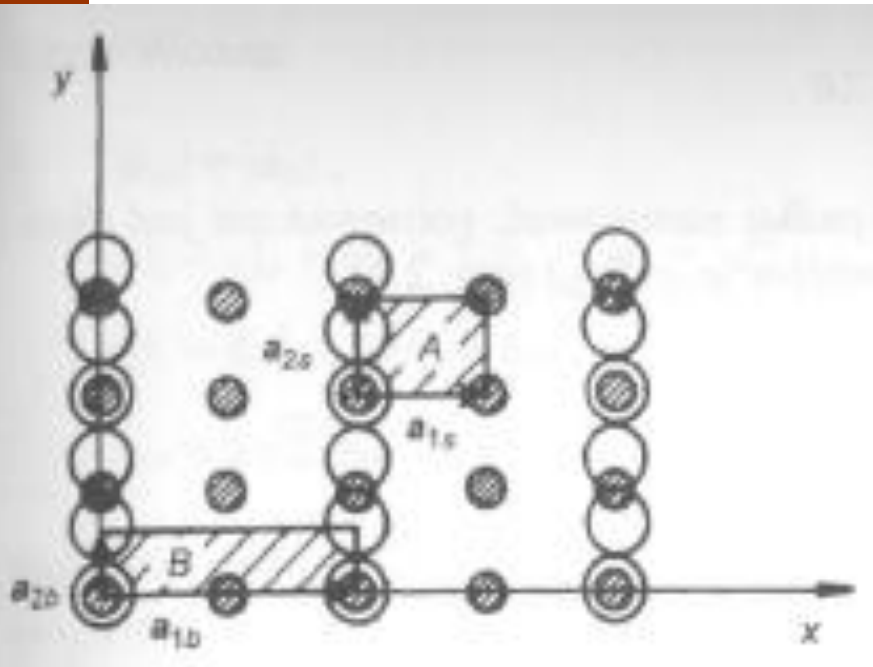
Relacja koincydencji

$$\begin{aligned}\vec{a}_{1s} &= 1/2\vec{a}_{1b} + 0\vec{a}_{2b} = 1/2\vec{a}_{1b} \\ \vec{a}_{2s} &= 0\vec{a}_{1b} + 3/2\vec{a}_{2b} = 3/2\vec{a}_{2b}\end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 3/2 \end{bmatrix}, A = 3/4B$$

lub

$$(1/2 \times 3/2)$$



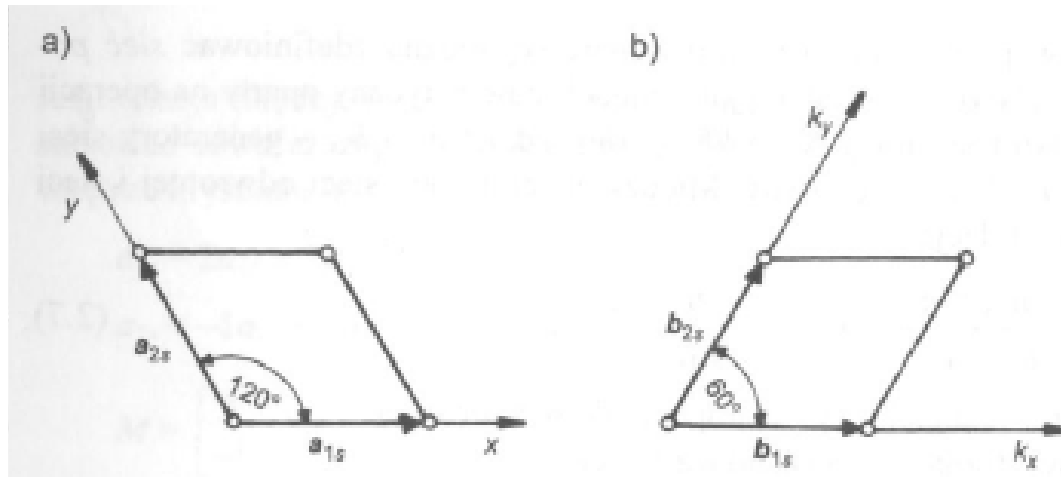
# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

Sieć powierzchniowa odwrotna

$$b_{1s} = 2\pi \frac{a_{2s} \times n}{|a_{1s} \times a_{2s}|}, \quad b_{2s} = 2\pi \frac{n \times a_{1s}}{|a_{1s} \times a_{2s}|}$$

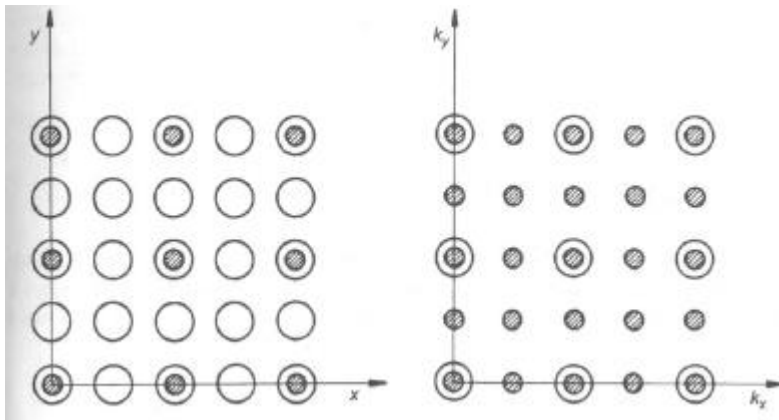
$$a_{is} b_{js} = 2\pi \delta_{ij}$$



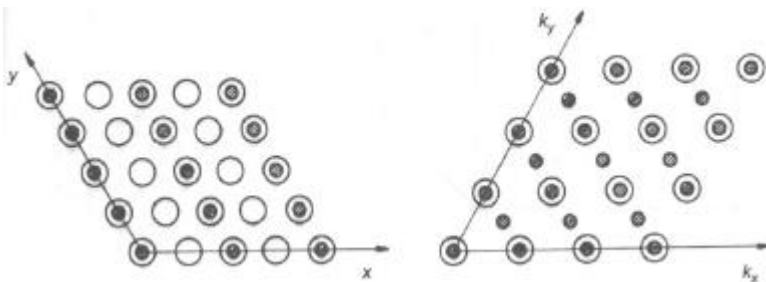
# Struktura powierzchni ciał stałych

Relacja pomiędzy komórką sieci powierzchniowej a komórką wnętrza kryształu.

Sieć powierzchniowa odwrotna - supersieci



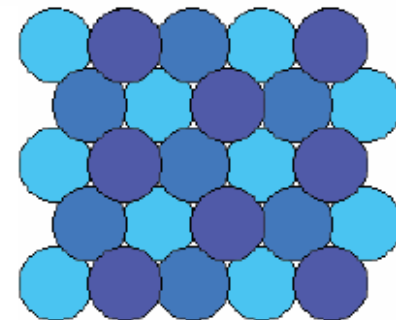
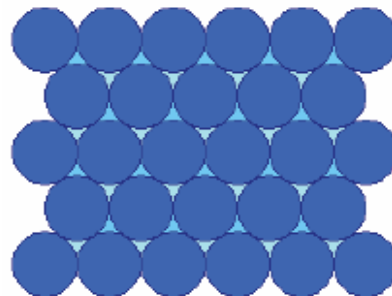
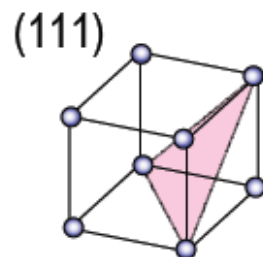
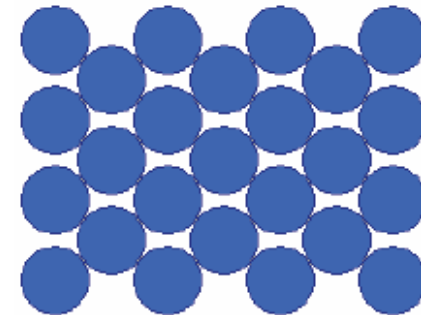
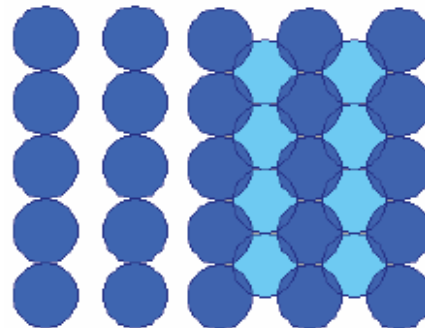
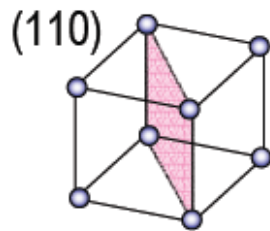
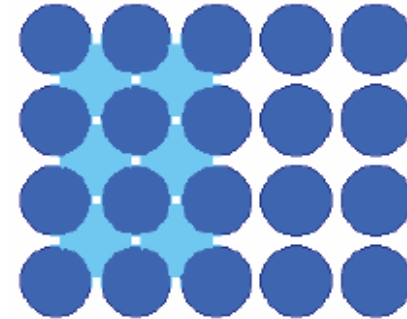
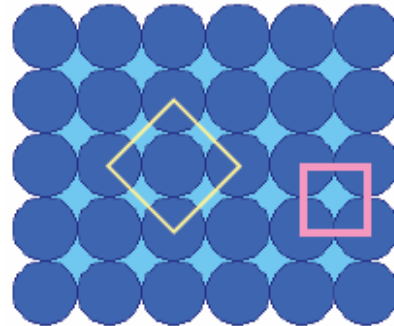
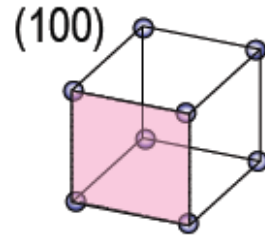
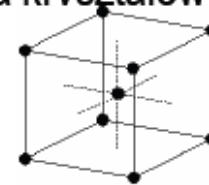
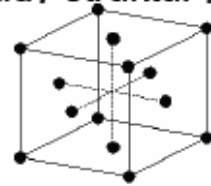
supersieć 2x2 sieci kwadratowej



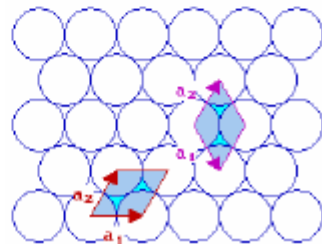
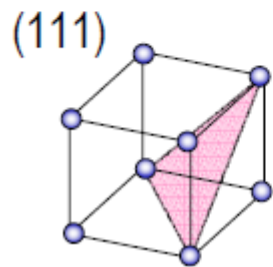
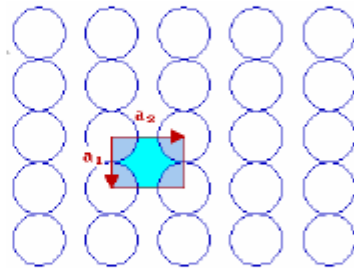
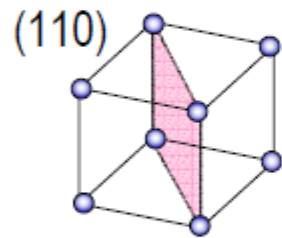
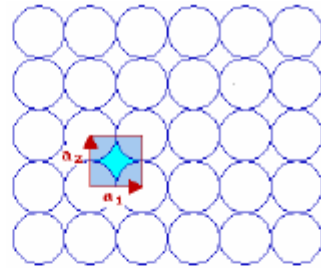
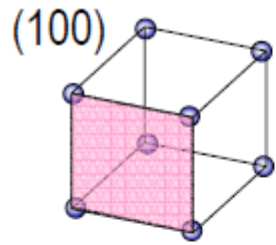
supersieć 2x1 sieci heksagonalnej

# Struktura powierzchni ciał stałych

Przykłady struktur powierzchniowych dla krystalów regularnych



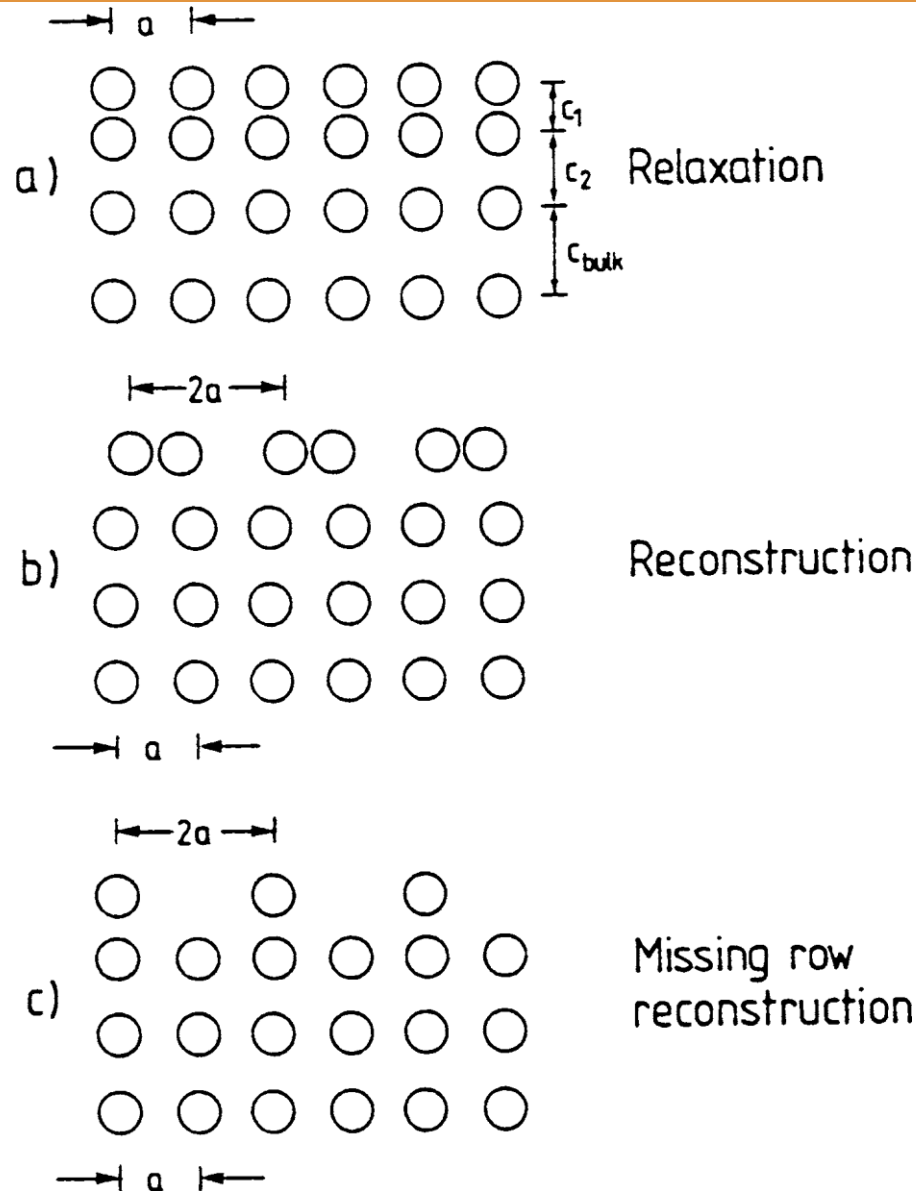
# Struktura powierzchni ciał stałych



**upakowanie**

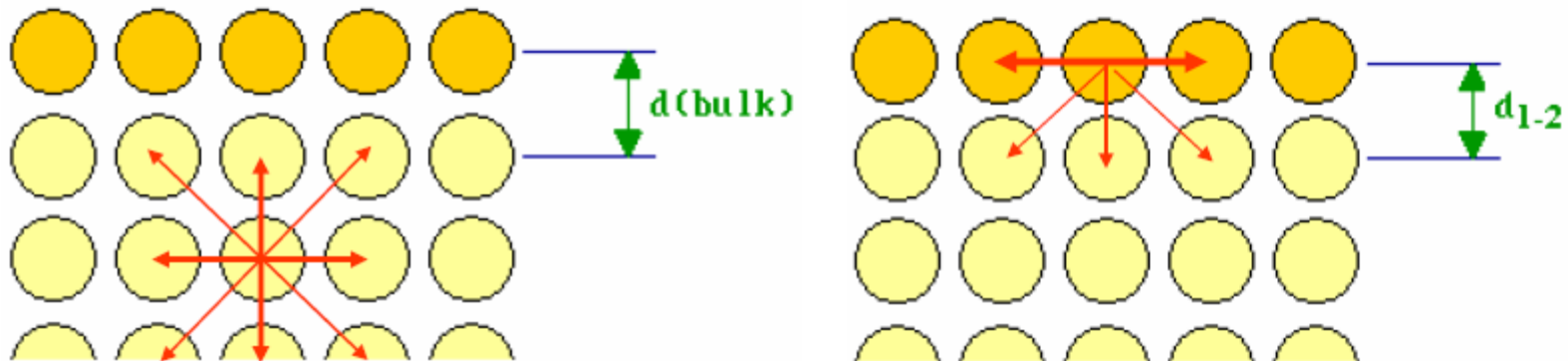
**fcc (111) > fcc (100) > fcc (110)**

# Struktura powierzchni ciał stałych



# Struktura powierzchni ciał stałych

## Relaksacja



Gęsto upakowane powierzchnie: FCC(111), BCC(110)

- mała relaksacja  $\Delta d_{1-2} \cong 1\%$

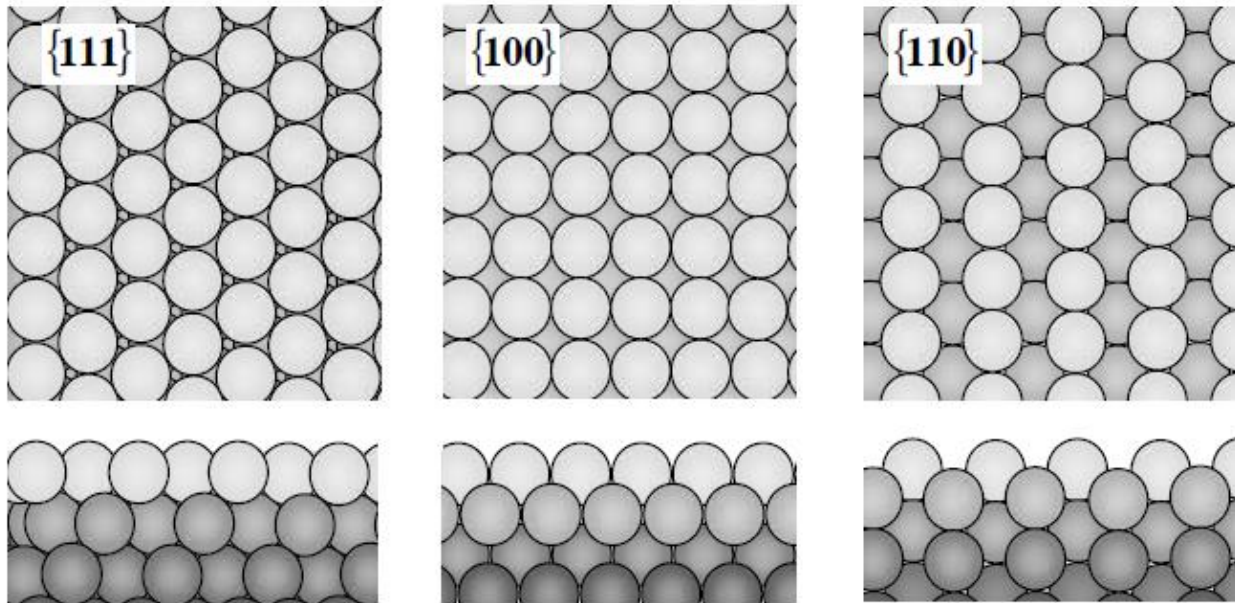
Otwarte powierzchnie FCC(110), BCC(100)

- duża relaksacja  $\Delta d_{1-2} \cong 5-10\%$



# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy fcc – Cu, Ag Au, Ni, Rh, Pd, Ir i Pt



powierzchnie niezrekonstruowane – Ni, Cu, Rh, Pd i Ag

relaksacja 1-2% dla {100} i {111}

Najgęściej upakowane (najbardziej stabilne) powierzchnie = {111}, {100} i {110}.

Surface coordination number (liczba najbliższych sąsiadów) = 9, 8 i 7.

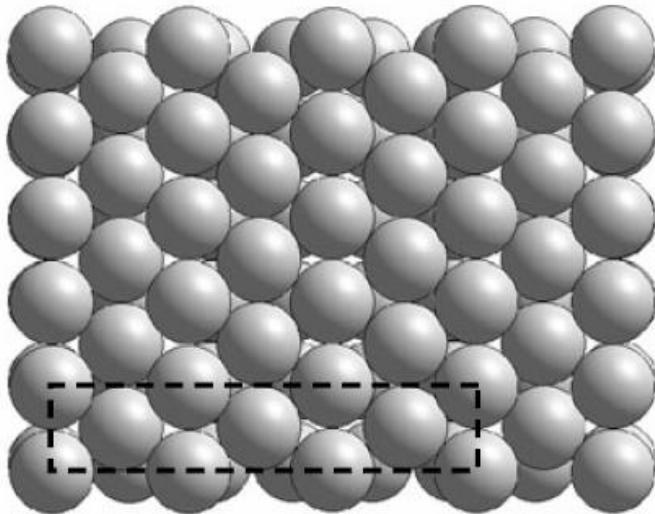
Liczba zerwanych wiązań / atom powierzchni – 3, 4 i 5.

Material	$\Delta d_{111}$	$\Delta d_{23}$
Cu{110}	-9%	+3%
Ag{110}	-8%	0%
Ni{110}	-9%	+3.5%
Pd{110}	-5%	+1%
Rh{110}	-7%	+2%

# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy fcc – Cu, Ag Au, Ni, Rh, Pd, Ir i Pt

Większość powierzchni dla metali przejściowych 5d (Ir, Pt i Au) podlega rekonstrukcji (zwiększa się liczba atomów na powierzchni w porównaniu do powierzchni niezrekonstruowanej).

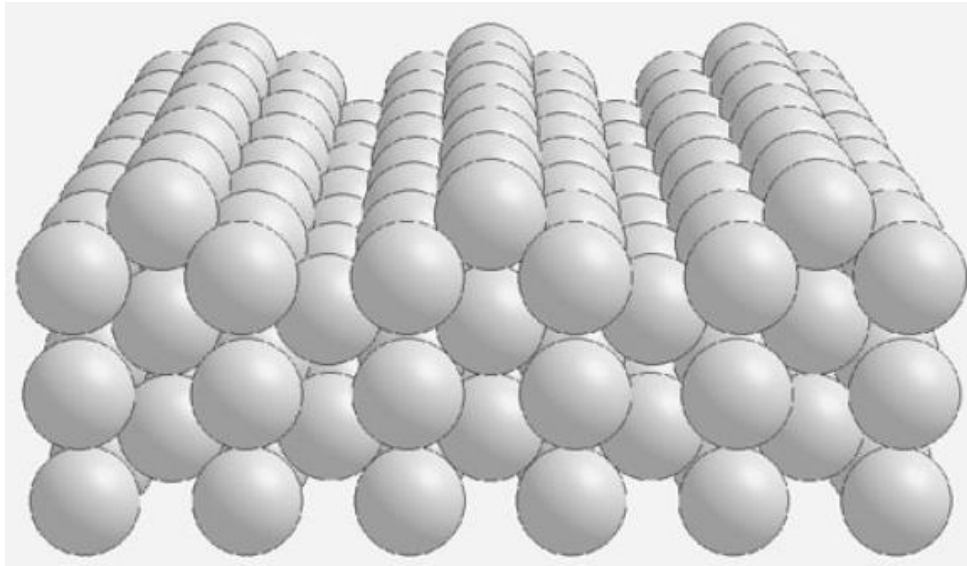


rekonstrukcja (5x1) dla Ir(100)



# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy fcc – Cu, Ag Au, Ni, Rh, Pd, Ir i Pt



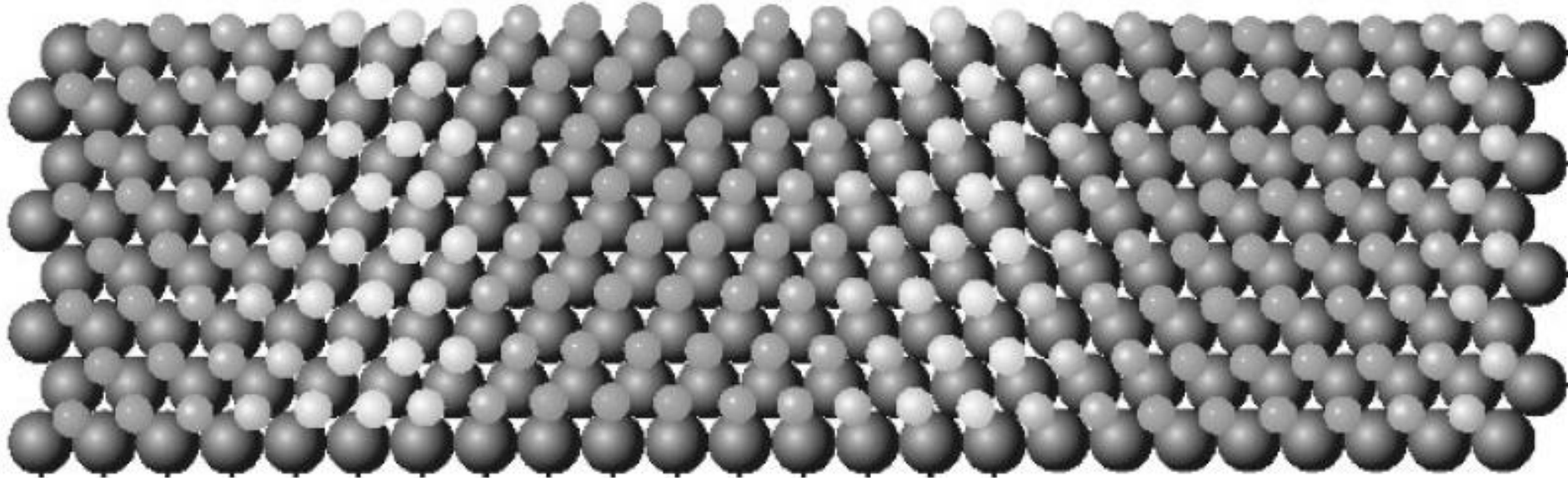
rekonstrukcja (1x2) dla płaszczyzn {110} Ir, Pt i Au – „fasetki”

# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy fcc – Cu, Ag Au, Ni, Rh, Pd, Ir i Pt

W kierunkach  $\{111\}$  tylko powierzchnia Au podlega rekonstrukcji.

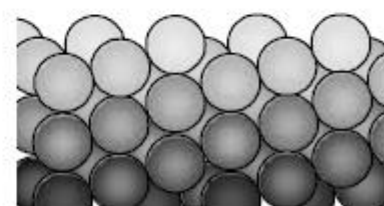
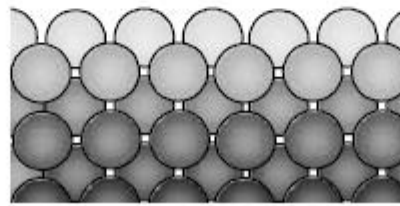
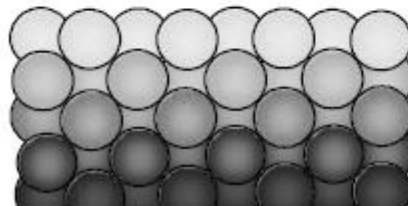
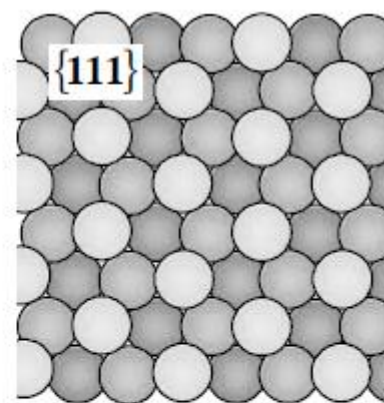
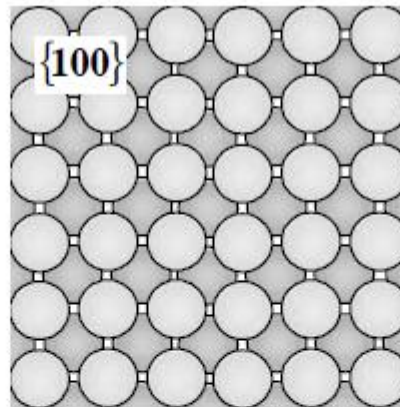
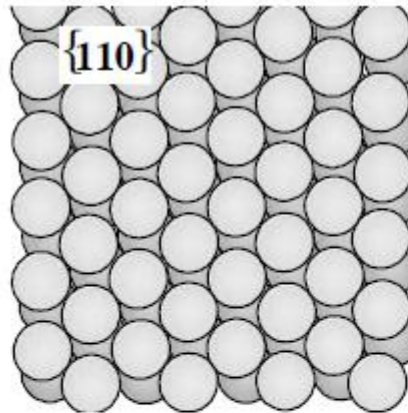
- silne naprężenia jednoosiowe w kierunku  $[110]$ ,
- prowadzi to „w końcu” do rekonstrukcji  $(1 \times 2)$



fcc – mostek – hcp – mostek – fcc

# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy bcc – W, Mo, Nb, Fe



Najgęściej upakowane (najbardziej stabilne) powierzchnie –  $\{110\}$ ,  $\{100\}$  i  $\{111\}$ .

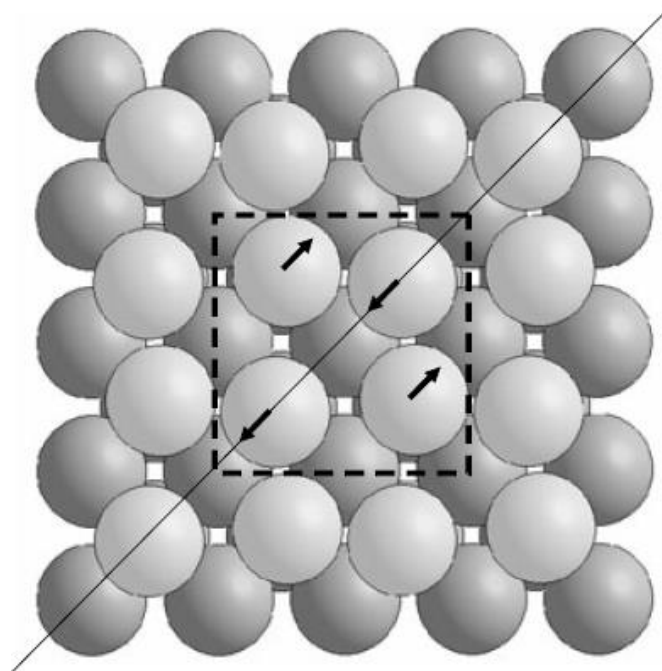
# Struktura powierzchni ciał stałych

## Kryształy bcc – W, Mo, Nb, Fe

Ze względu na dużą aktywność powierzchni trudno określić czy rekonstrukcja występuje i jaki jest jej typ.

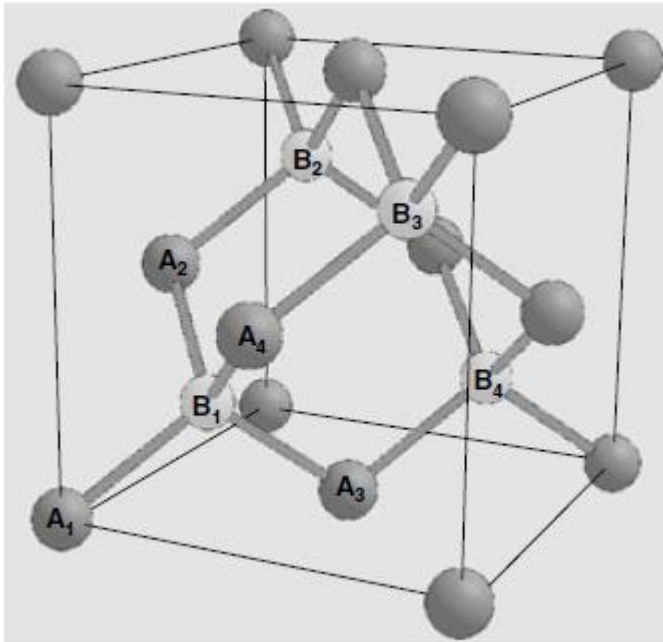
Zwykle (dla W(100)) obserwuje się rekonstrukcję (2x2)c wynikającą jednak z adsorpcji atomów wodoru.

W niższych temperaturach zaobserwowano rekonstrukcję (2x2).

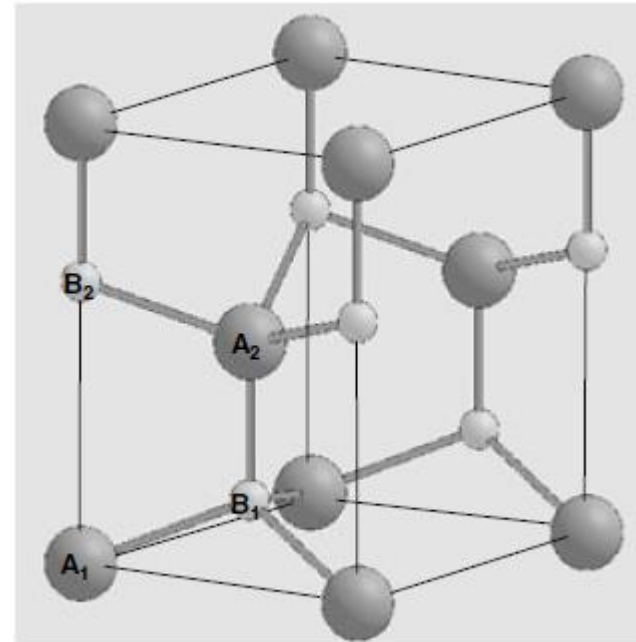


# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu



C, Si, Ge  
III-V

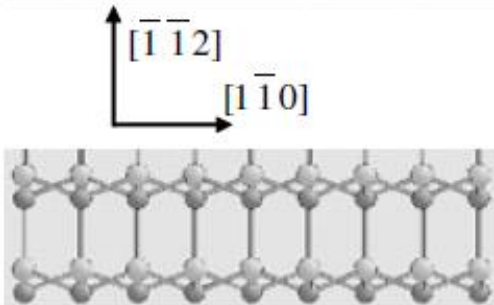
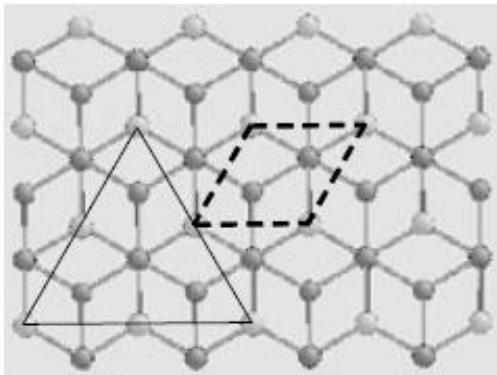


II-VI

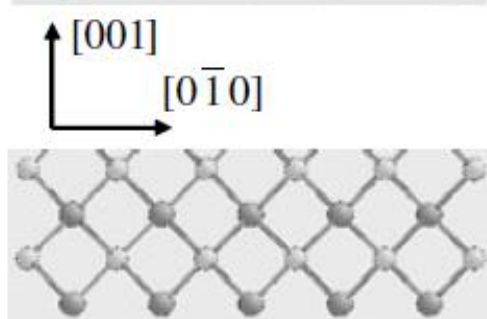
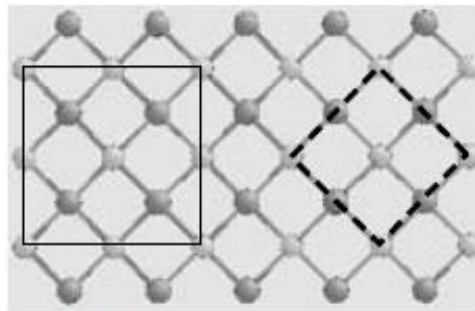
# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

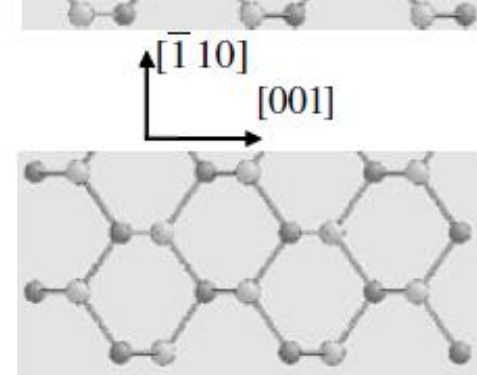
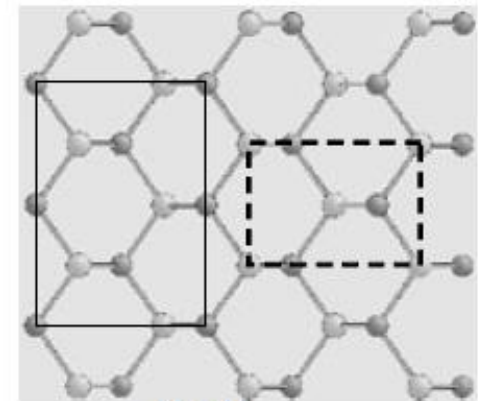
Blenda cynkowa  
(111)



(100)



(110)



powierzchnia polarna  
(homoatomowa)

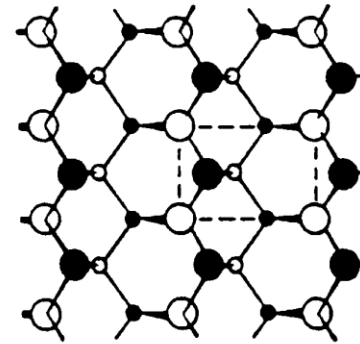
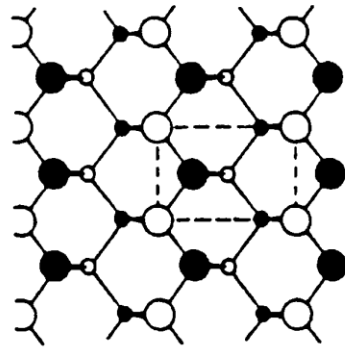


# Struktura powierzchni ciał stałych

GaAs (110) – (1×1)

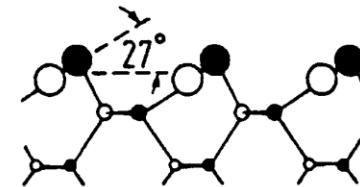
NON-RECONSTRUCTED

RELAXED

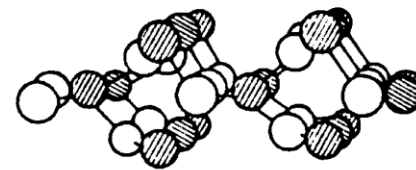
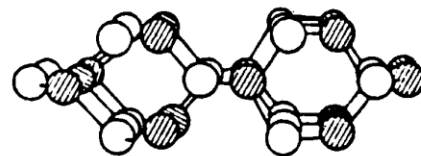


(a) TOP VIEW

5.654 Å



(b) SIDE VIEW

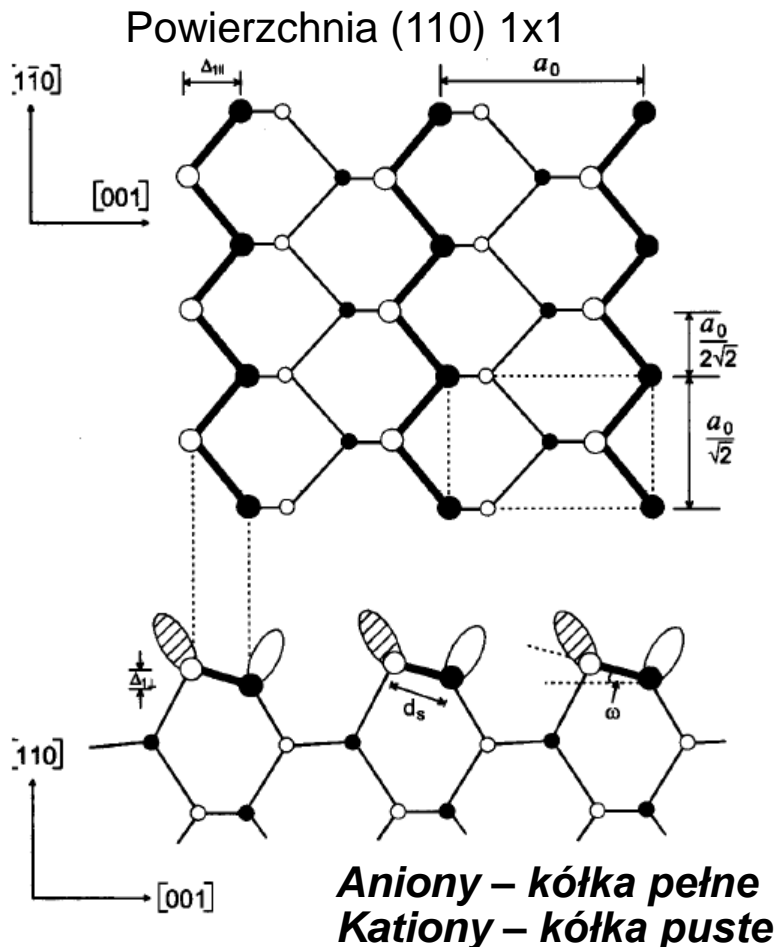


(c) SPHERE MODEL  
(SIDE VIEW)

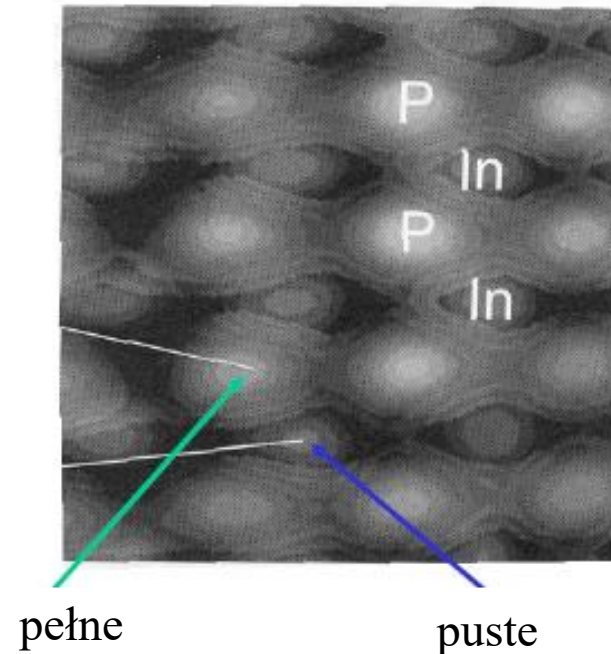
# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

– łańcuchy zig-zak (kation-anion)



Powierzchnia InP (110) 1x1 - STM



# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Blenda cynkowa

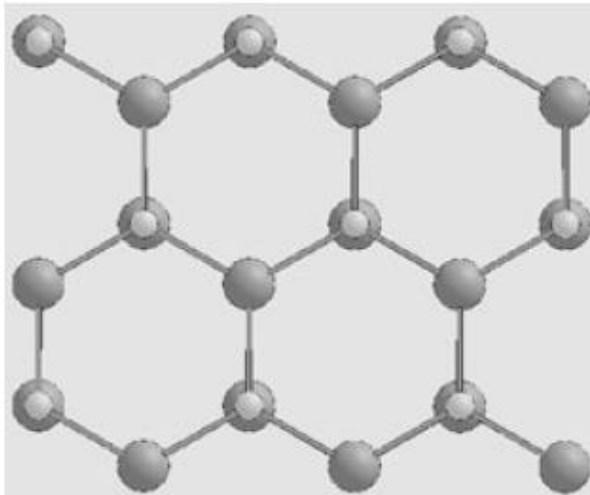
- hybrydyzacja  $sp^3$  – wiązania kowalencyjne
- zerwane wiązania – tzw. dangling bonds (wiązania „dyndające”)
- powierzchnie (111) i (-1-1-1) nie są identyczne – polarność
- {111} i {110} – 1 dangling bond na atom
- {100} - 2 dangling bonds na atom
- rekonstrukcja zależna od tego jak kończy się struktura 3D

# Struktura powierzchni ciał stałych

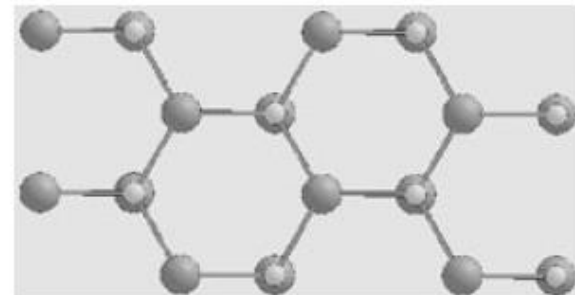
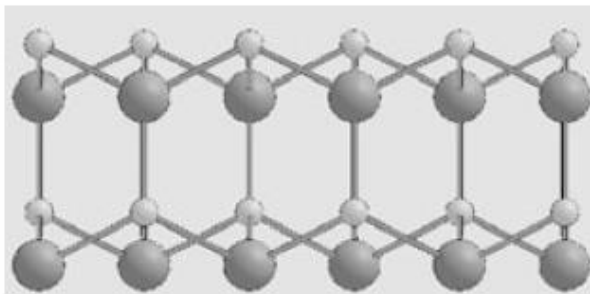
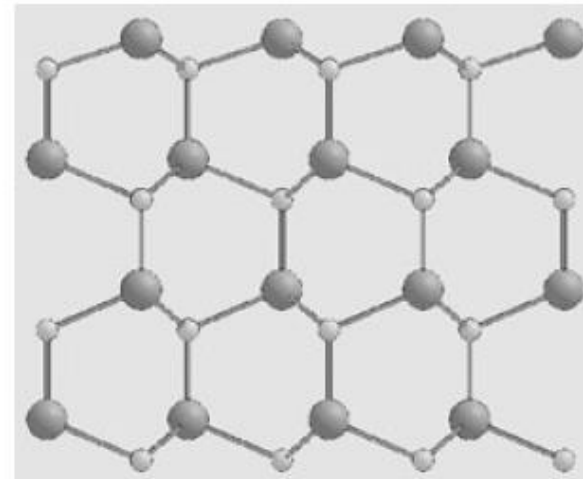
Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Wurcyt

(0001)



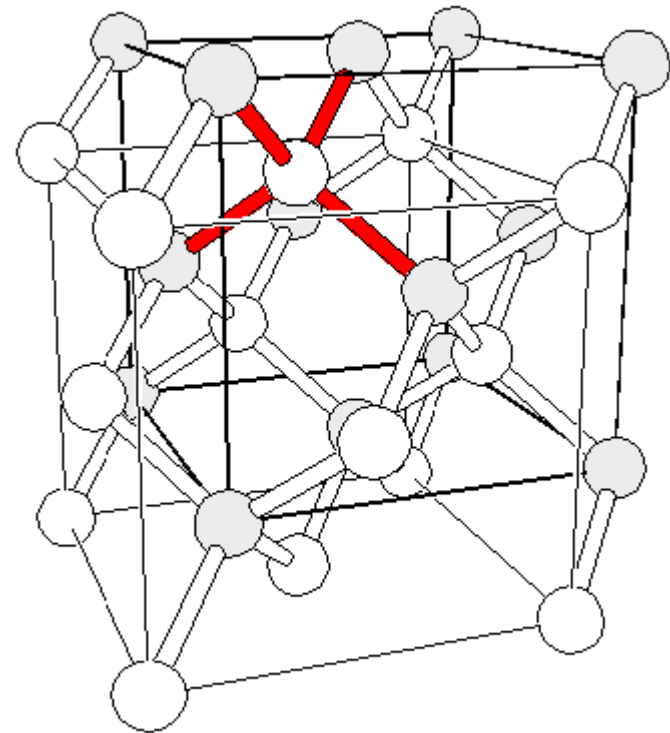
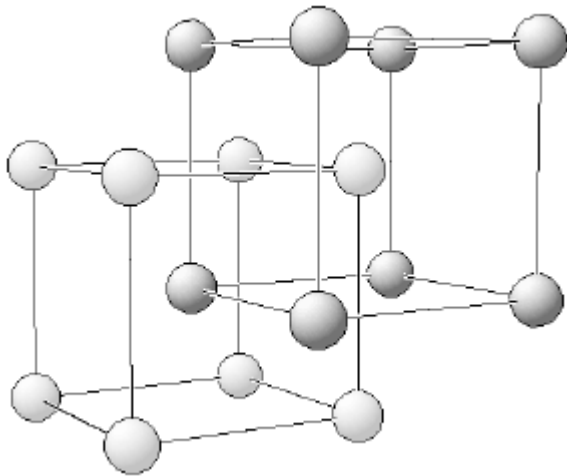
(11 $\bar{1}$ 0)



# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

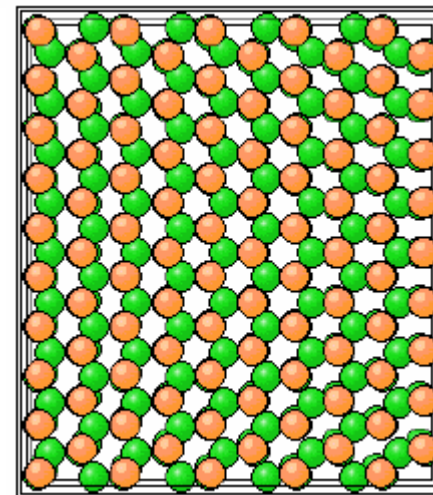
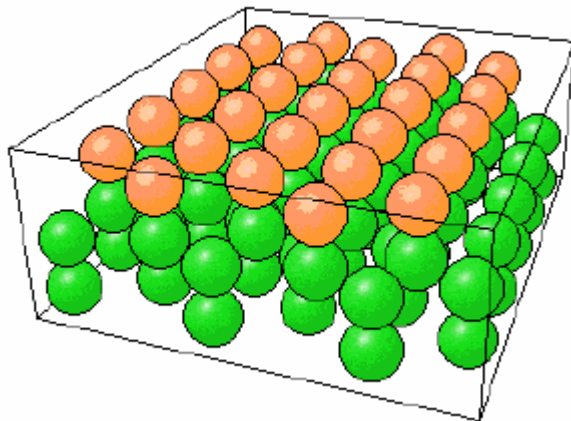
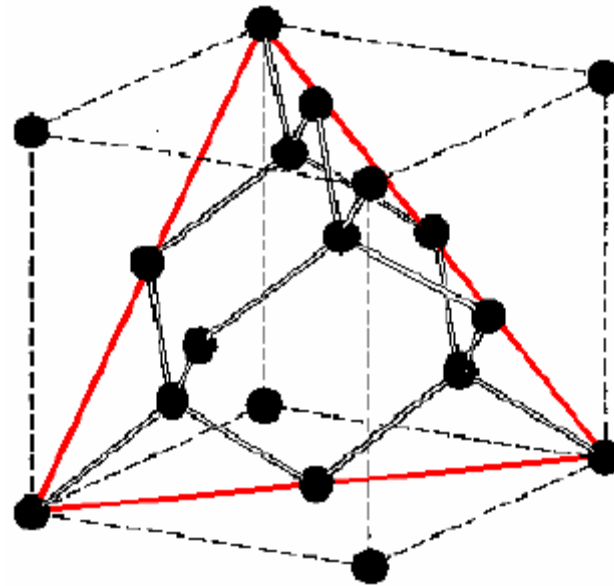
Si – (111)



# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Si – (111)

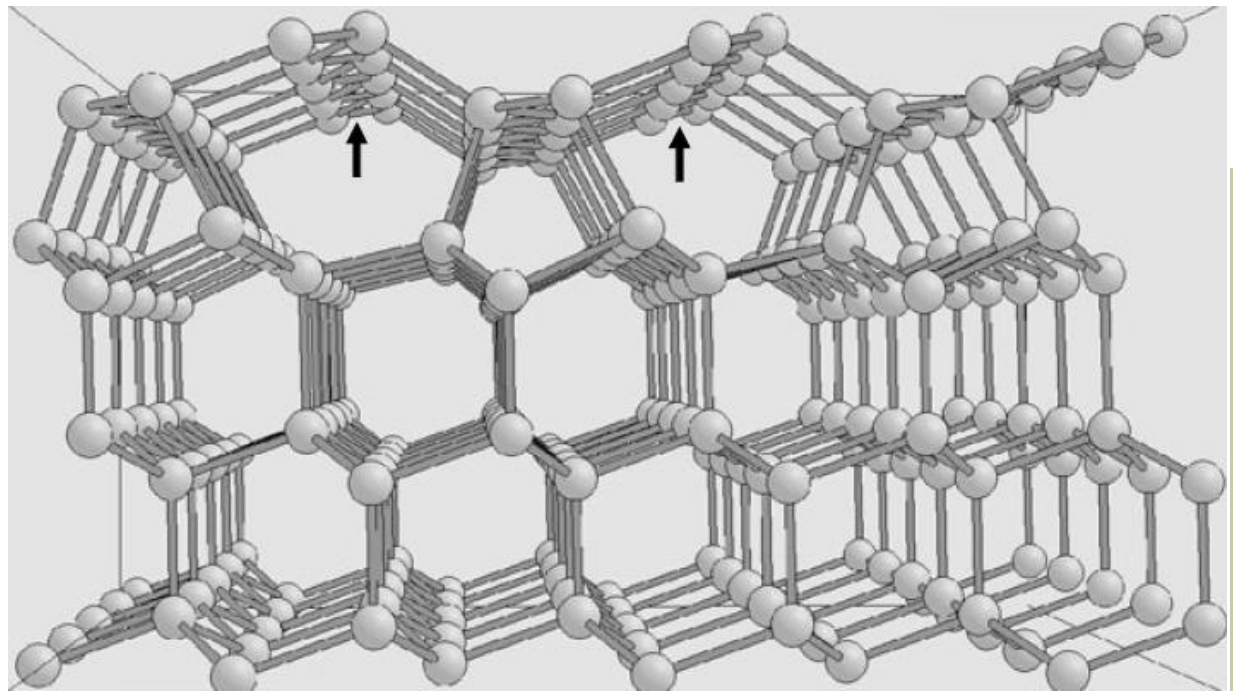


# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Si – (111)

- rekonstrukcja (2x1) uzyskana np. w wyniku łupania w UHV – niestabilna
- łańcuchy powstałe poprzez wiązanie typu  $\pi$  pomiędzy atomami powierzchni

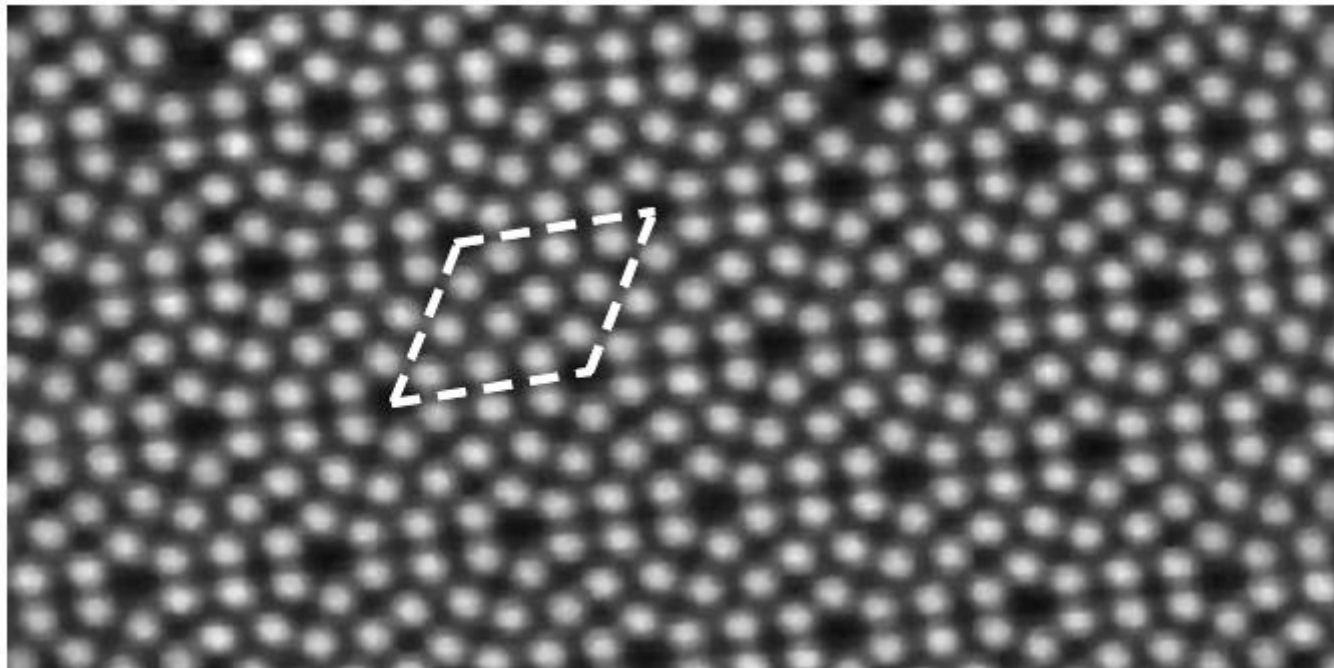


# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

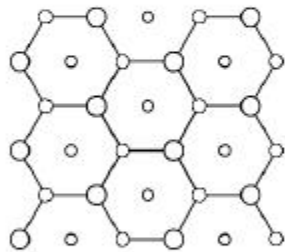
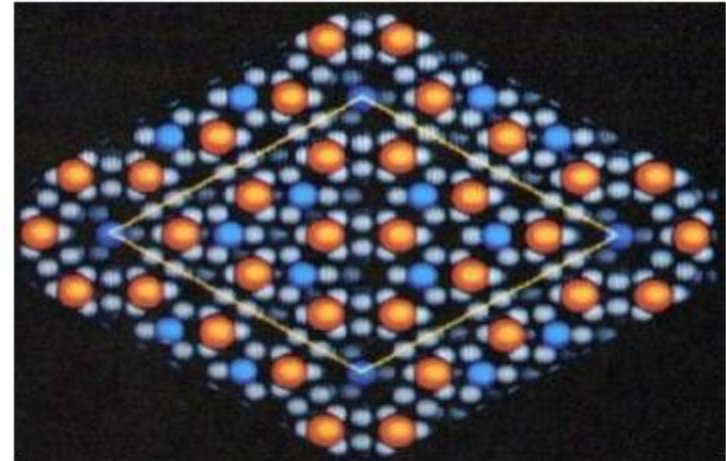
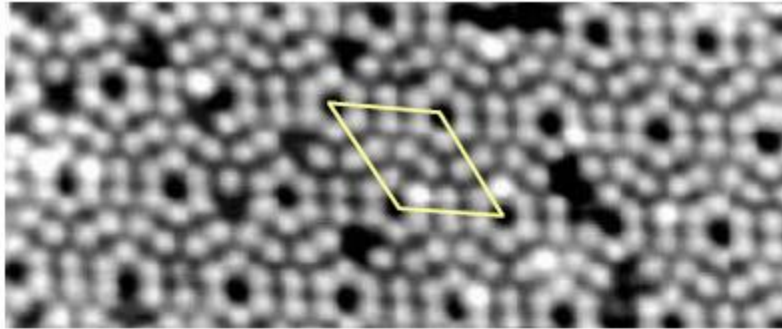
Si – (111)

- rekonstrukcja (7x7) – stabilna
- obraz STM – 12 „adatoms” Si wysycających 3 wiązania każdy

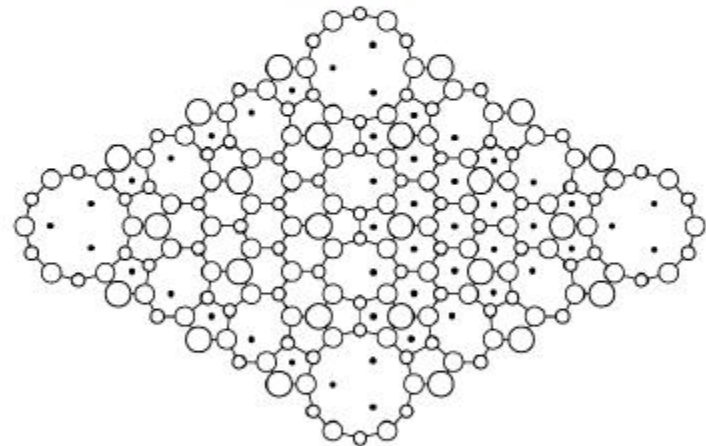




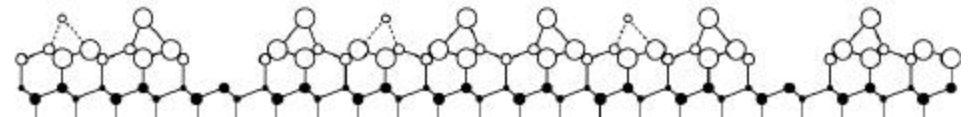
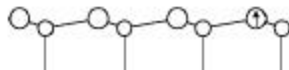
# Struktura powierzchni ciał stałych



top  
view



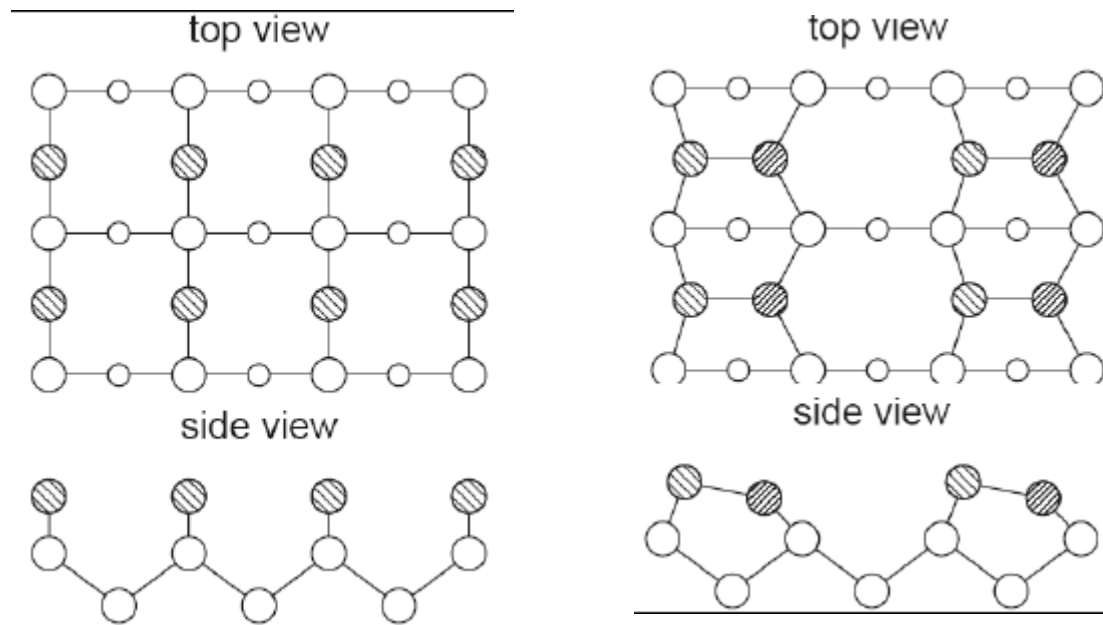
side  
view



# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Si – (100)

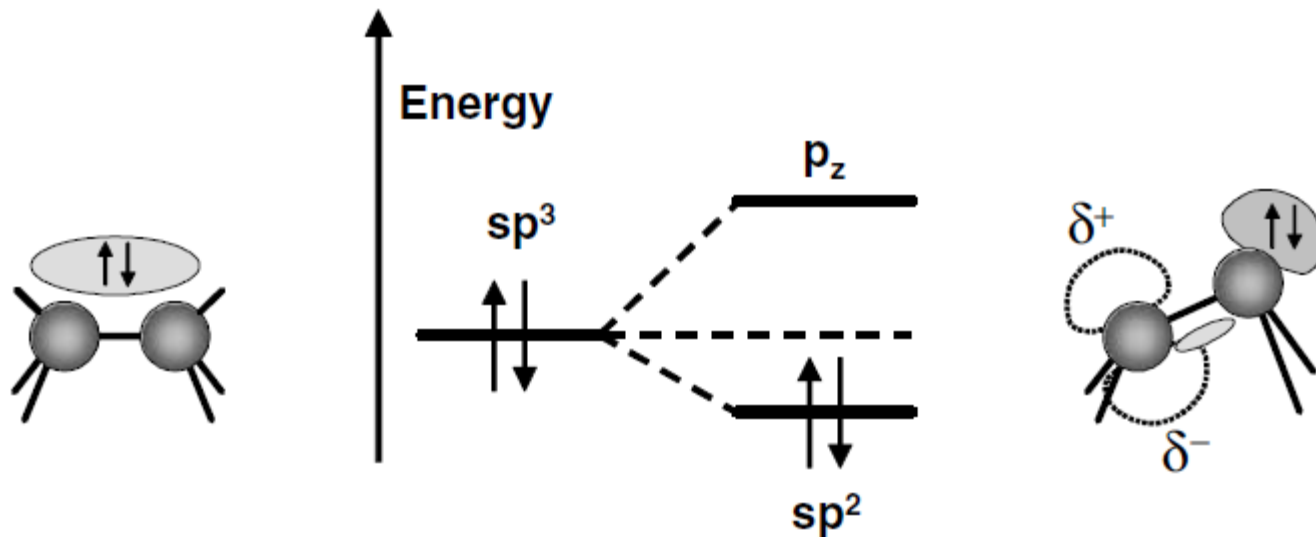


rekonstrukcja (2x1) – dimery zorientowane w tą samą stronę

# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Si – (100)

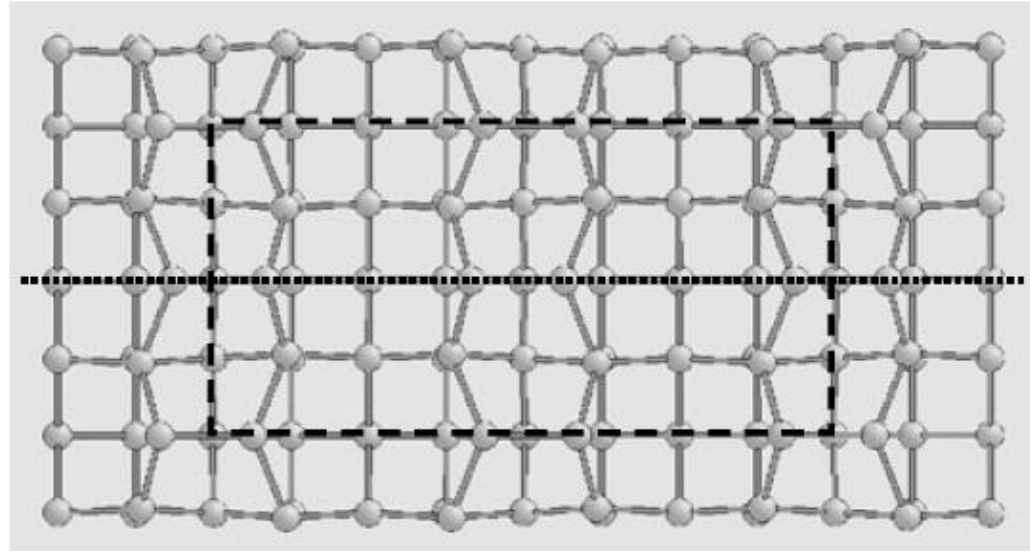


Efekt Jahn-Tellera – redukcja energii poprzez złamanie symetrii  
powstawanie asymetrycznego dimeru – buckled dimer

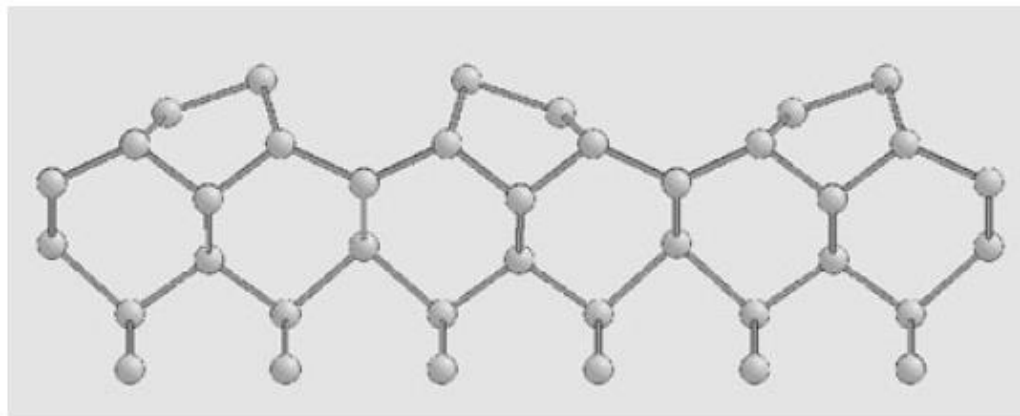
# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Si, Ge – (100)

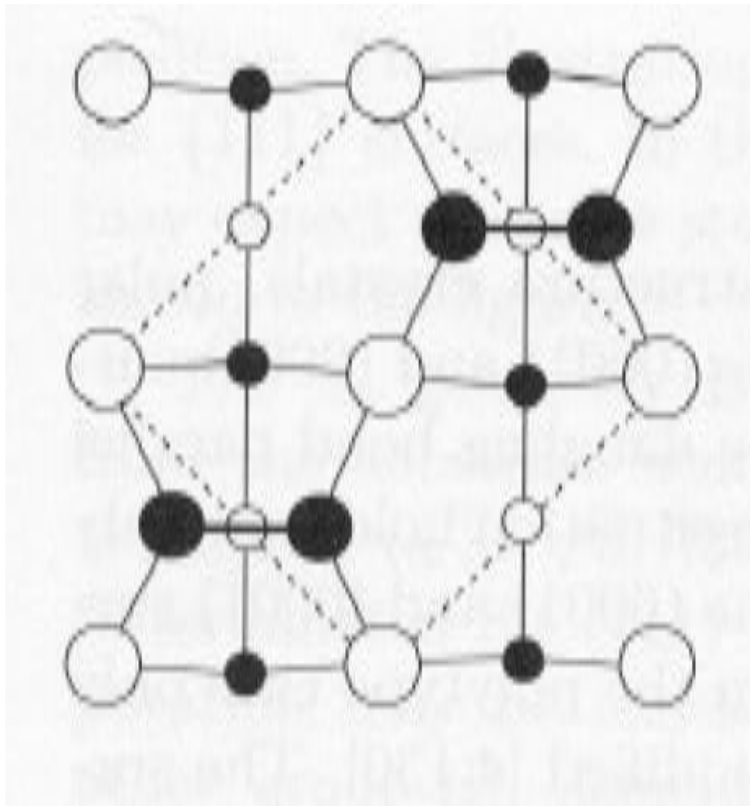


rekonstrukcja (4x2)<sub>c</sub> – dimery zorientowane naprzemiennie

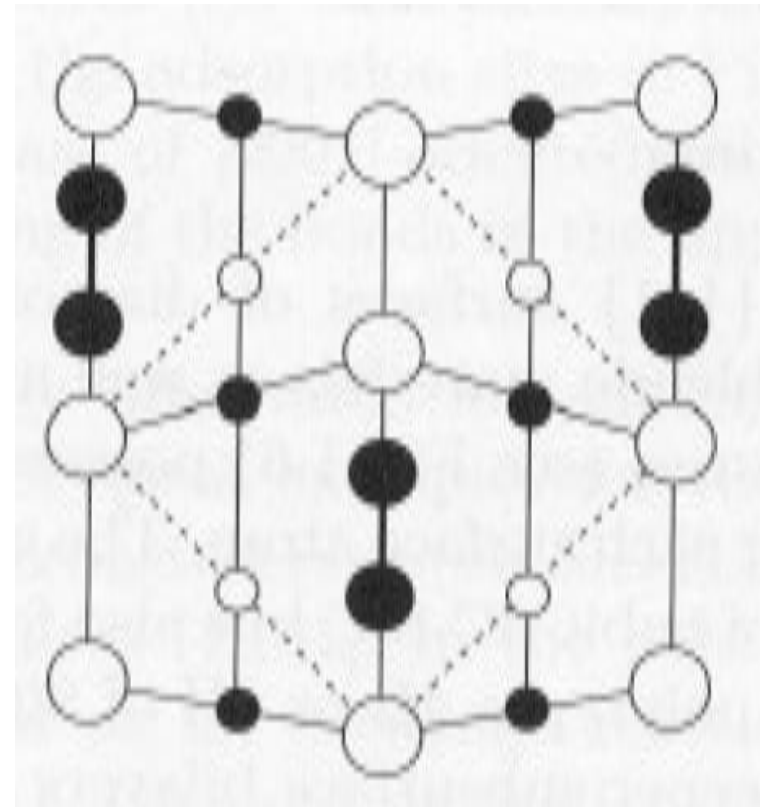


# Struktura powierzchni ciał stałych

Powierzchnie półprzewodników - dimery: układy mostkowe  
Powierzchnia C – terminated SiC (001) (2x2)c



skręcony dimer



skręcona grupa mostkowa

**C – kółka pełne; Si – kółka puste**

# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Zniesienie rekonstrukcji poprzez absorpcję

Powierzchnia Si(111) gdzie do każdego atomu przyłączony jest jeden atom wodoru ma strukturę (1x1).

- powierzchnia się „wypłaszcza”
- polepszają się jej własności do dalszej obróbki – nanoszenia kolejnych warstw

Dla metali (rekonstrukcja dużo słabsza) możliwy jest powrót do powierzchni niezrekonstruowanej poprzez adsorpcję a następnie np. wygrzewanie powierzchni – powierzchnia jest metastabilna.

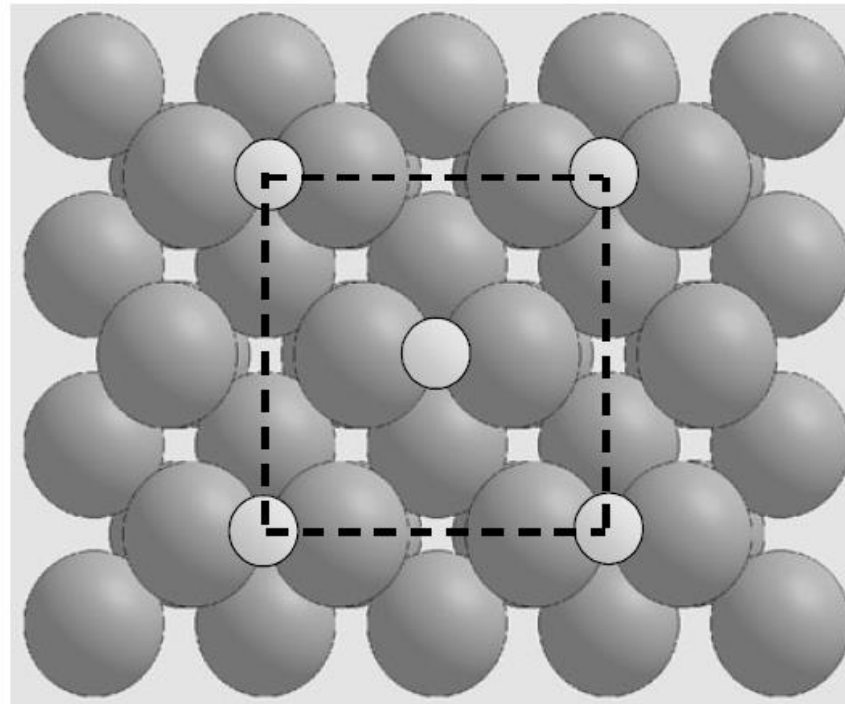
Dla metali 5d, np. Pt{110} poprzez adsorpcję CO.

# Struktura powierzchni ciał stałych

Kryształy o strukturze diamentu, blendy cynkowej i wurcytu

Restrukturyzacja podłoża poprzez adsorpcję

wolfram (100)  
c(2x2)



wodór w położeniu „bridge”

Po zaadsorbowaniu 2 warstw wodoru atomy W wracają do swoich pozycji „bulkowych”.