

หน่วยที่ 5

แก๊ส ของเหลว สารละลาย และของแข็ง

1

5.3 สมบัติของของแข็ง

- 5.3.1 ลักษณะทั่วไปของของแข็ง
- 5.3.2 ระบบของผลึก
- 5.3.3 โครงสร้างผลึกระบบคิวบิก
- 5.3.4 โครงสร้างแบบบรรจุชิดที่สุด
- 5.3.5 ช่องว่างในผลึก

จุดประสงค์การสอน

1. เข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของของแข็ง
2. อธิบายโครงสร้างผลึกและช่องว่างของของแข็งระบบคิวบิก

28/08/60

5.3.1 ลักษณะทั่วไปของของแข็ง

1. มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของแข็งมากกว่าของเหลวและแก๊ส
2. ของแข็งมีรูปร่างแน่นอนไม่ขึ้นกับภาชนะที่บรรจุ
3. รูปร่างแน่นอน มีรูปทรงเรขาคณิตเฉพาะตัว ปริมาตรเปลี่ยนน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนไป
4. เมื่อให้พลังงานความร้อน ทำให้โมเลกุลของแข็งมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ทำให้การสั่นของโมเลกุลเพียงพอในการเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ทำให้โครงสร้างของของแข็งที่เป็นระเบียบสลายตัวลงเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว

Solid

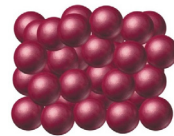


2

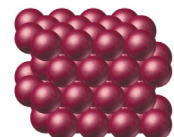
28/08/60

ประเภทของของแข็ง

1. ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous solid) อนุภาคองค์ประกอบกระจายกันอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้ว ยาง พลาสติก



2. ผลึก (Crystalline solid) อนุภาคองค์ประกอบของของแข็งเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบใน 3 มิติ เช่น กำมะถัน ฟอสฟอรัส



3

28/08/60

ชนิดของผลึก

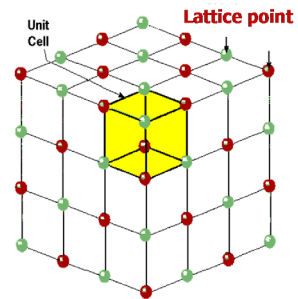
ชนิด	แรงดึงดูด	สมบัติ	ตัวอย่าง
ผลึกไอออนิก	แรงดึงดูดทางไฟฟ้า	แข็ง เปราะ จุดหลอมเหลวสูง นำไฟฟ้าและความร้อนไม่ดี	NaCl LiF MgO CaCO ₃
ผลึกโควาเลนต์	พันธะโควาเลนต์	แข็ง จุดหลอมเหลวสูง นำไฟฟ้าและความร้อนไม่ดี	C(เพชร) SiO ₂
ผลึกโมเลกุล	ระหว่างขั้ว พันธะไฮโดรเจน	นิ่ม จุดหลอมเหลวต่ำ นำไฟฟ้าและความร้อนไม่ดี	Ar CO ₂ I ₂ H ₂ O C ₁₁ H ₂₂ O ₁₁
ผลึกโลหะ	พันธะโลหะ	นิ่ม-แข็ง จุดหลอมเหลวสูง นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี	Na Mg Fe Cu

4

28/08/60

5.3.2 ระบบของผลึก

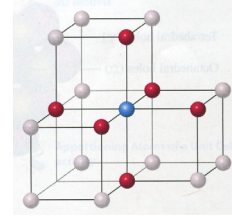
โครงสร้างผลึก (Crystal lattices) หมายถึง การจัดเรียงของอนุภาคเข้าด้วยกัน เป็นผลึกอย่างเป็นระเบียบ ตามแบบเรขาคณิต มีมุมตัดเฉพาะ แต่ละผลึกมีลักษณะการจัดเรียงอนุภาคเหมือนกัน และเชื่อมโยงต่อกันเป็นโครงข่ายสามมิติ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 โครงสร้างผลึก

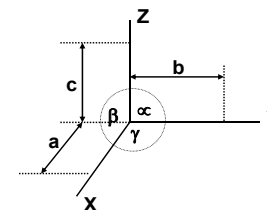
- จุดศูนย์กลางของอนุภาคที่อยู่ในแบบจำลองโครงผลึก เรียกว่า Lattice point
- ส่วนที่เล็กที่สุดของผลึกที่แสดงให้เห็นลักษณะการจัดเรียงอนุภาคภายในผลึกว่ามีรูปทรงเรขาคณิตของโครงผลึก เรียกว่า Unit cell (หน่วยเซลล์)

เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number)



คือ จำนวนอะตอมที่อยู่ชิดกับอะตอมเดี่ยวๆที่เราสนใจ

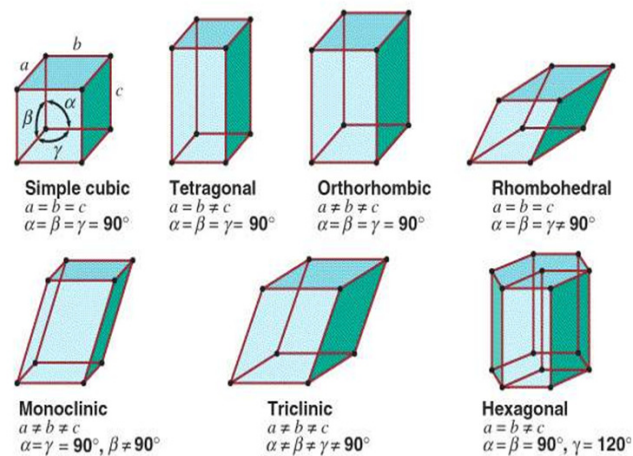
ระบบผลึก



เมื่อพิจารณามุมระหว่างด้านและความยาวหรือแกนเซลล์ที่มีความยาวด้าน a , b , c และมุม α , β , γ ที่แตกต่างกัน จะสามารถแบ่งระบบผลึกได้ 7 ระบบ ดังนี้

5.3.3 โครงสร้างผลึกระบบคิวบิก

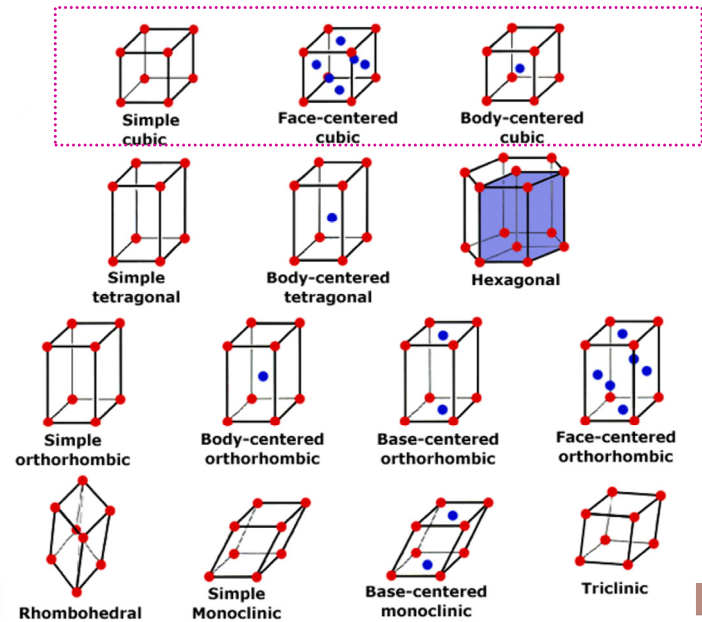
ระบบคิวบิก เมื่อพิจารณามุมระหว่างด้านและความยาวที่แตกต่างกัน จะสามารถแบ่งระบบผลึกได้ 7 ระบบ ดังรูปที่ 5.4



ระบบผลึก	ด้าน	มุม	ตัวอย่าง
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	NaCl, Diamond, Gold
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	SnO_2 , Sn, TiO_2
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	S, K_2SO_4 , I_2 , KNO_2
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Al_2O_3 , As, Sb, Bi
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	CaSO_4 , S, KClO_3
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Quartz, Zn

ระบบผลึกเดียวกันอาจมีหน่วยเซลล์ต่างกันได้ หน่วยเซลล์ที่แสดงจุดแลตทิซทุกจุดในหน่วยเซลล์เรียกว่า บราแวก์แลตทิซ พบว่าภายในหน่วยเซลล์มีอนุภาคไปอยู่ยังตำแหน่งต่างๆทำให้เกิดชนิดของแลตทิซได้ 4 แบบและได้จัดระบบผลึก 7 ระบบเป็น 14 แบบ ดังนี้

จัดระบบผลึก 7 ระบบเป็น 14 แบบ ดังนี้



28/08/60

ระบบผลึกรูปลูกบาศก์ (Cubic)

1. Simple cubic (sc)
2. Face-centered cubic (FCC, fcc)
3. Body-centered cubic (BCC, bcc)



sc

bcc

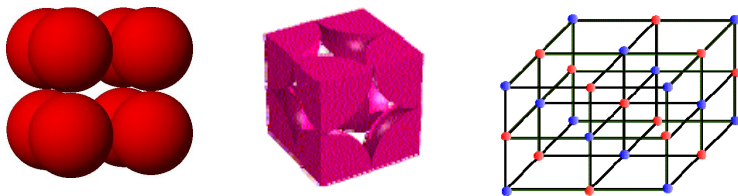
fcc

10

28/08/60

1. Simple cubic (sc)

มีจุดที่มุมของลูกบาศก์เท่านั้น ดังรูป

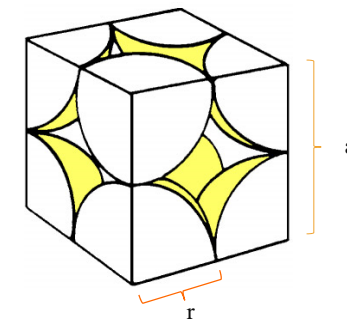


- อนุภาคในผลึกใช้เนื้อที่ประมาณร้อยละ 52
- แต่ละอนุภาคมีเลข โคออร์ดิเนชัน (จำนวนอนุภาคอื่นที่ล้อมรอบ) เท่ากับ 6
- มีหน่วยเซลล์เป็นแบบ simple cubic

11

28/08/60

ความยาวด้านของโครงสร้างผลึกแบบ SC



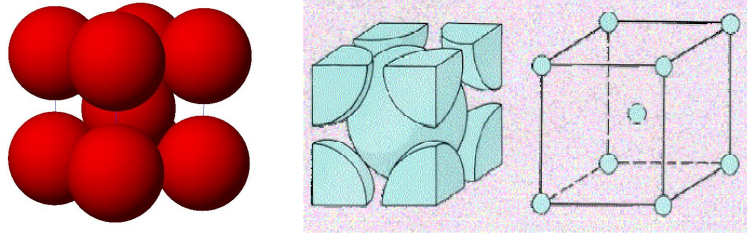
$$a = 2r$$

12

28/08/60

2. Body-centered cubic (bcc)

มีจุดที่มุมและจุดศูนย์กลางลูกบาศก์

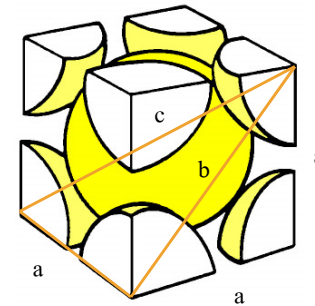


- อนุภาคในผลึกใช้เนื้อที่ประมาณร้อยละ 68
- แต่ละอนุภาคมีเลขโคออร์ดิเนชัน (จำนวนอนุภาคอื่นที่ล้อมรอบ) เท่ากับ 8
- มีหน่วยเซลล์เป็นแบบ body-centered cubic

13

28/08/60

ความยาวด้านของโครงสร้างผลึกแบบ BCC



$$b^2 = a^2 + a^2$$

$$c^2 = b^2 + a^2$$

$$= 3a^2$$

$$c = \sqrt{3} a = 4r$$

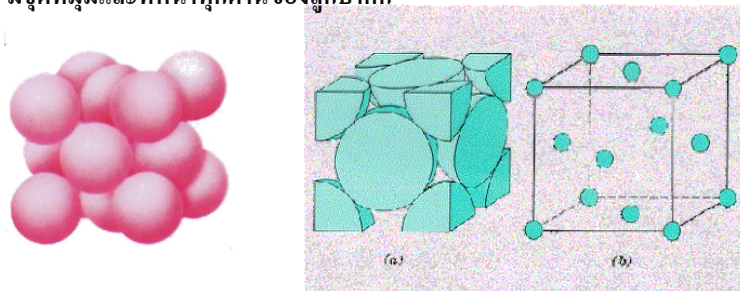
$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

14

28/08/60

3. Face-centered cubic (fcc)

มีจุดที่มุมและที่หน้าทุกด้านของลูกบาศก์

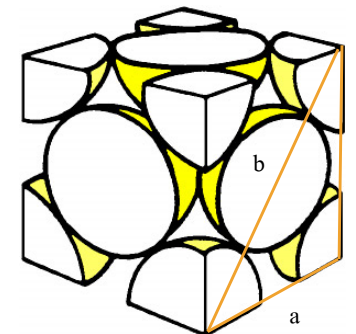


- อนุภาคในผลึกใช้เนื้อที่ประมาณร้อยละ 74
- แต่ละอนุภาคมีเลขโคออร์ดิเนชัน (จำนวนอนุภาคอื่นที่ล้อมรอบ) เท่ากับ 12

15

28/08/60

ความยาวด้านของโครงสร้างผลึกแบบ FCC



$$b^2 = a^2 + a^2$$

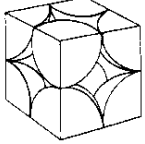
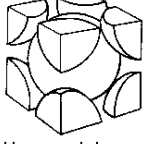
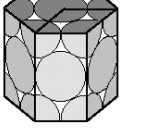
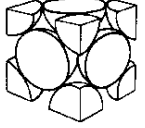
$$(4r)^2 = 2a^2$$

$$16r^2 = 2a^2$$

$$a = \sqrt{8} r$$

16

28/08/60

Type of Packing	Packing Efficiency	Coordination Number
Simple cubic (sc)		
	52%	6
Body-centered cubic (bcc)		
	68%	8
Hexagonal close-packed (hcp)	74%	12
Cubic close-packed (ccp or fcc)	74%	12
		
		

17

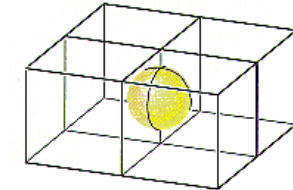
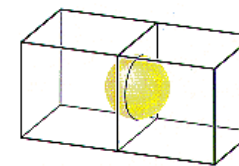
28/08/60

การนับจำนวนทรงกลมใน UNIT CELL

เนื่องจากแต่ละหน่วยมีการใช้ทรงกลมร่วมกันจึงมีวิธีการนับจำนวนทรงกลมที่อยู่ในแต่ละหน่วยเซลล์ดังนี้

i) ทรงกลมที่หน้าของหน่วยเซลล์ จะใช้ร่วมกัน 2 หน่วยเซลล์ ดังนั้นเป็นของหน่วยเซลล์ที่เราสนใจ = $1/2$

ii) ทรงกลมที่ขอบของหน่วยเซลล์ จะใช้ร่วมกัน 4 หน่วยเซลล์ ดังนั้นเป็นของหน่วยเซลล์ที่เราสนใจ = $1/4$

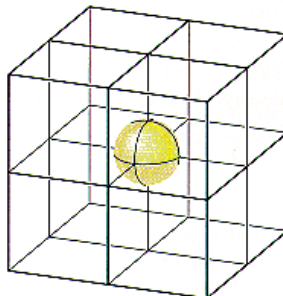


18

28/08/60

iii) ทรงกลมที่มุมของหน่วยเซลล์ จะใช้ร่วมกัน 8 หน่วยเซลล์ ดังนั้นเป็นของหน่วยเซลล์ที่เราสนใจ = $1/8$

iv) ทรงกลมที่ใจกลางของหน่วยเซลล์ จะเป็นของหน่วยเซลล์ที่เราสนใจเท่านั้น ดังนั้นจึงมีค่า = 1

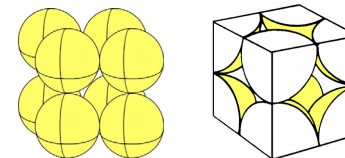


19

28/08/60

ตัวอย่างการนับจำนวนทรงกลมใน CUBIC UNIT CELL

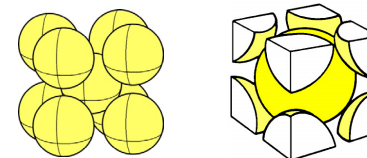
• Simple cubic unit cell



ที่มุมมีทรงกลม 8 มุม

มีทรงกลม $1/8 \times 8 = 1$ ลูก

• Body-centered cubic unit cell



ที่มุมมีทรงกลม 8 มุม

มีทรงกลม $1/8 \times 8 = 1$ ลูก

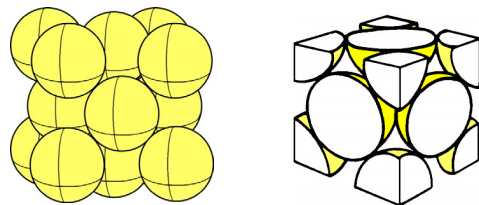
ที่ใจกลางลูกบาศก์มีทรงกลม 1 ลูก

มีทรงกลมรวม = 2 ลูก

20

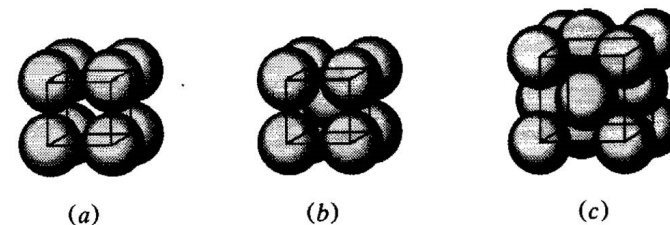
28/08/60

• Face-centered cubic unit cell

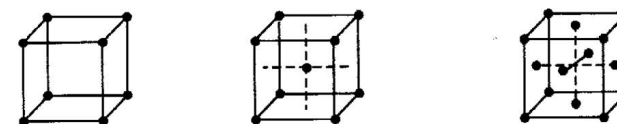


ที่มุมมีทรงกลม 8 มุม \therefore มีทรงกลม $1/8 \times 8 = 1$ ลูก
 ที่หน้ามีทรงกลม 6 หน้า \therefore มีทรงกลม $1/2 \times 6 = 3$ ลูก
 รวม = 4 ลูก

Space-filling models



Space lattice unit cells



Expression for number of spheres per unit cell

corners
 $8\left(\frac{1}{8}\right)$
 = 1

corners $8\left(\frac{1}{8}\right)$ + in body 1
 = 2

corners $8\left(\frac{1}{8}\right)$ + faces $6\left(\frac{1}{2}\right)$
 = 4

Unit cell (a) simple (b) body-centered (c) face-centered cubic lattices

5.3.4 โครงสร้างแบบบรรจุชิดที่สุด (Closest packing)

โครงสร้างแบบบรรจุชิดที่สุด หมายถึงการบรรจุอนุภาคได้จำนวนมากที่สุดในหนึ่งหน่วยปริมาตรอนุภาคจัดเรียงในลักษณะสัมผัสกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ มีปริมาตรที่ว่างน้อยที่สุดในโครงผลึก

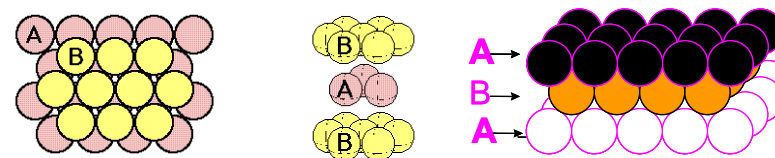
การบรรจุแบบชิดที่สุดมี 2 แบบ

1. Hexagonal closest-packing structure, hcp

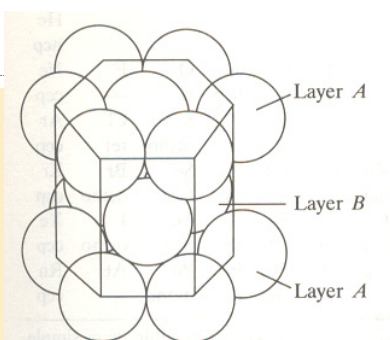
2. Cubic closest-packing structure, ccp หรือ

Face-centered cubic closest packing structure, fcc

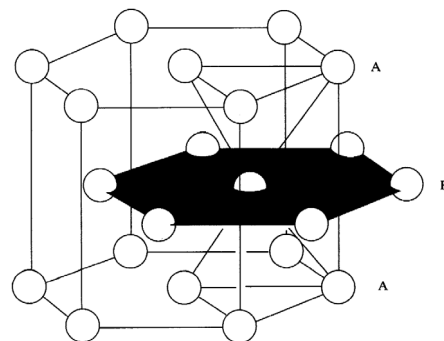
1. Hexagonal closest-packing structure, hcp



- การจัดเรียงชั้นเป็นแบบ AB AB AB
- อนุภาคในผลึกใช้เนื้อที่ประมาณร้อยละ 74
- แต่ละอนุภาคมีเลขโคออร์ดิเนชัน (จำนวนอนุภาคอื่นที่ล้อมรอบ) เท่ากับ 12

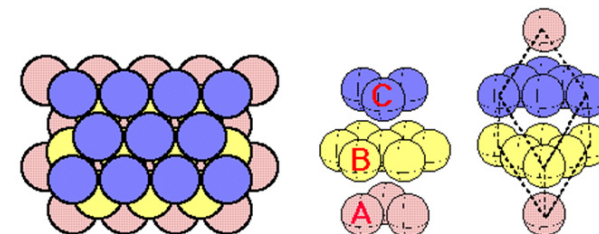


(a) Hexagonal closed packed unit cell ที่แสดง ABABAB layer



(b) แสดงเลขโคออดิเนชันของทรงกลม เท่ากับ 12

2. Cubic closest-packing structure, ccp หรือ Face-centered cubic closest packing structure, fcc



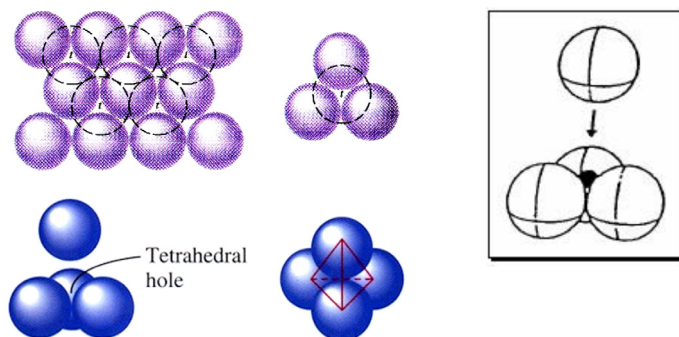
- การจัดเรียงชั้นเป็นแบบ ABC ABC ABC
- อนุภาคในผลึกใช้เนื้อที่ประมาณร้อยละ 74
- แต่ละอนุภาคมีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 12

5.3.5 ช่องว่างในผลึก

ช่องว่างในโครงสร้างการบรรจุที่ชิด มี 2 แบบ

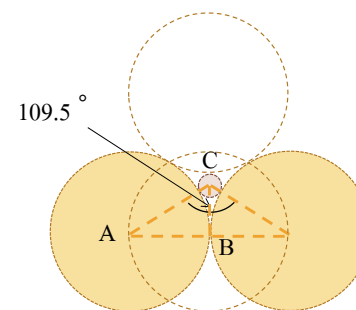
1. ช่องเตตระฮีดรัล (tetrahedral holes ; Td)

การจัดเรียงของอนุภาคและช่องว่างที่เกิดขึ้น มีลักษณะดังรูป



การคำนวณหาจำกัดของอัตราส่วนรัศมี

ช่องเตตระฮีดรัล (tetrahedral holes ; Td)

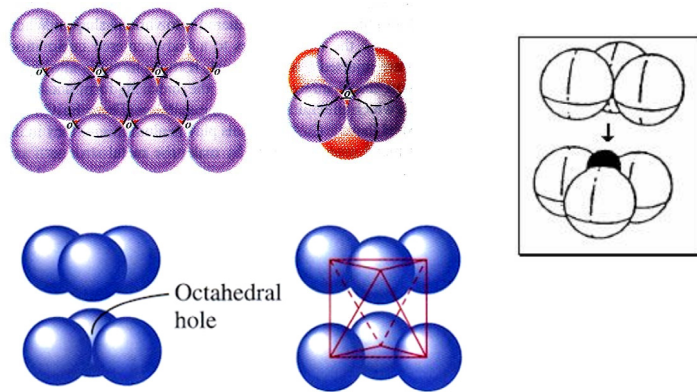


- = แอนไอออน
- = แคตไอออน

$$\begin{aligned}\sin (109.5/2) &= AB/AC \\ \sin (54.75) &= r^- / r^+ + r^- \\ 0.817 &= r^- / r^+ + r^- \\ r^+ / r^- + 1 &= 1.225 \\ r^+ / r^- &= 0.225\end{aligned}$$

2. ช่องออกตะฮีดรัล (octahedral holes ; Oh)

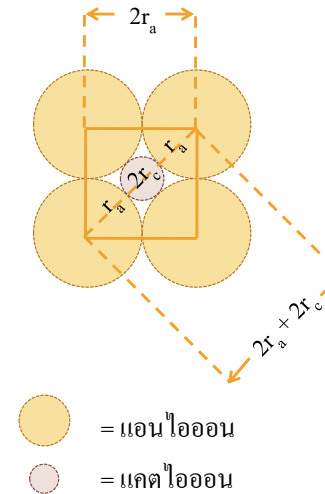
การจัดเรียงของอนุภาคและช่องว่างที่เกิดขึ้น มีลักษณะดังรูป



29

28/08/60

การคำนวณหาจำกัดของอัตราส่วนรัศมี



$$(2r_c + 2r_a)^2 = (2r_a)^2 + (2r_a)^2$$

$$= 8r_a^2$$

ดังนั้น $2r_c + 2r_a = 2r_a \cdot \sqrt{2}$

$$r_c/r_a + 1 = \sqrt{2}$$

$$r_c/r_a = \sqrt{2} - 1 = 0.414$$

30

28/08/60

ในโครงสร้างการบรรจุชิดที่สุด

- ขนาดช่องว่างของ tetrahedral holes < Octahedral holes
- จำนวน tetrahedral holes = สองเท่าของจำนวนทรงกลม
จำนวน Octahedral holes = จำนวนทรงกลม

31

28/08/60

ตัวอย่าง ธาตุ X มีผลึกแบบ **body centered cubic** ซึ่งมีความยาวด้านละ 3.45×10^{-8} cm
จงหารัศมีอะตอมของธาตุนี้

วิธีทำ

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

$$r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{4} (3.45 \times 10^{-8})$$

$$= 1.49 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

32

28/08/60

การคำนวณ หน่วยเซลล์ของ Fe เป็น Body-centered cubic มีความยาวด้านละ 1.5×10^{-8} cm จงคำนวณหา (กำหนดให้ Fe = 55.8 g/mol)

1. หนึ่งหน่วยเซลล์มี Fe กี่อะตอม
2. ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของ Fe จะต้องใช้อะตอมร่วมกับหน่วยเซลล์อื่นเท่าใด
3. จงหาปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์
4. หาความหนาแน่นของ Fe

วิธีทำ

1. หนึ่งหน่วยเซลล์มี Fe กี่อะตอม

$$\text{หนึ่งหน่วยเซลล์มี Fe} = (1/8 \times 8) + 1 = 2 \text{ อะตอม}$$

2. ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของ Fe จะต้องใช้อะตอมร่วมกับหน่วยเซลล์อื่นเท่าใด

หนึ่งหน่วยเซลล์ของ Fe จะต้องใช้อะตอมร่วมกับหน่วยเซลล์อื่น 8 อะตอม

33

28/08/60

3. จงหาปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์} &= (\text{ความยาวด้าน})^3 \\ &= (1.5 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 \\ &= 3.38 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

4. หาความหนาแน่นของ Fe

$$\text{ความหนาแน่นของ Fe} = \text{มวล/ปริมาตร}$$

$$\begin{aligned} \text{หามวล} &= \frac{55.8 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atom}} \times \frac{2 \text{ atom}}{1 \text{ unit cell}} \\ &= 18.5 \times 10^{-23} \text{ g/unit cell} \end{aligned}$$

34

28/08/60

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของ Fe} &= \frac{\text{มวล}}{\text{ปริมาตร}} \\ &= \frac{18.5 \times 10^{-23} \text{ g/unit cell}}{3.38 \times 10^{-24} \text{ cm}^3} \\ &= 54.8 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

35

28/08/60

แบบฝึกหัดท้ายบท

คำสั่ง ข้อ 1-5 จงเลือกข้อที่ถูกต้องที่สุด และข้อ 6-10 จงแสดงวิธีทำ

1. การจัดประเภทของผลึกของแข็งในข้อใดไม่ถูกต้อง

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| ก. โซเดียมคลอไรด์เป็นผลึกไอออนิก | ค. เพชรเป็นผลึกโควาเลนต์ |
| ข. กำมะถันเป็นผลึกโลหะ | ง. น้ำแข็งแห้ง (CO ₂) เป็นผลึกโมเลกุล |

2. ข้อใดต่อไปนี้ไม่ถูกต้องเกี่ยวกับสมบัติของของเหลว

- การระเหยเกิดจากโมเลกุลมีพลังงานสูงจนชนะแรงดึงดูดของโมเลกุลข้างเคียง
- ของเหลวมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อยกว่าของแข็งแต่มากกว่าแก๊ส
- อัตราการแพร่ของของเหลวช้ากว่าแก๊ส
- ความดันไอเกิดจากโมเลกุลที่ของเหลวเกิดการระเหยกลายเป็นไอในที่ว่างเหนือของเหลวภายในภาชนะเปิด

3. หน่วยเซลล์ในข้อใดเรียงลำดับการใช้เนื้อที่โดยอนุภาคในโครงสร้างผลึกจากมากไปน้อย

- | | |
|-------------------|-------------------|
| ก. sc > bcc > fcc | ข. sc > fcc > bcc |
| ค. bcc > fcc > sc | ง. fcc > bcc > sc |

36

28/08/60

4. พิจารณาข้อความที่เกี่ยวกับโครงสร้างผลึกข้อใดกล่าวไม่ถูกต้อง

ก. โครงสร้างแบบบรรจุจุดมี 3 แบบ

ข. หน่วยเซลล์แบบ bcc มีอนุภาคในผลึกใช้เนื้อที่ร้อยละ 68

ค. หน่วยเซลล์แบบ hcp มีการจัดเรียงชั้นเป็นแบบ AB AB AB

ง. ขนาดช่องว่างของ tetrahedral holes เล็กกว่า Octahedral holes

5. หน่วยเซลล์ชนิด Body-centered cubic (bcc) ของผลึกโลหะชนิดหนึ่งมีรัศมีอะตอม 4.33×10^{-6} cm

จงหาความยาวด้าน (a) ของหน่วยเซลล์

ก. 0.86×10^{-5} cm

ข. 2.44×10^{-5} cm

ค. 1.22×10^{-5} cm

ง. 1.00×10^{-5} cm

6. จงอธิบายความหมายของ ความดันไอ แผนผ้งวัฏภาค และจุดทรีปเปิล

7. ธาตุ X มีผลึกแบบ body centered cubic ซึ่งมีความยาวด้านละ 3.45×10^{-8} cm จงหารัศมีอะตอมของธาตุนี้อย่างไร

8. หน่วยเซลล์ของ Mg เป็น SC มีความยาวด้านละ 4.5×10^{-6} cm จงคำนวณหาความหนาแน่น

9. โครงสร้างผลึกแบบใดที่มีเลขโคออร์ดิเนชันน้อยที่สุด

10. จงบอกประเภทของช่องว่างใน โครงสร้างการบรรจุจุดที่สุด