



โครงสร้างผลึกและความไม่สมบูรณ์ของผลึก (4, 5)

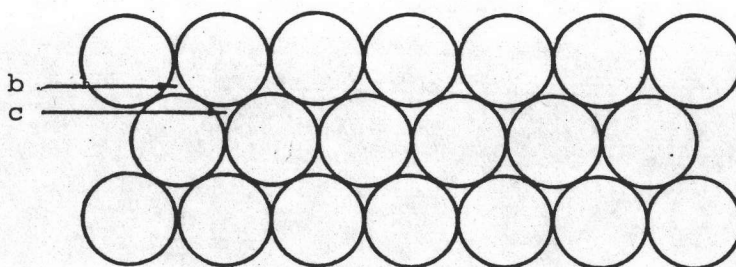
โดยความคิดทางทฤษฎีแล้ว พวกผลึกทั่วไป จะมีการจัดเรียงตัวพวกอะตอมหรืออ็อนอยู่ภายในผลึกอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้มีค่าของพลังงานภายในโครงผลึกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อยที่สุดหรือเพื่อเหตุผลอื่นดังนี้ เพื่อรักษาสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกันกับเรื่องทิศทางของพันธะ เพื่อให้แรงผลักระหว่างอ็อนมีค่าน้อยที่สุดและเพื่อทำให้การเรียงตัวของอะตอมหรืออ็อนอยู่กันอย่างใกล้ชิดกันมากที่สุด

2.1 โครงสร้างของผลึกทั่วไป

โดยทั่วไป จะคิดว่าของแข็งประกอบขึ้นด้วยอะตอมหรืออ็อนของของแข็งชนิดนั้น ซึ่งพวกอะตอมหรืออ็อนเรียงตัวกันอยู่อย่างใกล้ชิดกันมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นจึงเกิดลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานขึ้นที่เรียกว่า "โครงสร้างโคลล์เสล์ทึแพ็คด์ (closest-packed structure)"

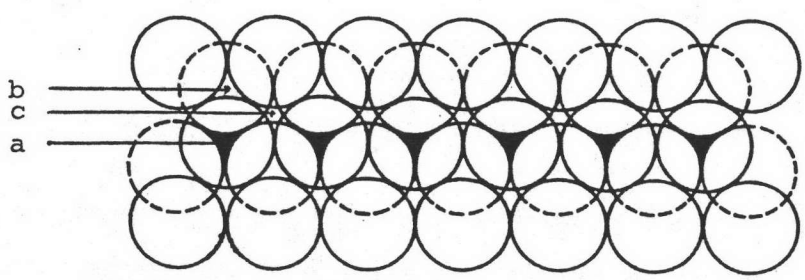
ถ้าสมมติว่าลูกทรงกลมแต่ละลูกแทนอะตอมหรืออ็อน เมื่อวางลูกทรงกลมดังรูป

2.1 จะเห็นว่าเกิดช่องว่างระหว่างลูกทรงกลมเป็นช่อง b และ c



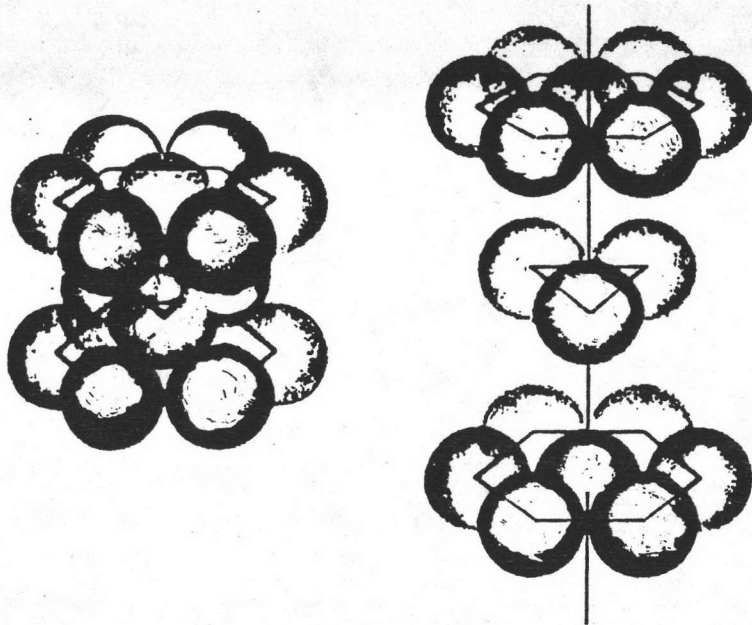
รูป 2.1 แสดงการจัดเรียงทรงกลมแบบโคลล์เสล์ทึแพ็คด์

ในการวางลูกทรงกลมในชั้นที่ล่อง ถ้าวางที่ช่อง c ก็จะไม่วางที่ช่อง b ไม่ได้ เพราะไม่มีที่ว่างเพียงพอแต่ในทางตรงข้าม ถ้าวางที่ช่อง b ก็จะไม่วางที่ช่อง c ไม่ได้เช่นกัน ลมมดให้วางที่ตำแหน่ง b ในการเรียงในชั้นที่ล่อง ก็จะเกิดช่องว่าง c ซึ่งเป็นช่องว่างเติม กับอีกช่องว่างหนึ่งคือ ช่องว่าง a ซึ่งอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของลูกทรงกลมในชั้นที่หนึ่ง ดังรูป 2.2

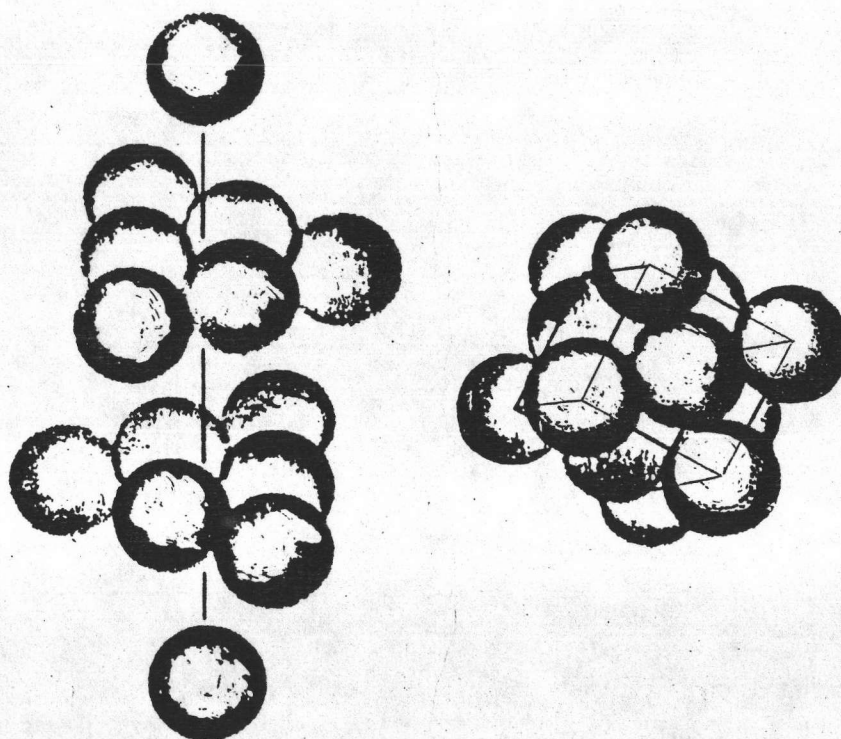


รูป 2.2 แสดงการจัดเรียงทรงกลมแบบโคคลัส เลล์ที่เพ็คคิงของชั้นที่หนึ่งกับชั้นที่ล่อง

ในการวางลูกทรงกลมในชั้นที่สามนี้ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบโคคลัส เลล์ที่เพ็คคิง ล่องแบบคือถ้าวางตรงช่อง a ก็ทำให้ลูกทรงกลมที่วางในชั้นที่สาม อยู่ตรงกันกับลูกทรงกลมในชั้นที่หนึ่ง การเรียงแบบนี้ในทุก ๆ ชั้นจะเป็น abab..... ดังรูป 2.3 โครงสร้างแบบนี้เรียกว่า "โครงสร้างเฮ็กแซิกโกนัล โคคลัส เลล์ที่เพ็คคิง (hexagonal closest-packed structure)" ส่วนลักษณะโครงสร้างโคคลัส เลล์ที่เพ็คคิงอีกแบบหนึ่งก็คือ ถ้าวางตรงช่อง c การเรียงทรงกลมทั้งสามชั้นจะเป็นแบบ abc abc โครงสร้างแบบนี้เรียกว่า "โครงสร้างคิวบิกโคคลัส เลล์ที่เพ็คคิง (cubic closest-packed structure)" ที่เรียกว่าคิวบิก (cubic) ก็เพราะเมื่อหมุนโครงสร้างดูดังรูป 2.4 พบว่ามีลูกทรงกลมลูกหนึ่งอยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าของลูกบาศก์ ดังนั้นจึงเรียกโครงสร้างแบบนี้ก็อย่างหนึ่งว่า "โครงสร้างเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (face-centered cubic structure)"



รูป 2.3 การจัดเรียงทรงกลมแบบเฮกแซิกโกนัล โคลล์เล่ส์ที่แพ็คคิ่ง

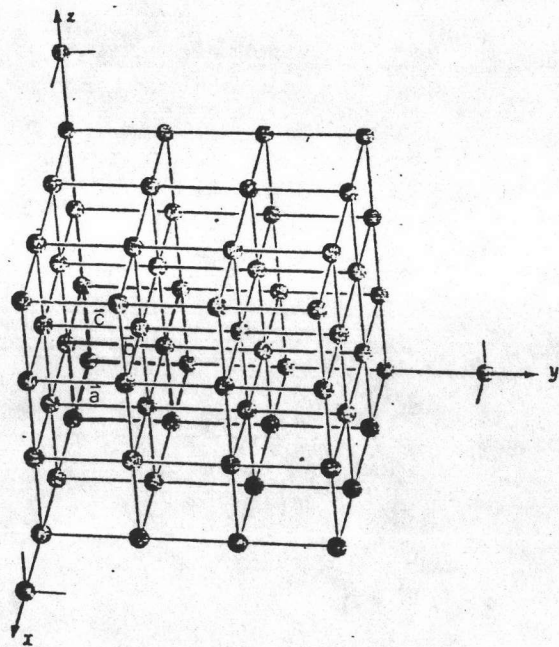


รูป 2.4 การจัดเรียงตัวทรงกลมแบบเฟสเซ็นเตอร์ คิวบิก โคลล์เล่ส์ที่แพ็คคิ่ง

จากการจัดเรียงตัวแบบโครงสร้างคริสตัลล์แต่ละอะตอมหรือไอออน ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมหรือไอออนที่ใกล้เคียงที่สุดมีจำนวนลิบล่องอะตอมหรือไอออน กล่าวคือ อยู่ในชั้นเดียวกันหกออะตอมหรือไอออนกับอยู่ในชั้นบนและชั้นล่างอีกชั้นละสามอะตอมหรือไอออน การจัดเรียงตัวแบบนี้ทำให้มีความหนาแน่นมากที่สุด เพราะเป็นเนื้อที่ของลูกทรงกลมถึง 74.0% ของหนึ่งหน่วยเซลล์ แต่ในโลหะหลายชนิดที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ "โครงสร้าง บอดี เซ็นเตอร์ คิวบิก (body-centered cubic structure)" โครงสร้างแบบนี้แต่ละอะตอมหรือไอออน ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมหรือไอออนที่ใกล้เคียงที่สุดมีจำนวนแปดอะตอมหรือไอออน จึงไม่จัดว่าเป็นโครงสร้างคริสตัลล์แต่ละอะตอม และเนื้อที่ของลูกทรงกลมเท่ากับ 68.0% ของหนึ่งหน่วยเซลล์

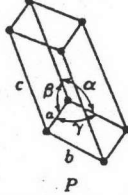
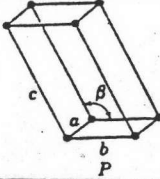
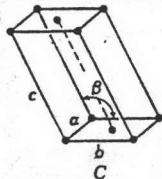
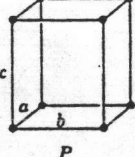
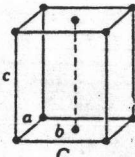
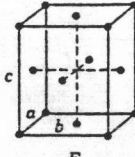
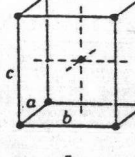
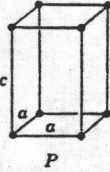
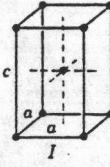
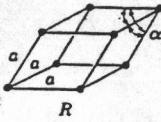
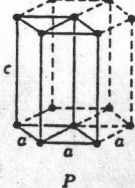
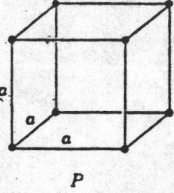
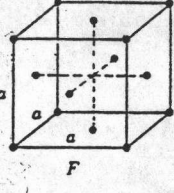
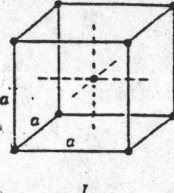
2.2 ระบบผลึกและบรจาเวล์แลททิส

เนื่องจากการเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนใน 3 มิติ อย่างเป็นระเบียบก็ทำให้ผลึกถูกแบ่งออกเป็นเซลล์ (cell) โดยจุดของระนาบที่ขนานกัน 3 ชุดตัดกัน เป็น "แลททิส (lattice)" และจุดที่ระนาบทั้ง 3 ชุดตัดกันถูกเรียกว่า "จุดแลททิส (lattice point)" ดังรูป 2.5



รูป 2.5 แสดงจุดของระนาบที่ขนานกัน 3 ชุดตัดกันเป็นแลททิส โดยมีจุดแลททิส และแสดงหนึ่งหน่วยเซลล์

ตารางที่ 2.1 ระบบผลึก 7 ระบบ และ 14 บราเวส์แลททิส

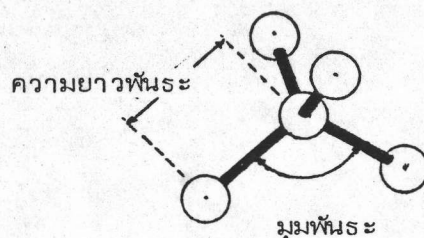
ระบบผลึก	ด้านและมุม	บราเวส์แลททิส
ไตรคลินิค (Triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	
โมนอคลินิค (Monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	 
ออโธโรมบิก (Orthorhombic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	   
เตตระโกนัล (Tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	 
รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะกอนัล (Hexagonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ,$ $\gamma = 120^\circ$	
คิวบิก (Cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	  

ส่วนแต่ละเซลล์เรียกว่า "หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell)" ซึ่งขนาดและรูปร่างของหนึ่งหน่วยเซลล์นั้นถูกกำหนดได้โดย ความยาวของ a, b, c และมุม α, β, γ เรียกว่า "ค่าคงที่โครงผลึก (lattice constants)" ดังนั้นโครงผลึกโดยทั่วไปจึงจัดแบ่งได้เป็น 7 ระบบ โดยอาศัยค่าความแตกต่างของความยาวของแกน a, b, c กับ ของมุมระหว่างแกน α, β, γ

โดยที่มีอะตอมหรือไอออนอยู่ ณ ที่มุมทุกมุมของหนึ่งหน่วยเซลล์ แต่ต่อมานักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส (Bravais) พบว่า พวกอะตอมหรือไอออนไม่จำเป็นต้องอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์เท่านั้น อาจจะไปอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน่วยเซลล์ หรืออยู่ที่กึ่งกลางด้านของหน่วยเซลล์ก็ได้ ดังนั้นเขาจำแนกแลตทิซได้เป็น 14 แบบ และเรียกแลตทิซพวกนี้ว่า "บราเวส แลตทิซ (Bravais lattices)" ดังตารางที่ 2.1

2.3 พันธะ, ความยาวพันธะ และมุมพันธะ (6)

เมื่ออะตอมหรือไอออนของธาตุต่าง ๆ รวมกันเข้าเป็นโมเลกุลของธาตุ หรือโมเลกุลของสารประกอบ ก็มีแรงชนิดหนึ่งเหนี่ยวให้กลุ่มของอะตอมหรือไอออนเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นแรงทางไฟฟ้า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างกลุ่มของอะตอมหรือระหว่างกลุ่มโมเลกุลนั้น ถูกเรียกว่า "พันธะ (bond)" ส่วนระยะทางระหว่างอะตอมที่เข้าใกล้กันมากที่สุดแล้วทำให้มีเสถียรภาพมากที่สุด จึงเรียกระยะนี้ว่า "ความยาวพันธะ (bond lengths)" แต่เนื่องจากอะตอมทั้งหลายอยู่ในสภาวะที่สั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นระยะห่างระหว่างอะตอมทั้งสองจึงไม่คงที่แน่นอน เพราะฉะนั้นค่าของความยาวพันธะจึงต้องใช้ค่าเฉลี่ย แต่ถ้าอะตอมหนึ่งสร้างพันธะกับอะตอมอื่น ๆ ตั้งแต่สองอะตอมขึ้นไปในโมเลกุลเดียวกัน เส้นตรงที่ลากจากนิวเคลียสของอะตอมเหล่านั้นผ่านพันธะมาตัดกันที่นิวเคลียสของอะตอมหลัก มุมที่เกิดขึ้นจึงถูกเรียกว่า "มุมพันธะ (bond angles)"



รูป 2.6 ความยาวพันธะและมุมพันธะในการยึดกันแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral)

การยึดเหนี่ยวของอะตอมหรือโมเลกุลนี้ มีลักษณะการยึดเหนี่ยวได้เป็น 4 แบบ คือ

- ก. พันธะแบบไอออนิก (ionic bond)
- ข. พันธะแบบโคเวเลนต์ (covalent bond)
- ค. พันธะแบบเมทัลลิก (metallic bond)
- และ ง. แรงแบบวาน เดอ วาลส์ (Van der Waals forces)

2.4 รัศมีของอะตอมหรือไอออนและรัศมีโคเวเลนต์

สมบัติประการหนึ่งของอะตอมหรือไอออน คือ ขนาดของอะตอมหรือไอออน การที่ละระบุขนาดของอะตอมหรือไอออน ซึ่งคิดว่าเป็นสิ่งที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมมีระบุมออกมาเป็นรัศมี โดยธรรมชาติการวัดรัศมีของอะตอมหรือไอออนที่อยู่เดี่ยว ๆ นั้นเป็นสิ่งที่ทำไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยการหาระยะระหว่างอะตอมหรือไอออนในผลึกเสียก่อน แล้วจึงคำนวณรัศมีอีกทีหนึ่ง แต่ในการคำนวณต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องด้วยเหตุที่มีหลายแฟกเตอร์นี้เอง จึงไม่ได้ค่าของรัศมีที่ถูกต้องเพียงตรงเต็มที โดยหลักการแล้วค่ารัศมีอะตอมของพวกโลหะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างอะตอม แต่ถ้าต้องการหารรัศมีของไอออนจะใช้ความจริงที่ว่า ระยะทางระหว่างนิวเคลียสของไอออนหนึ่ง ถึงนิวเคลียสของอีกไอออนหนึ่ง (d) มีค่าเท่ากับผลบวกของรัศมี (r) ของไอออนทั้งสองคือ

$$d = r_+ + r_- \quad (2.1)$$

วิธีการหารรัศมีของไอออนแต่ละชนิดนั้น ก็หาค่า d ของสารประกอบชนิดต่าง ๆ ที่มีไอออนลบชนิดเดียวกันเป็นองค์ประกอบมาลบกันผลที่ได้จะมีค่าคงที่ ซึ่งค่าอันนี้จะเป็นค่าผลต่างของรัศมีของไอออนบวก ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} r_{K^+} - r_{Na^+} &= d_{KF} - d_{NaF} = 0.35 \text{ \AA} \\ &= d_{KCl} - d_{NaCl} = 0.33 \text{ \AA} \\ &= d_{KBr} - d_{NaBr} = 0.32 \text{ \AA} \\ &= d_{KI} - d_{NaI} = 0.30 \text{ \AA} \end{aligned}$$

ซึ่งพบว่า $r_{K^+} - r_{Na^+}$ มีค่าเกือบคงที่ แสดงว่ารัศมีของแต่ละไอออนมีค่าเกือบคงที่นั่นเอง ดังนั้นการคำนวณรัศมีของไอออนอย่างง่าย ๆ ก็คือ

$$r_{\text{ไอออน A}} = d_{AB} - r_{\text{ไอออน B}}$$

ส่วนวิธีการหารัศมีของไอออนอีกวิธีหนึ่งถูกเสนอขึ้นมาโดยเพาลีง (Pauling) โดยกล่าวว่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีของไอออนทั้งสองในสารประกอบ เป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วนระหว่างประจุไฟฟ้าในนิวเคลียส (nuclear charge) ของไอออนทั้งสองนั้น คือ

$$\frac{r_-}{r_+} = \frac{\text{ประจุไฟฟ้าในนิวเคลียสไอออนบวก}}{\text{ประจุไฟฟ้าในนิวเคลียสไอออนลบ}} \quad (2.2)$$

แต่ในความจริง พวกอิเล็กตรอนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส ถูกดึงดูดโดยโปรตอนในนิวเคลียส แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนด้วยกันผลึกกันเองบ้างอยู่ในเชลล์ (shell) ต่าง ๆ กันบ้าง จึงทำให้นิวเคลียสดึงดูดอิเล็กตรอนได้ไม่เต็มที่ คือ น้อยกว่าประจุไฟฟ้าในนิวเคลียสจริง ๆ โดยที่ค่าประจุไฟฟ้าในนิวเคลียสที่ใช้ดึงดูดอิเล็กตรอนซึ่งน้อยกว่าความเป็นจริงนี้เรียกว่า "ประจุไฟฟ้ายังผลในนิวเคลียส (effective nuclear charge) หรือ Z^* " ดังนั้น

$$\frac{r_-}{r_+} = \frac{Z_+^*}{Z_-^*} \quad (2.3)$$

โดยที่ ประจุไฟฟ้ายังผลในนิวเคลียส หาได้จากผลต่างของ ประจุไฟฟ้าในนิวเคลียสจริง ๆ (actual nuclear charge) กับ ค่าคงที่ของฉากกบัง (screening constant หรือ shielding constant) จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (2.1) กับ (2.3) แก้สมการหาค่า r_+ กับ r_- แต่ถ้าธาตุนั้นโมเลกุลอยู่ได้ด้วยพันธะโคเวเลนต์ อะตอมไม่เพียงแต่อยู่ชิดกัน แต่จะซ้อนเกยกันส่วนหนึ่ง ถ้าสามารถวัดระยะทางระหว่างนิวเคลียสของสองอะตอมที่รวมเป็นโมเลกุลนั้นได้แล้วหารด้วยสอง ค่าที่ได้นี้เรียกว่า "รัศมีโคเวเลนต์ (covalent radius)" ของอะตอมของธาตุนั้น

ตาราง 2.2 ค่ารัศมีโคเวเลนต์ในหน่วยอังสตรอมของโครงสร้างแบบเตตระฮีดรัล
ที่หาโดยชานนอน - พรวิวิทท์ (Shannon - Prewitt), เพลลิง
(Pauling) และฟิลลิปส์ (Phillip) (7)

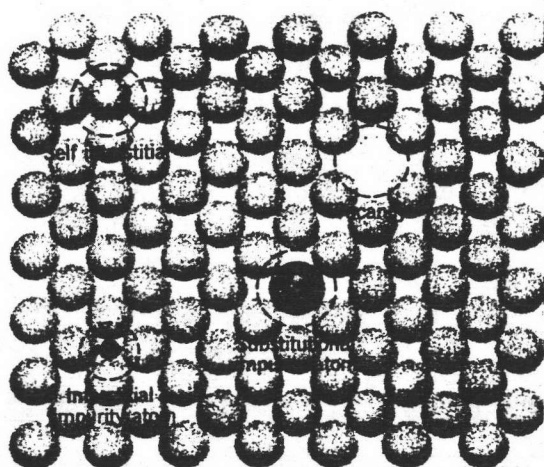
ชนิดของอะตอม	รัศมีแบบของ ชานนอน-พรวิวิทท์	รัศมีแบบของ เพลลิง	รัศมีแบบของ ฟิลลิปส์
Cu^{1+}	0.635	1.35	1.225
Ag^{1+}	0.92	1.52	1.405
Ga^{3+}	0.58	1.26	1.225
In^{3+}	0.765	1.44	1.405
Se^{2-}	1.84	1.14	1.225
Te^{2-}	2.07	1.32	1.405

2.5 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

เรื่องของโครงสร้างผลึกที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดนั้นเป็นเรื่องของผลึกที่สมบูรณ์
แต่ในโครงสร้างผลึกจริงในธรรมชาตินั้นมีการจัดเรียงตัวของอะตอมผิดแผกไปจากตำแหน่ง
ที่ควรจะมีอยู่ หรือ มีบางอะตอมหายไป ซึ่งถือว่าผลึกนั้นไม่สมบูรณ์ จำแนกเรื่องความ
ไม่สมบูรณ์ของผลึกตามลักษณะทางเรขาคณิตได้ดังนี้

2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในศูนย์มิติ คือ ความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็น
จุด (point defect) ที่พบในผลึก โดยทั่วไปมีสาเหตุอยู่ 4 อย่าง ดังในรูปที่ 2.7

008722



รูป 2.7 ลักษณะผลึกใน 2 มิติ ที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุด

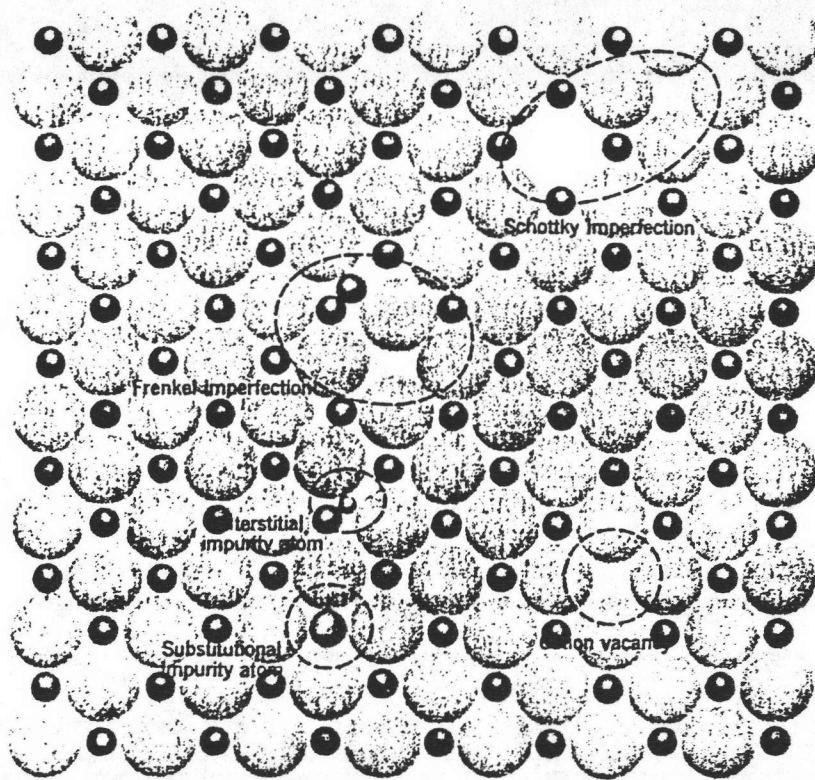
ก. มีอะตอมหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอะตอมอยู่ เรียกว่า "เวคินซี (vacancy)"

ข. มีอะตอมเข้าไปอยู่ผิดที่ คือ มีอะตอมเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่าง แทนที่จะอยู่ ณ ที่ตำแหน่งที่ควรอยู่ เรียกว่า "เซล์ฟ อินเทอร์สตัลทีเกียล (self interstitial)"

ค. มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปอยู่แทนที่ตำแหน่งของอะตอมเดิม เรียกว่า "ซับสติทิวชันนัล อิมเพียวริตี อะตอม (substitutional impurity atom)"

ง. มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทรกอยู่ในตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่าง เรียกว่า "อินเทอร์สตัลทีเกียล อิมเพียวริตี อะตอม (interstitial impurity atom)"

แต่สำหรับในผลึกแบบไอออนิก (ionic crystal) ก็มีลักษณะความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุดมีค่าเหลืออยู่ 2 อย่าง ดังในรูปที่ 2.8



รูป 2.8 ลักษณะผลึกแบบไอออนิกใน 2 มิติ ที่มีความไม่สมบูรณ์

ในลักษณะจุด โดยที่



แทนไอออนบวก



แทนไอออนลบ

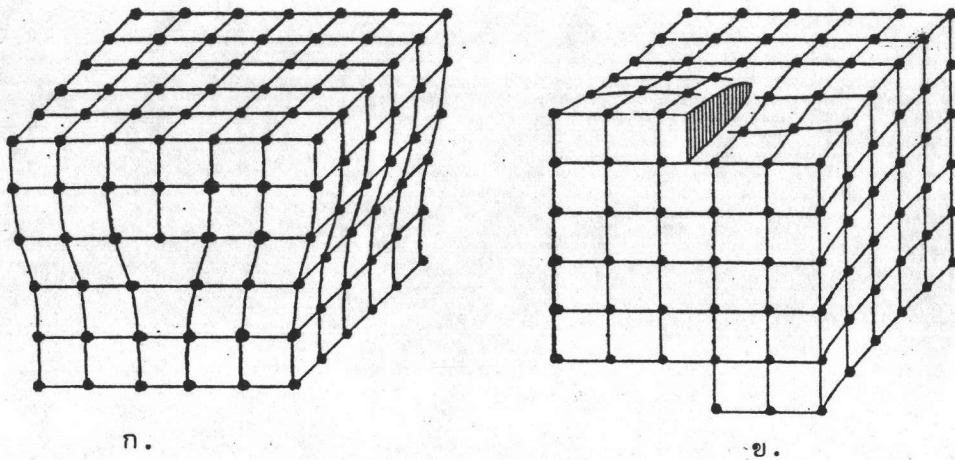
ก. มีไอออนเข้าไปอยู่ผิดที่ โดยเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่าง แทนที่จะอยู่ ณ ตำแหน่งที่ควรอยู่ จึงเกิด 2 เหตุการณ์ร่วมกัน คือ เกิดมีเวคินชีร่วมกับอินเทอร์สติเทียล อะตอม (interstitial atom) ซึ่งเรียกว่า "ความไม่สมบูรณ์แบบเฟรนเคิล (Frenkel imperfection)" จากสาเหตุนี้จึงทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวไปจากรูปเดิมเพราะแรงทางไฟฟ้า

ข. มีไอออนบวก กับ ไอออนลบ หายไปจากตำแหน่งที่ควรมีไอออนพวกนี้อยู่จำนวนเท่า ๆ กัน เรียกว่า "ความไม่สมบูรณ์แบบชอตตคีย์ (Schottky imperfection)" จากสาเหตุนี้ก็ทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวได้อีกเช่นกัน

2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในหนึ่งมิติคือ ความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจาก อะตอมของโครงผลึก ณ ที่จุดต่าง ๆ ที่อยู่แนวหรือแถวเดียวกัน ไม่อยู่ตามตำแหน่งที่ถูกต้อง ความไม่สมบูรณ์แบบนี้มี 2 แบบ คือ

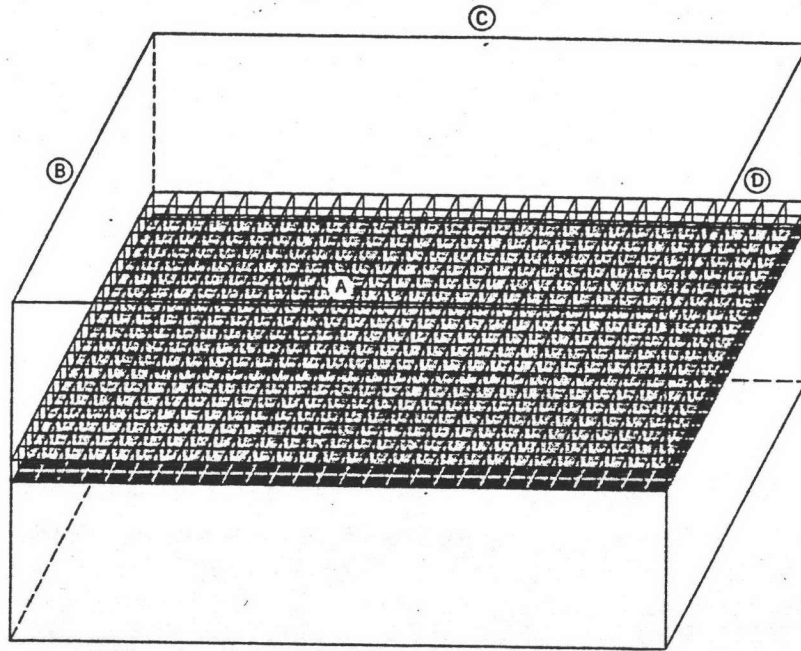
ก. การเคลื่อนของขอบ (edge dislocation) เกิดเมื่ออะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของระนาบหายไป หรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของผลึกถูกอัดเข้ามา หรือ ดันออกไปจากแนวปกติ ซึ่งเกิดเนื่องมาจากลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกดังกล่าว ดังรูปที่ 2.9 (ก)

ข. การเคลื่อนแบบสกรู (screw dislocation) แบบนี้เกิดในลักษณะเหมือนถูกเหวี่ยง แล้วดันส่วนหนึ่งให้ขึ้นไปด้านบน และกดอีกส่วนหนึ่งในต่ำลงมา ซึ่งทำให้ขอบของผลึกมีแนวไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.9 (ข)

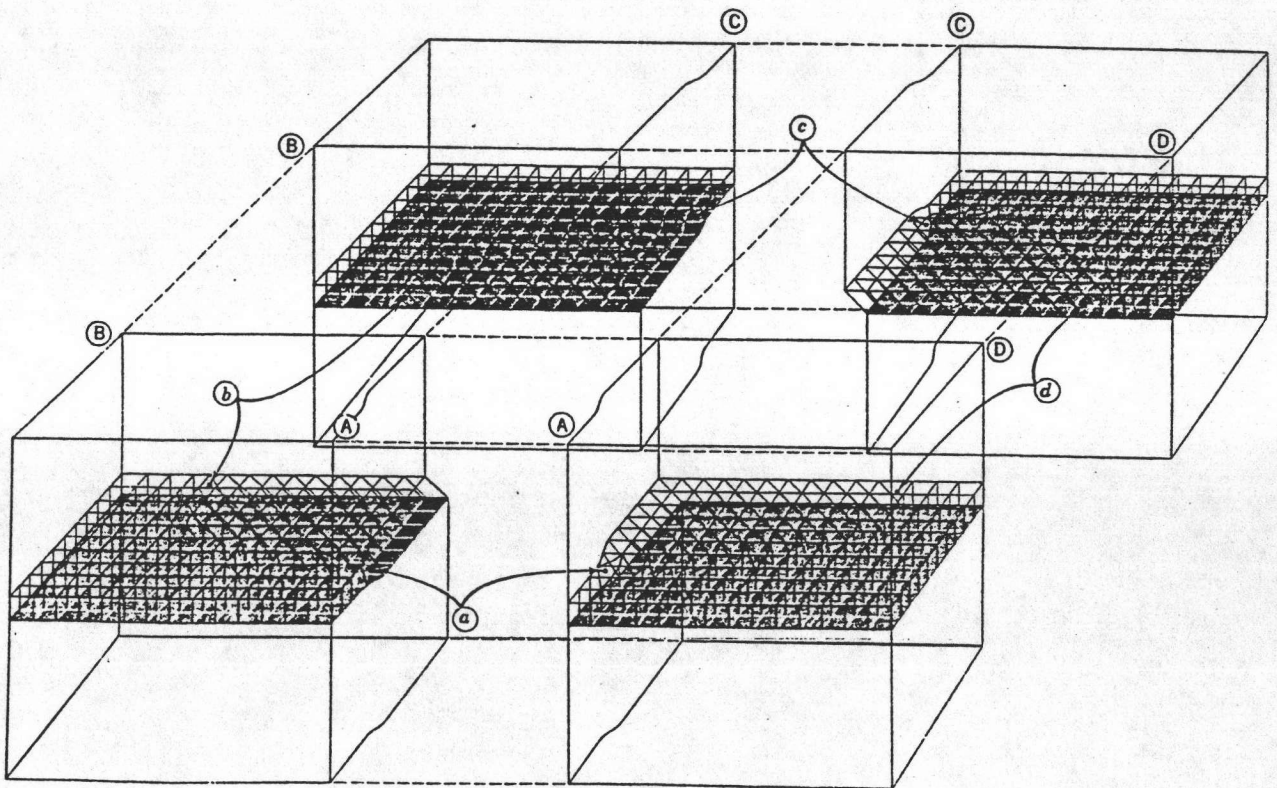


รูป 2.9 ก. แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนของขอบ
ข. แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนแบบสกรู

ตัวอย่างเหตุการณ์ที่แสดงการเกิดทั้ง 2 แบบ มีดังนี้

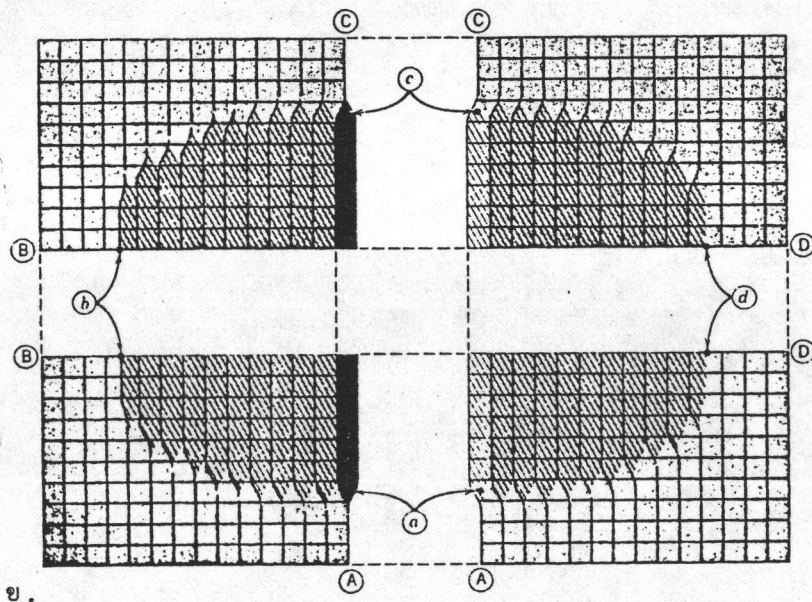
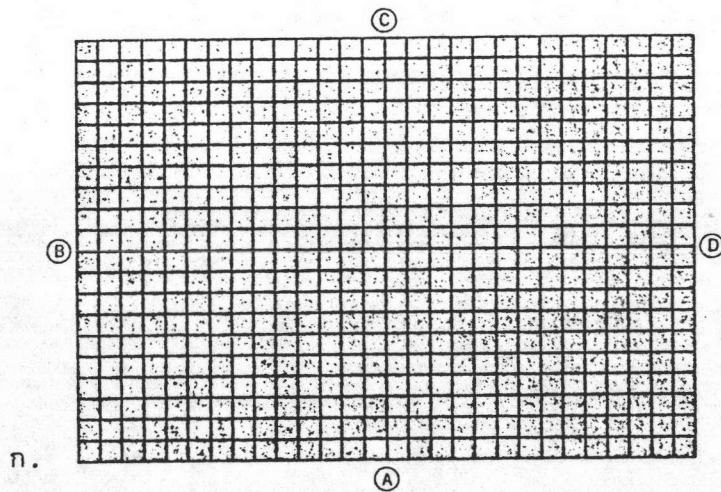


รูป 2.10 ก. แสดงระนาบ 2 ระนาบของแลททิสแบบคิวบิกที่อยู่ติดต่อกัน
ณ บริเวณกึ่งกลางก่อนผลึก



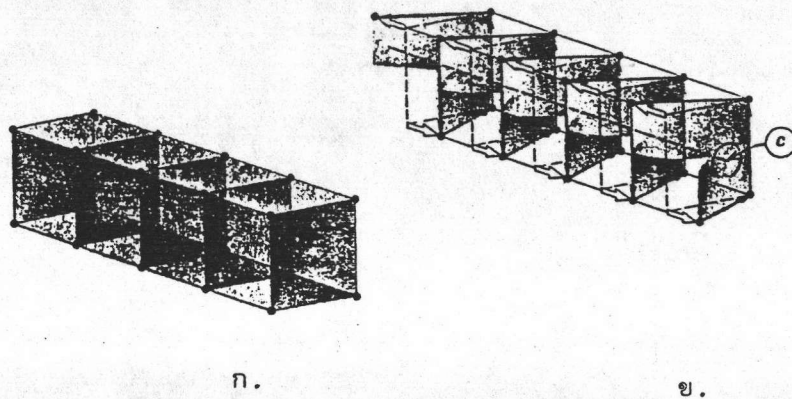
รูป 2.10 ข. แสดงการบิดเบี้ยวของแลททิส โดยที่ตัดแบ่งผลึกออกเป็น
4 ส่วน

รูป 2.10 ก. แสดงระนาบ 2 ระนาบของคิวบิกแลททิส ที่อยู่ติดต่อกัน ณ บริเวณกึ่งกลางก้อนผลึก ถ้าหากว่า จุดแลททิสของระนาบด้านบนบนตรงบริเวณกึ่งกลางระนาบมีการเลื่อนไปทางด้านซ้ายมือเป็นระยะทาง $\frac{1}{2}$ ของค่าคงที่โครงผลึกประกอบกับมีการเลื่อนจุดแลททิสไปทางด้านขวามือของระนาบด้านล่าง เป็นระยะทาง เท่ากับการเลื่อนของระนาบด้านบน ซึ่งทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของแลททิส ดังรูปที่ 2.10 ข. โดยที่ ได้ตัดแบ่งก้อนผลึกออกเป็น 4 ส่วน เพื่อแสดงรายละเอียดของการเกิดการบิดเบี้ยวของแลททิส จากเหตุการณ์อันเดียวกันนี้ถ้ามองจากทางด้านบนก้อนผลึกจะเห็นดังรูปที่ 2.11 ก. และ ข.



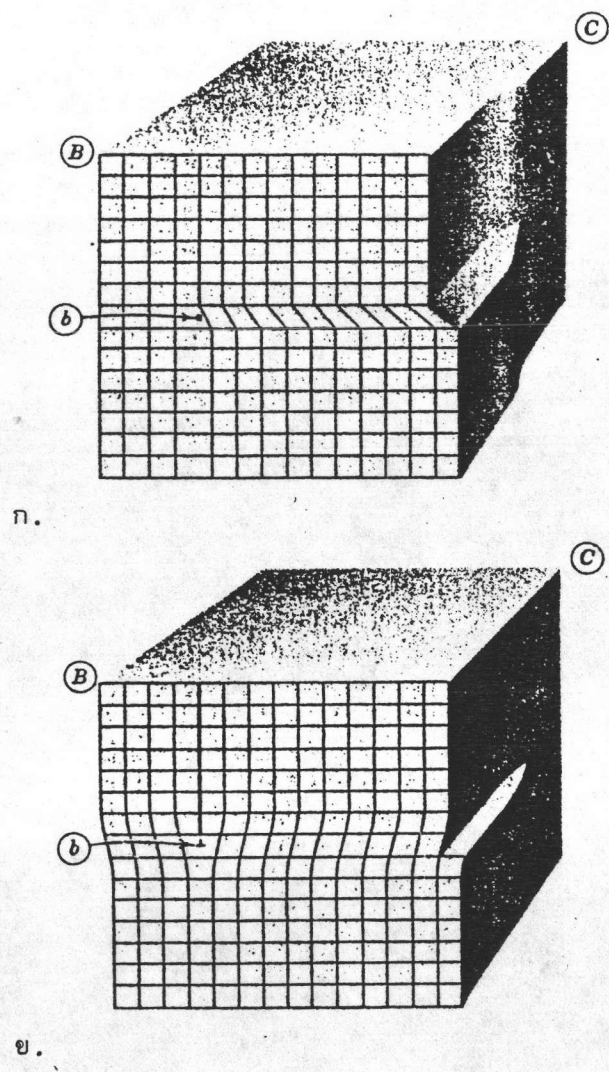
รูป 2.11 ก. แสดงรูปของ 2.10 ก. เมื่อมองจากด้านบนก้อนผลึก
 รูป 2.11 ข. แสดงรูปของ 2.10 ข. เมื่อมองจากด้านบนก้อนผลึก

รูปที่ 2.10 และ 2.11 ได้แสดงให้เห็นว่า แลททิส ๓ บริเวณตรงกึ่งกลาง ผลึกหลังจากที่มีการเลื่อน จุดแลททิสเรียงร้อยแล้ว แลททิสก็ยังคงรักษาความเป็นระเบียบตามพวกแลททิสที่เลื่อนแต่จุดแลททิสรอบนอกที่ไม่มีการเลื่อนก็ยังคงรักษารูปแบบเดิมอยู่ ดังนั้น บริเวณที่เกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึก คือ บริเวณที่ติดต่อกันของแลททิสตรงกึ่งกลางผลึกกับแลททิสรอบนอก ซึ่งบริเวณนี้จะเกิด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นชั้น โดยระนาบที่มีการเลื่อนเรียกว่า "ระนาบเลื่อน (slip plane)" ส่วนบริเวณภายในพวกของระนาบที่มีการเลื่อนจนเกิดการเอนเอียง ถูกเรียกว่า "การเคลื่อน (dislocation)" ในรูป 2.10 และ 2.11 นั้นได้แสดงให้เห็นลักษณะการเคลื่อนแล้วก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึก ให้พิจารณาจุด θ ที่จุด c ในผลึก โดยมองให้มีส่วนเล็กเป็นทางด้านซ้ายหรือขวามือของรูปที่ 2.10 ข. และรูปที่ 2.11 ข. จะเห็นลักษณะการเคลื่อนแบบลึกรูปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 2.12 ข. ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น \odot



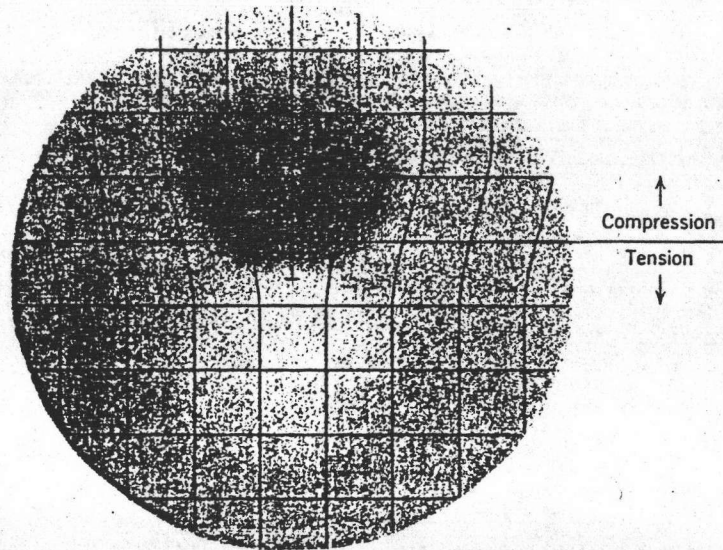
รูป 2.12 ก. แสดง 4 หน่วยเซลล์ของคิวบิก แลททิส
 ข. แสดงถึงการเกิดการเคลื่อนแบบลึกรูปแบบทวนเข็มนาฬิกา
 ณ ที่จุด c

ในทำนองเดียวกัน เมื่อมาพิจารณา ณ ที่จุด a ในผลึกโดยมองในทิศทางเดียวกับจุด c ก็พบลักษณะการเคลื่อนแบบลึกร เช่นกัน แต่มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น \odot ต่อมาเมื่อพิจารณา ณ ที่จุด b ในผลึก โดยมองให้มีส่วนลึกเป็นทางด้านหลังหรือด้านหน้าของรูปที่ 2.10 ข. และ 2.11 ข. จะเห็นลักษณะการเคลื่อนของขอบ เกิดขึ้นเนื่องจากมีระนาบหนึ่งของแลตทิสทางด้านบนของพวกระนาบเลื่อนเข้ามาแทรกอยู่ ดังรูปที่ 2.13 ก. และ ข. ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น \perp



รูป 2.13 ก. แสดงการเกิดบิดเบี้ยวของหนึ่งในสี่ ส่วนของรูป 2.10 ก.
 ข. แสดงการเกิดการเคลื่อนของขอบของรูป 2.13 ก. ภายหลังจากเกิดการบิดเบี้ยวเรียบร้อยแล้ว

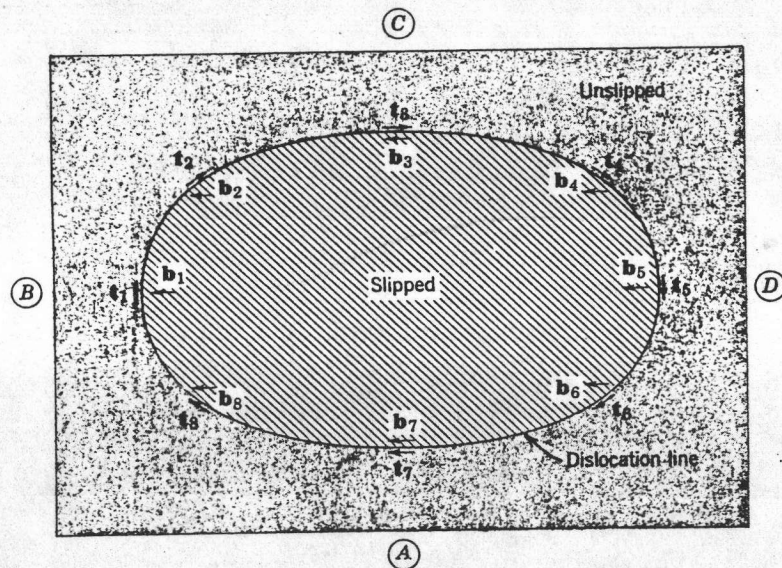
ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณา ณ จุด a ในผลึก โดยมองในทิศทางเดียวกันกับจุด b ก็พบลักษณะการเคลื่อนของขอบอีกเช่นกัน แต่เกิดขึ้นเนื่องจากมีระนาบหนึ่งของแลตทิสทางด้านล่างของพวกระนาบเลื่อนเข้ามาแทรกอยู่ ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น T จากการศึกษามาทั้งหมด พบว่าลักษณะการเคลื่อนของขอบกับลักษณะการเคลื่อนแบบลักรมีสาเหตุมาจากชนิดของความเครียด (strains) ที่กระทำบนผลึกแตกต่างกัน จากรูปที่ 2.14 พบความจริงว่าแลตทิสในพวกรที่มีการเคลื่อนของขอบในบริเวณที่มีระนาบแทรกอยู่ มีความเครียดแบบความกดตัน (compressive strain) เกิดทางด้านข้างของระนาบเลื่อน และมีความเครียดแบบการดึง (tensile strain) เกิดในบริเวณอีกด้านหนึ่ง แต่ถ้าเกิดเป็นการเคลื่อนแบบลักรก็จะมีแต่ความเครียดแบบการเฉือน (shear strain) เท่านั้น



รูป 2.14 แสดงการเกิดความเครียดแบบการดึงในบริเวณที่แลเงาจาก ๆ และเกิดความเครียดแบบความกดตันในบริเวณแลเงาเข้ม ๆ แล้วทำให้เกิดการเคลื่อนของขอบ

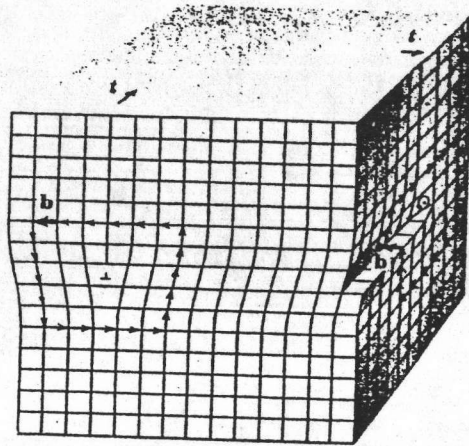
การเคลื่อนของแลททิสนั้นสามารถ อธิบายได้โดยใช้เวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ คือ เวกเตอร์ซึ่งมีขนาดหนึ่งหน่วย (unit vector) ใช้แสดงทิศทางของเส้น ล้อมรอบบริเวณที่มีการเคลื่อน (dislocation line) ณ จุดใด ๆ ซึ่งเวกเตอร์นี้จะขนานกับเส้นที่ล้อมรอบบริเวณที่มีการเคลื่อน ณ ที่จุดนั้น โดยมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาอย่างใดอย่างหนึ่งตามแต่จะกำหนด สัญลักษณ์ ใช้แทนเวกเตอร์นี้เป็น \vec{t} ส่วนอีกเวกเตอร์หนึ่ง เป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับระยะทางของระนาบเลื่อนด้านบนของแลททิลที่มีการเลื่อนไป เมื่อเทียบกับระนาบเลื่อนด้านล่างของแลททิล โดยให้มีทิศทางตามทิศการเลื่อนของระนาบเลื่อนด้านบนของแลททิลโดยทั่วไป เรียกเวกเตอร์นี้ว่า "เบอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgers vector) หรือทรานส์เลชัน เวกเตอร์ (translation vector)" สัญลักษณ์ ใช้แทนเวกเตอร์นี้เป็น \vec{b} ถ้ามาตุการณ์นำเอาเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ไปใช้อธิบายการเคลื่อนของแลททิลในเหตุการณ์ที่ได้อธิบายมาแล้ว จะทำให้เข้าใจดีขึ้นดังนี้

จากเหตุการณ์เดิมเมื่อเขียนเป็นรูปของเวกเตอร์ \vec{t} กับ \vec{b} จะเขียนได้ดังรูปที่ 2.15



รูป 2.15 แสดงรูปในบริเวณที่มีการเคลื่อน โดยแสดงการอธิบายเป็นในรูป 2 เวกเตอร์ คือ เวกเตอร์ \vec{t} กับ \vec{b}

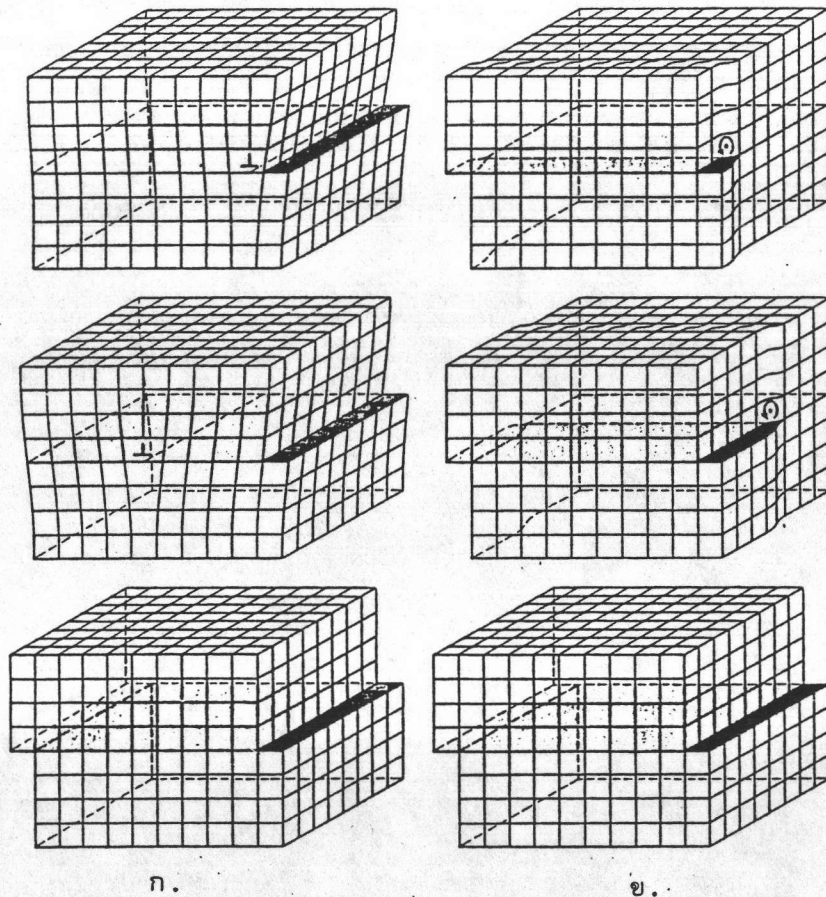
จากการสังเกตก็พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเวกเตอร์ \vec{c} เป็นไปอย่างต่อเนื่อง และมีทิศทางตรงกันข้ามกันเมื่ออยู่ในตำแหน่งที่อยู่ตรงกันข้ามกันของเส้นที่ล้อมรอบบริเวณที่มีการเคลื่อน ส่วนเวกเตอร์ \vec{b} มีขนาดและทิศทางเดียวกันบนทุก ๆ จุดของเส้นที่ล้อมรอบบริเวณที่มีการเคลื่อน ซึ่งเวกเตอร์ \vec{b} สำหรับการเคลื่อนของแลททิสแต่ละแห่ง สามารถหาได้จากการใช้หลักความจริงที่ว่า "เมื่อทำการต่อเวกเตอร์ซึ่งมีขนาดเท่ากับค่าคงที่ของโครงแลททิส สำหรับแลททิสที่ล้อมรอบ สามารถต่อกันเป็นวงจรปิดได้พอดี (closed circuit) แต่สำหรับบริเวณแลททิสที่ไม่ล้อมรอบ จะไม่สามารถต่อกันเป็นวงจรปิดได้พอดี นอกจากนี้การเพิ่มเวกเตอร์อันหนึ่งเข้าไปยังทำให้เกิดเป็นวงจรปิดได้พอดี เวกเตอร์อันที่เพิ่มเข้าไปนี้ก็คือ เบอร์กอร์ เวกเตอร์ (\vec{b}) สำหรับการเคลื่อนของแลททิสที่ไม่ล้อมรอบ" การหาเวกเตอร์ \vec{b} สำหรับการเคลื่อนของแลททิสที่ไม่ล้อมรอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16



รูป 2.16

แสดงวงจรปิด 2 วงจรขนาด 5×5 ของบริเวณที่มีการเคลื่อนของขอบ (ด้านหน้า) และของบริเวณที่มีการเคลื่อนแบบสักรู (ด้านหลัง)

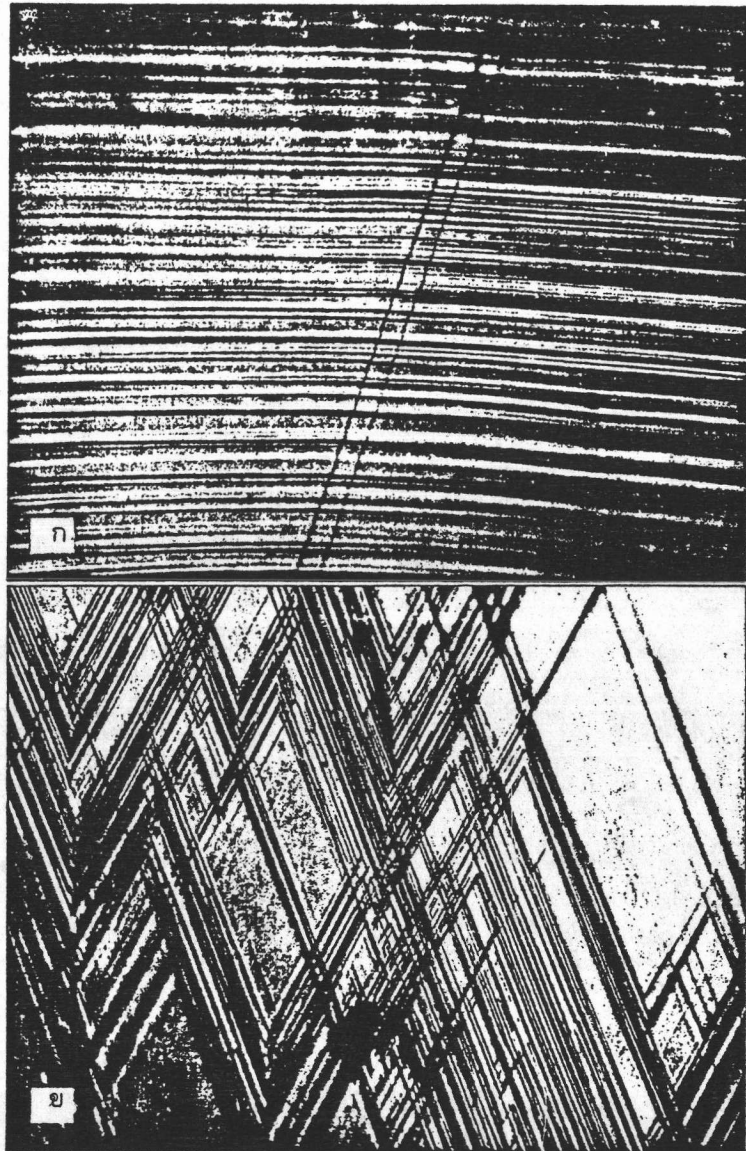
เมื่อพิจารณาในบริเวณซึ่งเกิดการเคลื่อนของขอบ ก็พบว่าเวกเตอร์ \vec{b} ต้องตั้งฉากกับเวกเตอร์ \vec{c} ส่วนในบริเวณซึ่งเกิดการเคลื่อนแบบสักรู เวกเตอร์ \vec{b} ต้องขนานกับเวกเตอร์ \vec{c} แต่ถ้าเวกเตอร์ \vec{b} และเวกเตอร์ \vec{c} ทำมุมกันระหว่าง 0° กับ 90° ก็จะเกิดการเคลื่อนแบบผลักรันระหว่าง การเคลื่อนของขอบกับการเคลื่อนแบบสักรู แต่ถ้าระนาบใดมีพวก เวกเตอร์ \vec{c} และเวกเตอร์ \vec{b} อยู่ ระนาบนั้นจะมี "การเลื่อน (slip)" ซึ่งขบวนการเลื่อนนั้นได้แสดงดังในรูป รูป 2.17 ก. และ ข. โดยที่เกิดจากการเคลื่อนของขอบอย่างเดียว หรือจากการเคลื่อนแบบสักรูอย่างเดียว



รูป 2.17 ก. แสดงการเลื่อนของระนาบ จากขวาไปซ้าย เนื่องจากการเคลื่อนของขอบอย่างเดียว

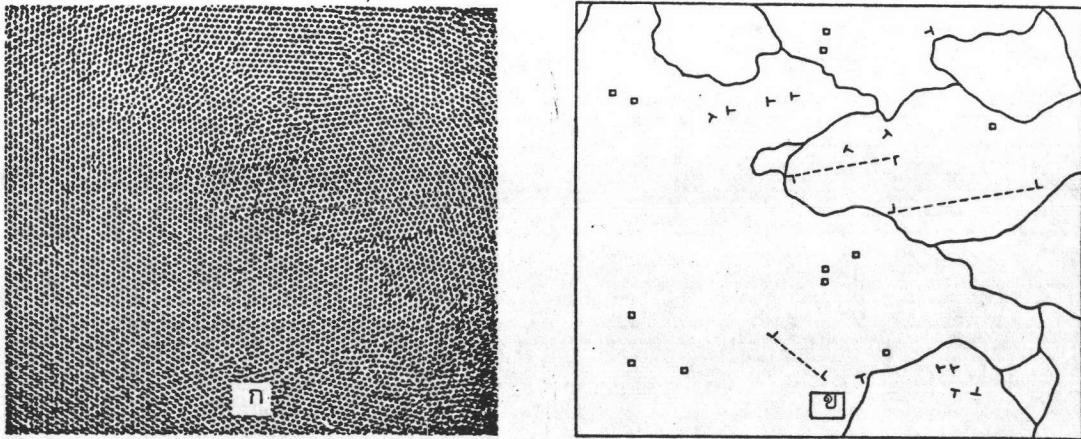
ข. แสดงการเลื่อนของระนาบ จากขวาไปซ้าย เนื่องจากการเคลื่อนแบบสักรูอย่างเดียว

ถ้ามองดูในเนื้อสารตรงบริเวณที่มี การเลื่อน (slip) จะเห็นเป็นเส้น ๆ
ซึ่งเกิดจากการเลื่อนของระนาบ ดังรูปที่ 2.18



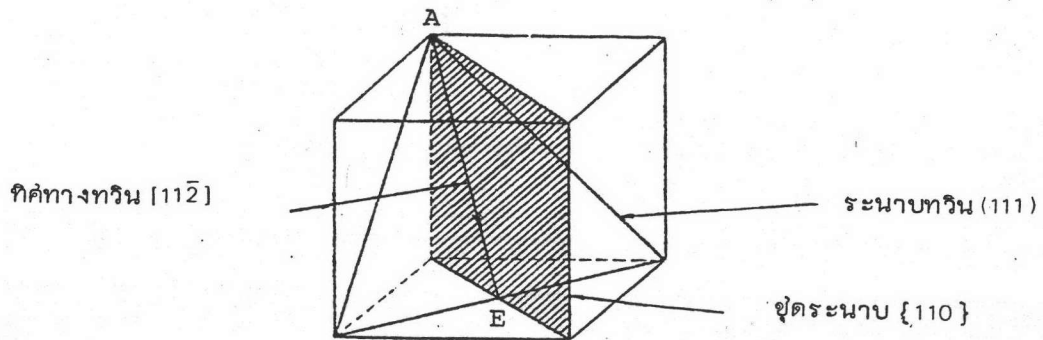
รูป 2.18 การเกิดระนาบเลื่อนตรงบริเวณเส้น ๆ ที่เห็นในรูปของ
โลหะผสมทองแดง 93% กับอลูมิเนียม 7% โดยน้ำหนัก
รูป ก. กำลังขยาย 400 เท่า
รูป ข. กำลังขยาย 200 เท่า

2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในล่องมิติ คือ ความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว (surface imperfection) ความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิวของโครงสร้างผลึกในธรรมชาติ เกิดขึ้นเนื่องจาก อะตอมมีการจัดเรียงตัว เปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่ง โดยผ่านเส้นขอบเขต (boundary) แต่ใน 3 มิติพวกเส้นขอบเขตที่แบ่งรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่งในผลึกก้อนเดียวกัน จะถูกเรียกว่า "เกรน บาวนารี (grain boundary)" ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นการแสดงภาพใน 2 มิติของความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว พร้อมทั้งแสดงเกรน บาวนารี กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกอื่น ๆ

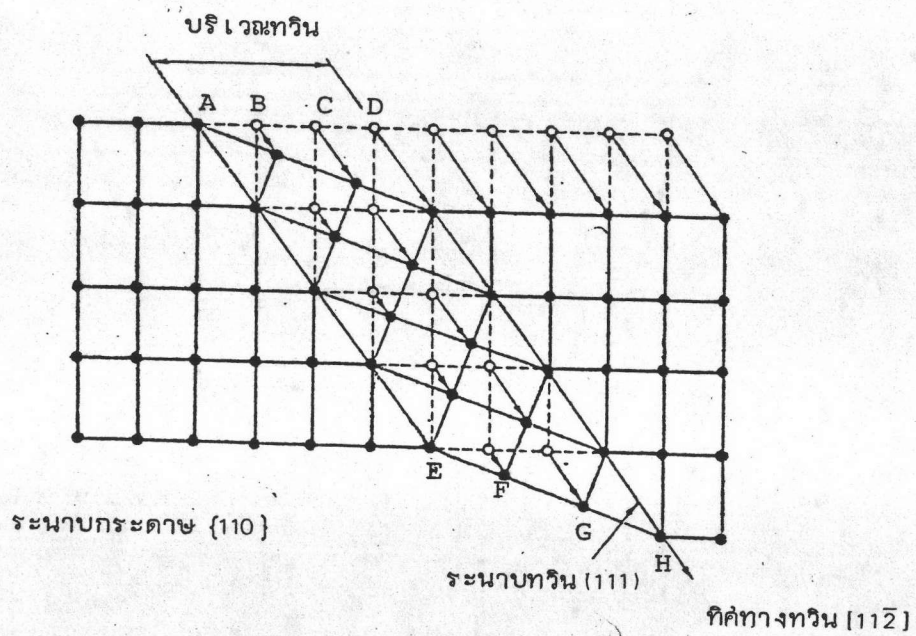


รูป 2.19 ก. แสดงภาพ 2 มิติของความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิว พร้อมทั้งแสดงเกรน บาวนารี กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะต่าง ๆ
 ข. แสดงแผนที่ของรูป ก. โดยใช้เส้นทึบแสดงเกรน บาวนารี, ⊥ แสดงลักษณะการเคลื่อนของขอบ, J.....L แสดงลักษณะการเคลื่อนของขอบขยายกันออกไปตามแนวนั้น และ □ แสดงการเกิดช่องว่าง หรือ เวคินซี

จากความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิวจึงมีระนาบที่แบ่งการเรียงตัวของอะตอมในผลึกเป็น 2 บริเวณ โดยมีสมมาตรแบบกระจก ลักษณะนี้จึงทำให้ผลึกมีลักษณะเป็น "ทวิน (twin)" ส่วนระนาบที่แบ่งการเรียงตัวของอะตอมในผลึก เรียกว่า "ระนาบทวิน (twin plane)" ซึ่งมีลักษณะการเกิดดังนี้ ในผลึกแบบ เฟลล์ เซ็นเตอร์ คิวบิก ให้ดูรูปที่ 2.20



ก.



ข.

รูป 2.20 ก. แสดงระนาบทวิน และทิศทางทวินใน เฟลล์ เซ็นเตอร์

คิวบิก แลททิส

ข. แสดงขบวนการเกิดทวินในระนาบ (110) ใน เฟลล์ เซ็นเตอร์

คิวบิก แลททิส

ในขบวนการเกิดทริน ในระนาบ (110) ซึ่งในที่นี้ให้เป็นระนาบของกระดาษ โดยจุดแลททิซบนระนาบ (111) ในบริเวณทรินมีการเคลื่อนในลักษณะที่มีแรงเฉือน (shear) มากกระทำในทิศทาง $[11\bar{2}]$ แล้วอะตอมตัวแรกจาก B ถึง F มีการเคลื่อนที่ $\frac{1}{3}$ ของระยะทางระหว่างอะตอมในแนวตั้งและแนวนอน อะตอมตัวที่ 2 จาก C ถึง G มีการเคลื่อนที่ $\frac{2}{3}$ ของระยะทางระหว่างอะตอมในแนวตั้งและแนวนอน อะตอมตัวที่ 3 จาก D ถึง H มีการเคลื่อนที่เต็มหนึ่งหน่วยของค่าคงที่ โครงสร้างผลึกทั้งแนวตั้งและแนวนอนพอดี ถ้ามองในเนื้อของลำตรงบริเวณที่เป็นทรินจะเห็นเป็น แถบ ซึ่งเกิดจากมีการเรียงตัวของอะตอม ผิดจากบริเวณที่ล้อมรอบอยู่ ดังรูป 2.21



รูป 2.21 ภาพถ่ายของโลหะผสม 70% Cu, 30% Zn แสดงให้เห็น แถบของการเกิดทรินในเกรนของผลึก