



## บทที่ 2

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

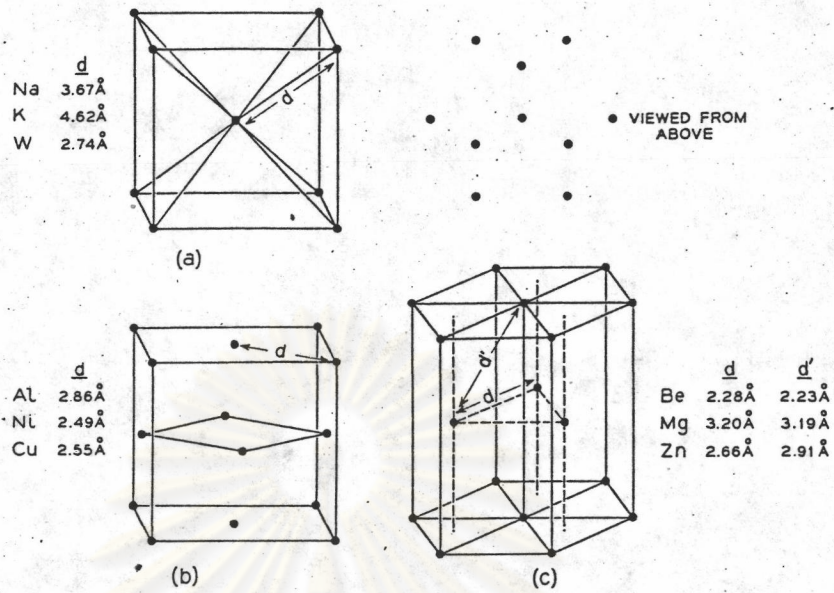
## 2.1 การปล่อยอิเล็กตรอนจากโลหะ (4)

โดยปกติการทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะมีหลายวิธีการ เช่น การปล่อยโฟตอน (photon) บนผิวโลหะซึ่งเรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric emission) การทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะโดยใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงซึ่งเรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้า (field emission) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปรากฏการณ์ชอททกี (Schottky effect) หรือการปล่อยอิเล็กตรอนโดยใช้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนผิวโลหะซึ่งเรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary emission) แต่ในแคโทด (cathode) ของปืนอิเล็กตรอนของหลอดรังสีแคโทด (cathode-ray tube) ส่วนใหญ่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวของโลหะที่ใช้ทำแคโทด โดยการทำให้หลุดออกมาจากผิวโลหะที่ร้อน (thermionic emission) วิธีการคือให้ความร้อนกับโลหะที่ใช้ทำแคโทดจนถึงระดับที่โลหะชนิดนั้นปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะให้พลังงานความร้อนไม่เท่ากัน

## 2.1.1 อิเล็กตรอนในตัวนำ

อะตอมของโลหะจะจัดเรียงตัวกันอยู่ในรูปของผลึก 3 แบบเป็นส่วนใหญ่คือ แบบบอดี-เซนเตอร์ คิวบิก (body-centered cubic structure) เฟซ-เซนเตอร์ คิวบิก (face-centered cubic structure) และ เฮกซะโกนอล (hexagonal structure) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 ระยะ  $d$  ในรูปเรียกว่าค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) ซึ่งจะมีค่าแล้วแต่ชนิดของโลหะ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วระยะห่างระหว่างอะตอมที่ใกล้กันที่สุดในผลึกของโลหะจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2-5 อังสตรอม (angstrom)



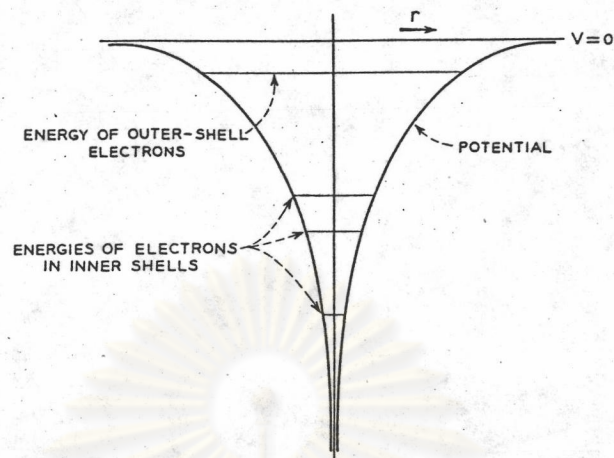


รูปที่ 2.1 โครงสร้างการจัดเรียงอะตอมในผิวของโลหะ 3 แบบ

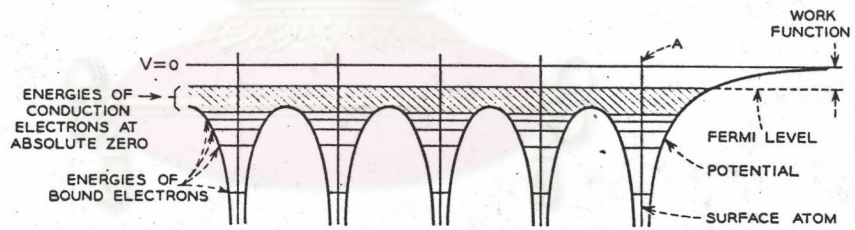
- (ก) แบบ บอดี-เซนเตอร์ คิวบิก
- (ข) แบบ เฟซ-เซนเตอร์ คิวบิก
- (ค) แบบ เฮกซะโกนอล

พิจารณาอะตอมให้อยู่ในสถานะโดดเดี่ยว อิเล็กตรอนของอะตอมจะเคลื่อนที่รอบนิวเคลียส โดยอิเล็กตรอนจะอยู่ในระดับพลังงานที่สัมพันธ์กับลักษณะการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียส ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นกลุ่มหมอกของประจุลบรอบนิวเคลียส โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนต่อปริมาตรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นกลุ่มหมอกของประจุลบ พลังงานศักย์ของอะตอมในสถานะโดดเดี่ยวแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

สำหรับอะตอมในระบบผลึก พลังงานศักย์ของระบบจะมีลักษณะเป็นคาบดังรูปที่ 2.3 ซึ่งระบบของผลึกอาจพิจารณาได้ว่า อิเล็กตรอนวงนอกสุดมีการทับกัน (overlap) ของแถบพลังงานและอิเล็กตรอนจะสามารถวิ่งไปมาในแถบนี้ได้โดยตลอด เรียกแถบพลังงานนี้ว่า แถบการนำ (conduction band) โดยไม่สามารถบอกได้ว่าอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งเป็นอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมใดได้ โดยวิธีนี้โลหะจึงนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.2 แสดงพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนในอะตอมเทียบกับระยะห่างจากนิวเคลียสของอะตอมในสภาวะโคตเตีย



รูปที่ 2.3 แสดงพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนในระบบผลึก

2.1.2 พลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะ

ที่อุณหภูมิปกติ อิเล็กตรอนในแถบการนำ สามารถเคลื่อนที่ไปยังอะตอมอื่นภายในแถบการนำได้ และถ้าเรากระตุ้นด้วยพลังงานมากขึ้นอีกจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบการนำสามารถหลุดออกจากผิวของโลหะได้ พลังงานภายนอกที่ให้เข้าไปแล้วทำให้อิเล็กตรอนในแถบการนำหลุดออกมาจากผิวโลหะ โดยมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ เรียกว่า เวก์คฟังก์ชัน (work function) ซึ่งจะมีค่าต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ลักษณะของผิว



Metal	$\phi$ (eV)	Metal	$\phi$ (eV)	Metal	$\phi$ (eV)
Ag	4.28	Cs	1.89	Pd	4.82
Al	3.74	Cu	4.47	Sb	4.08
Au	4.58	Fc	4.36	Sr	2.35
Ba	2.29	K	2.15	Ta	4.12
C	4.39	M	4.27	Th	3.41
Ca	2.76	Na	2.27	Ti	4.09
Cb	3.99	Ni	4.84	W	4.50

ตาราง 2.1 แสดงค่าพลังงานเฉลี่ยของเวอรัคฟังก์ชันของโลหะชนิดต่างๆ

### 2.1.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากโลหะร้อน (5)

เมื่อให้พลังงานความร้อนกับโลหะ ในปริมาณที่มากกว่าเวอรัคฟังก์ชันของโลหะ จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวโลหะชนิดนั้นได้ โดยปริมาณของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ สามารถหาค่าได้ในรูปของกระแสไฟฟ้าโดยใช้สมการของ ริชาร์ดสัน-ดัชแมน (Richardson-Dushman equation) คือ

$$I = AT^2 \exp(-b/T) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนหลุดออกมาต่อพื้นที่

ผิว 1 ตารางเซนติเมตรของผิวโลหะร้อน

$A$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของโลหะที่ใช้

$T$  คือ อุณหภูมิของโลหะในหน่วยเคลวิน (K)

$b$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับเวอรัคฟังก์ชันของโลหะ

ค่าคงที่  $b$  สามารถหาได้จากเวอรัคฟังก์ชันของโลหะตามสมการ



$$b = \frac{eW}{k} \quad (2.2)$$

$$= 11600 \text{ W} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน ( $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์)

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann's constant)

$$= 1.38 \times 10^{-23} \text{ วัตต์ . วินาที}$$

$W$  คือ เวก์คฟังก์ชันของโลหะที่ใช้เป็นแคโทด

เมื่อแทนสมการ (2.3) ลงใน สมการ (2.1) สามารถเขียนสมการใหม่ในรูปร่างต่างๆได้เป็น

$$I = AT^2 \exp\left(-\frac{11600}{T} W\right) \quad (2.4)$$

cathode material	A(A.cm <sup>-2</sup> .deg <sup>-2</sup> )	W(eV)	melting point ° K
Nickel	1380	5.03	1725
Tungsten	60	4.53	3655
Molybdenum	55	4.15	2895
Tantalum	60	4.10	3300
Thorium	60	3.35	2118
Thoriated tungsten	3.0	2.63	-
Oxide-coated metal	0.01	1.00	-

ตาราง 2.2 แสดงค่า A และ W ที่ใช้ในสมการของริชาร์ด-ดีชแมนของแคโทดชนิดต่างๆ

อย่างไรก็ดีสารที่จะนำมาทำเป็นแคโทดได้นั้นมีข้อจำกัดที่สำคัญ 3 ประการ คือ หนึ่ง ต้องเป็นสารที่สามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากผิวเมื่อได้รับพลังงานในรูปของความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารนั้น สอง โครงสร้างของสารนั้นจะต้องแข็งแรง และสามารถใช้งานได้นาน และ สาม ต้องมีประสิทธิภาพของการปล่อยอิเล็กตรอนนี้คือออกมาในรูปกระแสไฟฟ้าในหน่วยมิลลิแอมแปร์ต่อวัตต์ของพลังงานความร้อนที่ใช้

ในสารที่ใช้ทำแคโทดนั้น ทังสแตนบริสุทธิ์เป็นสารที่มีโครงสร้างทางฟิสิกส์แข็งแรงที่สุด และมีอายุการใช้งานมากที่สุด แต่มีประสิทธิภาพของการปล่อยอิเล็กตรอนต่ำ จึงมีการพัฒนาสารที่ใช้ทำแคโทดจากทังสแตนมีชื่อว่า ทอริเอททังสแตน (thoriated tungsten) ซึ่งมีความแข็งแรงเท่ากับทังสแตนโดยประมาณ มีอายุการใช้งานสั้นกว่าทังสแตนบริสุทธิ์ แต่มีประสิทธิภาพการปล่อยอิเล็กตรอนสูงกว่าทังสแตนบริสุทธิ์ประมาณ 17 เท่า ทอริเอททังสแตนนี้ทำจากสารผสมระหว่างทอริียมออกไซด์ (thorium oxide) กับทังสแตนบริสุทธิ์ โดยนำมาหลอมเหลวรวมกัน และทิ้งไว้จนเย็นตัวลงแล้วฉาบ (coat) ผิวหน้าด้วยแบเรียมออกไซด์ (barium oxide) เป็นชั้นบาง ๆ

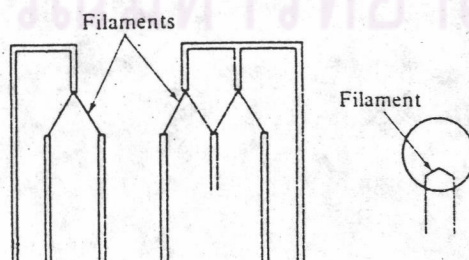
นอกจากนี้ยังมีแคโทดอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า ออกไซด์-โคท แคโทด (oxide-coated cathode) เป็นแคโทดที่ทำโดยการฉาบออกไซด์ของแบเรียม สตรอนเตียม หรือ แคลเซียม ( $BaO, SrO, CaO$ ) ลงไปบนผิวโลหะของนิเกิล แคโทดนี้เป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพการปล่อยอิเล็กตรอนสูงที่สุด คือประมาณ 4 เท่าของทอริเอททังสแตน (6)



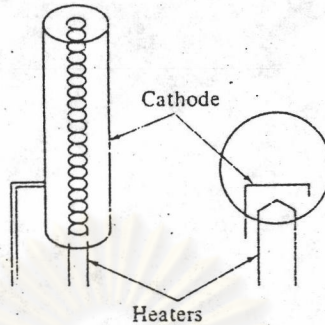
Type of emitter	Thermionic work fn (eV)	Operating temp. ( $^{\circ}$ K)	Maximum usable emission ( $A \cdot cm^{-2}$ )	Approx. life (hr)
Tungsten	4.5	2600	0.5	10000
Tantalum	4.1	2400	0.5	10000
Thoriated tungsten	2.6	2000	3.0	5000
Phillips dispenser (barium-tungsten)	2.1	1200	1.3	8000
Oxide-cathode	1.2	1000	0.5	3000

ตาราง 2.3 แสดงสมบัติของการปล่อยอิเล็กตรอนของแคโทดชนิดต่างๆ

วิธีการทำให้แคโทดร้อนเพื่อปล่อยอิเล็กตรอนออกมาทำได้ 2 วิธี (5) การทำให้ร้อนโดยตรง (directly heated filament) และการทำให้แคโทดร้อนทางอ้อม (indirectly heated cathode) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 การทำให้โลหะร้อนโดยตรงและสัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 การทำให้อุ่นโดยทางอ้อมและสัญญาณในวงจรไฟฟ้า

วิธีการให้ความร้อนทางอ้อม เป็นวิธีที่ใช้นิวทริอัมอิเล็กตรอนของหลอดรังสีแคโทดทั่วไป โดยสร้างแคโทดเป็นรูปทรงกระบอกปิดด้านบน ด้านล่างใส่หลอดความร้อนที่ฉาบด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide) พันเป็นรูปเกลียวสอดเข้าไปภายในแคโทดรูปทรงกระบอก

2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะได้รับแรงกระทำเนื่องจากแรงลอเรนตซ์ (Lorentz force) จะได้สมการ

$$\vec{F} = -e \{ \vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) \} \tag{2.5}$$

เมื่อ  $\vec{E}$  และ  $\vec{B}$  เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กตามลำดับ  $\vec{v}$  เป็นความเร็วของอิเล็กตรอน

ในกรณีที่เคลื่อนที่อยู่ในสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในระบบพิกัดฉากให้ได้ด้วยสมการ



$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= -e E_x \\
 m\ddot{y} &= -e E_y \\
 m\ddot{z} &= -e E_z
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

เมื่อ  $E_x$ ,  $E_y$  และ  $E_z$  คือความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ และ  $m$  คือมวลของอิเล็กตรอน

ในการนี้ที่เคลื่อนที่อยู่ในสนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในระบบพิกัดฉากให้ได้ด้วยสมการ

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= -e(v_y B_z - v_z B_y) \\
 m\ddot{y} &= -e(v_z B_x - v_x B_z) \\
 m\ddot{z} &= -e(v_x B_y - v_y B_x)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

เมื่อ  $B_x$ ,  $B_y$  และ  $B_z$  คือความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ และ  $v_x$ ,  $v_y$  และ  $v_z$  คืออัตราเร็วของอิเล็กตรอนในแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ

### 2.3 เลนส์อิเล็กตรอนเชิงทัศนศาสตร์ (7)

เมื่อลำของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสนามที่มีสมมาตรรอบแกน (axisymmetric field) ทางเดินของอิเล็กตรอนจะเบนเข้าหากัน (converge) หรือกระจายออกจากกัน (diverge) โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสนามที่อิเล็กตรอนผ่านเข้าไป ด้วยลักษณะเช่นนี้ อิเล็กตรอนจึงแสดงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ได้ และเรียกอุปกรณ์ที่สามารถสร้างสนามที่มีสมมาตรรอบแกนว่าเป็นเลนส์ของอิเล็กตรอน กรณีที่เป็นสนามแม่เหล็ก เราเรียกว่า

เลนส์แม่เหล็ก (magnetic lens) และกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าเราเรียกว่าเลนส์ไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic lens) ในการวิจัยครั้งนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเลนส์ไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยเท่านั้น คุณสมบัติของเลนส์ไฟฟ้าสถิตย์เชิงทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอนพิจารณาได้ดังนี้

อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในสนามที่มีสมมาตรรอบแกน  $z$  ความเร็วของอิเล็กตรอนในแนวแกน  $z$  หาได้ดังนี้คือ

$$v \approx v_z = \frac{dz}{dt} = \sqrt{\frac{2eV_0(z)}{m}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $V_0(z)$  คือศักย์ไฟฟ้าที่อยู่บนแกนของระบบ และในบริเวณที่สนามมีสมมาตรรอบแกน  $z$  อิเล็กตรอนจะได้รับแรงกระทำในแนวรัศมีรอบแกนด้วยแรง

$$\vec{F}_r = -e\vec{E}_r \quad (2.9)$$

เมื่อ  $E_r$  เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนวรัศมี

ในการพิจารณาหาศักย์ไฟฟ้าในจุดใดๆ รอบแกนสมมาตรของสนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$V(z, r) = V_0(z) - \frac{1}{4} V_0''(z) r^2 + \frac{1}{64} V_0^{IV}(z) r^4 \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) นี้ จะประมาณเอาเฉพาะเทอมต้นๆ เท่านั้น เพราะเทอมหลังๆ มีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้ และจากสมการ(2.10) สามารถหาค่าของสนามไฟฟ้าในแนวรัศมีได้จาก  $\frac{\partial V}{\partial r} = -E_r$  ดังนั้น

$$E_r = \frac{1}{2} V_0''(z) r \quad (2.11)$$



จากสมการ (2.9) และ (2.11) สามารถเขียนสมการของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนในแนวรัศมีได้เป็น

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{1}{2} e V_0''(z) r \quad (2.12)$$

โดยการใช้ดิฟเฟอเรนเชียลโอเปอเรเตอร์ (differential operator)

$$\frac{d}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{d}{dz} \quad \text{และแทนค่า } \frac{dz}{dt} \quad \text{ด้วยสมการ (2.8) สมการ (2.12)}$$

สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\frac{d}{dz} \left( \sqrt{V_0(z)} \frac{dr}{dz} \right) = \frac{1}{4 \sqrt{V_0(z)}} V_0''(z) r \quad (2.13)$$

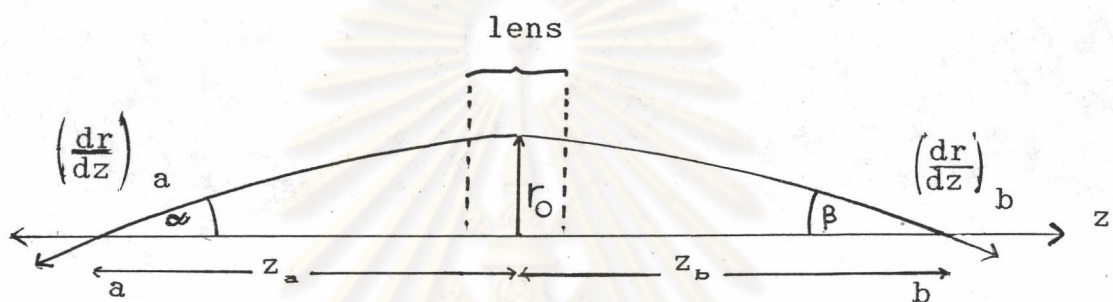
หรืออาจเขียนอีกแบบได้เป็น

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{V_0'(z)}{2 V_0(z)} \frac{dr}{dz} + \frac{V_0''(z)}{4 V_0(z)} r = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อไพรม์ (prime) ที่บอกไว้ในแต่ละค่าของ  $V'$  และ  $V''$  หมายถึงดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับ  $z$  สมการที่ (2.13) หรือ (2.14) เรียกว่าสมการรังสีขนานแกน (paraxial ray equation) เป็นสมการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์สมการของเลนส์อิเล็กตรอนเชิงทัศนศาสตร์ ซึ่งมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด (electrode) ที่นำมาทำเป็นเลนส์ นอกจากนี้สมการรังสีขนานแกนนี้ยังสามารถนำไปใช้กับการเร่งและการโฟกัสอนุภาคไฟฟ้าอย่างอื่นได้ด้วย

สำหรับการนำสมการ (2.13) หรือ (2.14) ไปวิเคราะห์หาระยะโฟกัสของเลนส์แบบต่างๆ สามารถทำได้ในทำนองเดียวกันกับวิธีของเลนส์บางที่มีสมบัติต่อไปนี้

พิจารณาว่าเลนส์มีความบางมาก ไม่คิดทางเดินของอิเล็กตรอนขณะที่อยู่ในเลนส์ แต่จะสนใจเฉพาะทางเดินของอิเล็กตรอนเมื่อผ่านเลนส์ออกมาแล้วเท่านั้น และพิจารณาว่าระยะห่างระหว่างทางเดินของอิเล็กตรอนกับแกนสมมาตรของเลนส์ มีค่าคงตัวที่เท่ากับ  $r_0$  ขณะอยู่ภายในเลนส์ ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะทางเดินของอิเล็กตรอนเมื่อผ่านเลนส์บาง

จากสมการ (2.13) ทำการอินทิเกรตจากช่วง  $z_a$  (ระยะวัตถุ) ถึง  $z_b$  (ระยะภาพ) จะได้

$$\sqrt{V_0 z_b} \frac{dr}{dz} \Big|_{z_b} - \sqrt{V_0 z_a} \frac{dr}{dz} \Big|_{z_a} = \frac{r_0}{4} \int_{z_a}^{z_b} \frac{V_0''(z)}{V_0(z)} dz \quad (2.15)$$

และจากรูปที่ 2.6 ถ้ากรณีที่รังสีตกกระทบขนานกับแกนของเลนส์คือ  $z_a \rightarrow \infty$  จะได้ว่า รังสีที่ผ่านเลนส์อ้อมไปติดกับแกนของเลนส์ที่จุดโฟกัสของเลนส์นี้ และระยะจากจุดกึ่งกลางเลนส์ถึงจุดโฟกัสคือความยาวโฟกัสของเลนส์ จากรูปที่ 2.6 ความยาวโฟกัสของเลนส์มีค่าเป็น

$$f = \frac{r_0}{\tan \beta} ; \tan \beta = \frac{dr}{dz} \Big|_{z_b} \quad (2.16)$$



จากเงื่อนไข  $z_a \rightarrow \infty, \left( \frac{dr}{dz} \right)_{z_a} = 0$  และจากสมการ (2.15) และ (2.16)

ความยาวโฟกัสของเลนส์เขียนเป็น

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{4\sqrt{V_b}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V_0''(z)}{\sqrt{V_0(z)}} dz \quad (2.17)$$

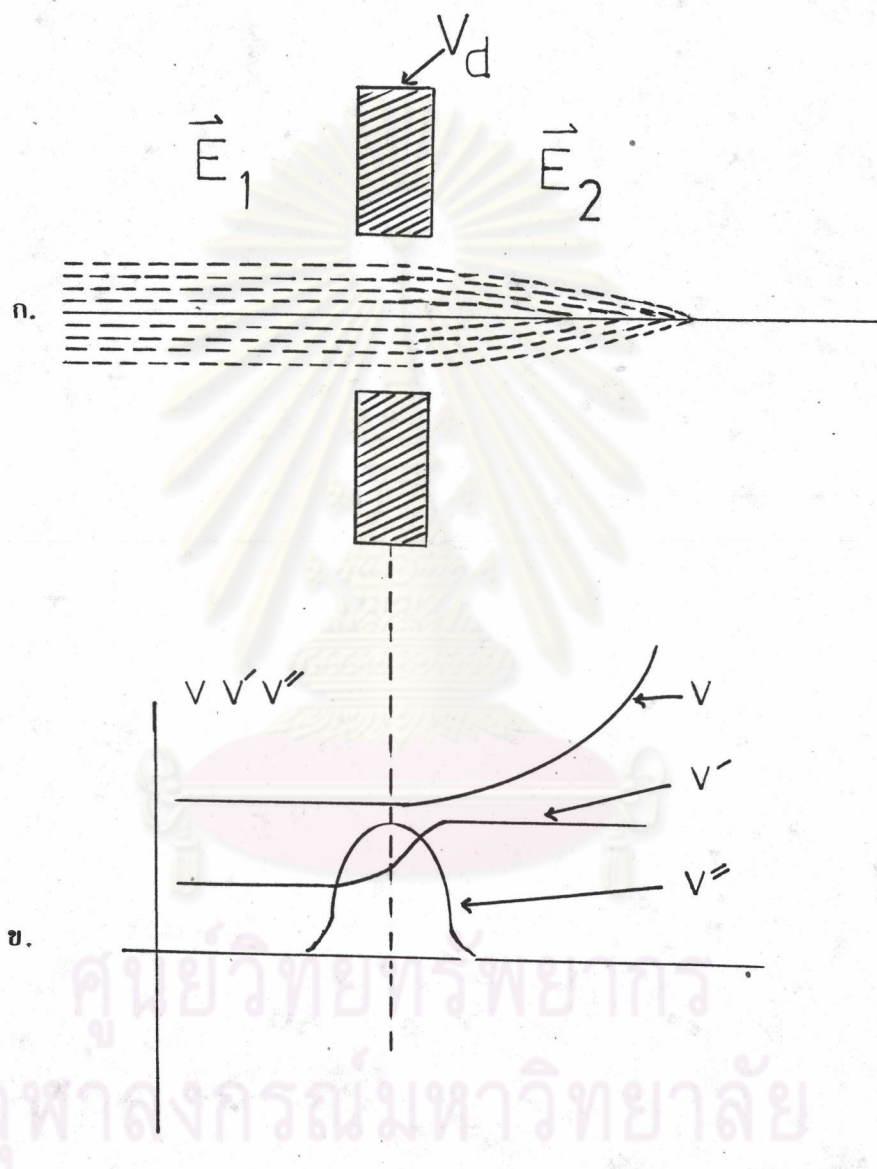
เมื่อ  $V_b = V_0(z_b)$  คือศักย์ไฟฟ้าบนจุด  $z_b$

การพิจารณาหาจุดโฟกัสของเลนส์แบบอื่น ทำได้โดยวิธีการทำนองเดียวกับวิธีการนี้ โดยเริ่มจากเขียนสมการของศักย์ไฟฟ้าของระบบเลนส์นั้นๆ ออกมาให้ได้เสียก่อน แล้วนำมาพิจารณาทำนองเดียวกันกับสมการ (2.15) ถึง (2.17) จะสามารถหาความยาวโฟกัสของเลนส์ระบบนั้นออกมาได้

นอกจากการใช้สมการรังสีขนานแกนวิเคราะห์หาสมบัติของเลนส์อิเล็กทรอนิกส์เชิงทัศนศาสตร์แล้ว คุณสมบัติของเลนส์อาจพิจารณาได้จากกราฟแสดงค่า  $V, V'$  และ  $V''$  เทียบกับ  $z$  โดยเฉพาะค่า  $V''$  ถ้าเป็นบวกแสดงว่าลำของอนุภาคเบนเข้าหากัน ถ้าเป็นลบแสดงว่าลำของอนุภาคกระจายออกจากกัน กรณี  $V'$  ถ้าความชันเป็นบวกแสดงว่าอนุภาคถูกเร่งและเป็นลบแสดงว่าอนุภาคถูกหน่วง

ในเป็นอิเล็กทรอนิกส์ของหลอดโทรทัศน์ขาว-ดำ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เลนส์อิเล็กทรอนิกส์ใช้ขั้วไฟฟ้า 3 แบบ คือ

ก. แบบขั้วไฟฟ้ารูปโคอะแพรมเดี่ยว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเป็นรูปโคอะแพรม ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็น  $V_d \neq 0$  วางอยู่ระหว่างสนามไฟฟ้า  $E_1$  และ  $E_2$  โดยที่  $E_1 \neq E_2$  ดังรูปที่ 2.7 (ก) และกราฟแสดงค่า  $V, V'$  และ  $V''$  กับระยะทางตามแนวแกน  $z$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 (ข)



รูปที่ 2.7 (ก) แสดงลักษณะของเลนส์แบบขั้วไฟฟ้ารูปโคอะแฟรมเดียว

(ข) กราฟแสดงค่า  $V$ ,  $V'$  และ  $V''$  เทียบกับระยะทางตามแนวแกน  $z$

ในกรณีที่  $E_2 > E_1$

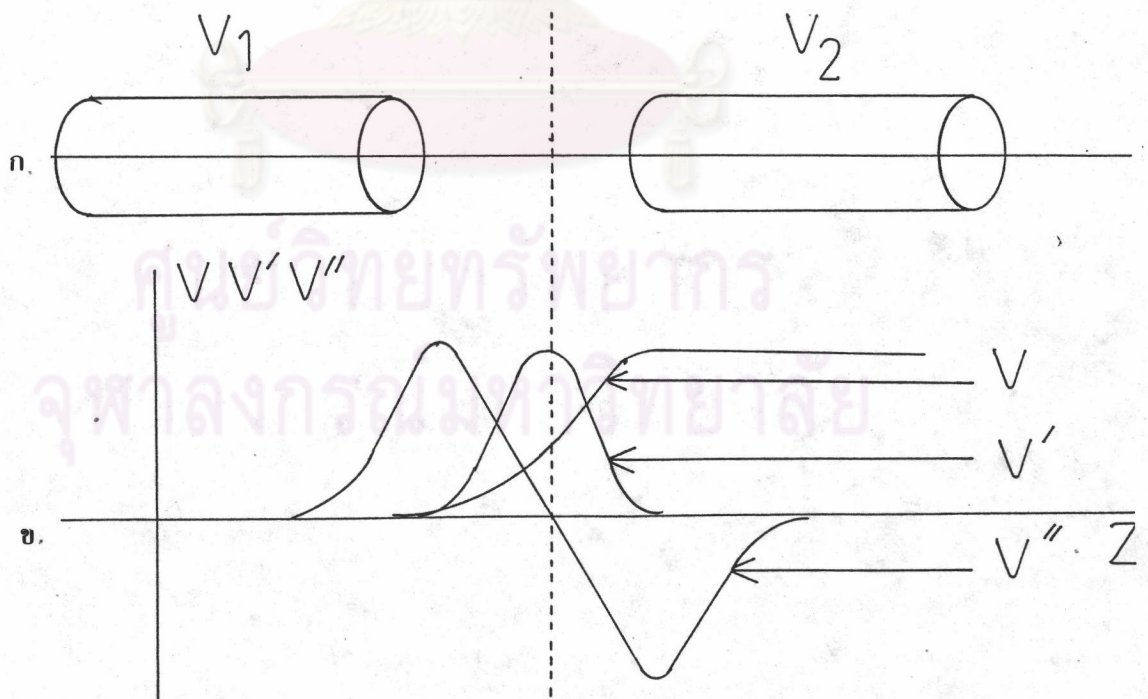


ระยะโฟกัสของเลนส์แบบนี้มีสมการเป็น

$$\frac{1}{f} = \frac{|\vec{E}_2| - |\vec{E}_1|}{4 V_d} \quad (2.18)$$

ลักษณะของเลนส์ชนิดนี้ กรณีที่  $\vec{E}_2 > \vec{E}_1$  เลนส์จะทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนไปด้วย กรณี  $\vec{E}_1 > \vec{E}_2$  เลนส์จะทำหน้าที่หน่วงอิเล็กตรอน และจากกราฟในรูปที่ 2.7 (ข)  $V''$  เป็นบวกแสดงว่าเมื่ออนุภาคผ่านเลนส์ไป และจะเบนเข้าหากัน (converge)

ข. แบบขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกวางเรียงโดยมีแกนร่วมกัน ระบบเลนส์แบบนี้เลนส์ไฟฟ้าสถิตย์จะเกิดขึ้นระหว่างขอบของทรงกระบอกด้านในอยู่ใกล้กัน ดังรูปที่ 2.8 (ก) โดยให้ศักย์ไฟฟ้ากับทรงกระบอกทั้งสองเป็น  $V_1$  และ  $V_2$  โดยที่  $V_1 = V_2$  และกราฟแสดงค่า  $V$ ,  $V'$  และ  $V''$  และ  $z$  ของเลนส์แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 (ข)



รูปที่ 2.8 (ก) แสดงลักษณะเลนส์แบบขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก

(ข) กราฟแสดงค่า  $V$ ,  $V'$  และ  $V''$  กับระยะทางตามแกน  $z$



ระยะโฟกัสของเลนส์ระบบนี้สมการเป็น

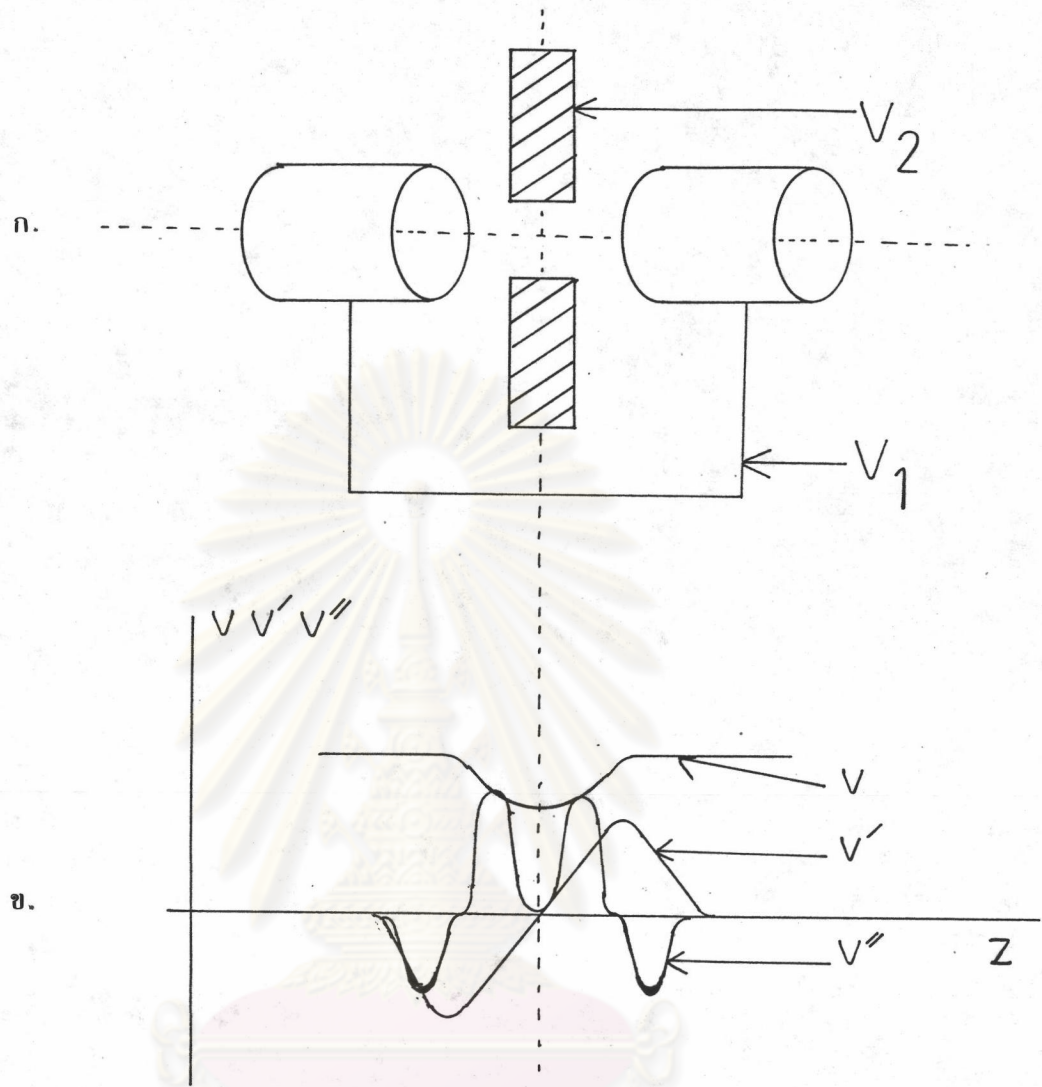
$$f = 10R \left( \frac{V_1}{V_2 - V_1} \right)^2 \quad (2.19)$$

เมื่อ  $R$  เป็นรัศมีของทรงกระบอก  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นศักย์ไฟฟ้าของทรงกระบอก จากกราฟค่าของ  $V''$  ในแนวแกน  $z$  มีทั้งเป็นบวกและลบ แสดงว่าอิเล็กตรอนขณะผ่านเลนส์มีทั้งแบบเข้าหากันและกระจายออกจากกัน ส่วนผลรวมเมื่อผ่านเลนส์ไป จะเบนเข้าหรือออกขึ้นอยู่กับศักย์  $V_1$  และ  $V_2$

ค. แบบขั้วไฟฟ้าสมมาตร ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว เป็นขั้วทรงกระบอก 2 ขั้ว มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน และแบบไดอะแฟรม 1 ขั้ว อยู่ตรงกลางมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าสองขั้ว ด้านนอกมีลักษณะดังรูปที่ 2.9 (ก) และกราฟแสดงค่า  $V$ ,  $V'$  และ  $V''$  กับระยะทางตามแกน  $z$  เป็นดังรูปที่ 2.9 (ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.9 (ก) แสดงลักษณะของเลนส์แบบขั้วไฟฟ้าสมมาตร

(ข) กราฟแสดงลักษณะของค่า  $V, V'$  และ  $V''$  กับระยะทางตามแนว

แกน  $z$

ความยาวโฟกัสของเลนส์ระบบนี้สมการเป็น

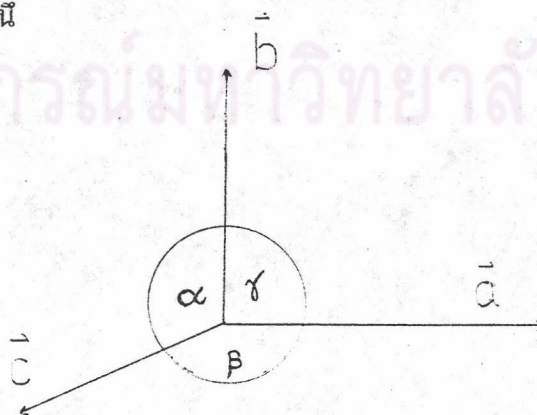
$$\frac{1}{f} = \frac{3}{8d} \left( \frac{V_2 - V_1}{V_1} \right)^2 \quad (2.20)$$

และลักษณะทางเดินขณะผ่านเข้าไปในเลนส์ เป็นไปตามกราฟรูปที่ 2.9 (ข)

## 2.4 โครงสร้างของผลึกสาร (8)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้น มารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนต่อเนื่องกันไป ภายในหนึ่งหน่วยของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียว ไปจนถึงหลายอะตอมหรือหลายๆโมเลกุล กลุ่มของอะตอมหรือโมเลกุลที่เล็กที่สุดในผลึกที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้น เรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกบริเวณช่องว่างที่มีขนาดเท่ากับหน่วยเซลล์นี้ว่าแลตทิซ(lattice)

ได้มีการจัดแบ่งรูปแบบแลตทิซขึ้นมา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 14 แบบ ซึ่งจัดเป็นกลุ่มได้ 7 กลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออโธโรมบิก(orthorhombic) เตตระโกนอล(tetragonal) คิวบิก(cubic) ไตรโกนอล(trigonal) และเฮกซะโกนอล(hexagonal) โดยการแบ่งชนิดของแลตทิซนี้ใช้เวกเตอร์แกนผลึก(crystal axis vector)  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  และ  $\vec{c}$  กับมุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์แกนผลึกเป็นตัวกำหนดลักษณะของแลตทิซแต่ละชนิด เวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างทิศของเวกเตอร์แกนผลึกมีลักษณะกำหนดดังรูปที่ 2.10 ลักษณะของแลตทิซแต่ละชนิดแสดงได้ด้วยตาราง 2.4 และรูปแบบของแลตทิซทั้ง 14 แบบแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.11 ดังนี้

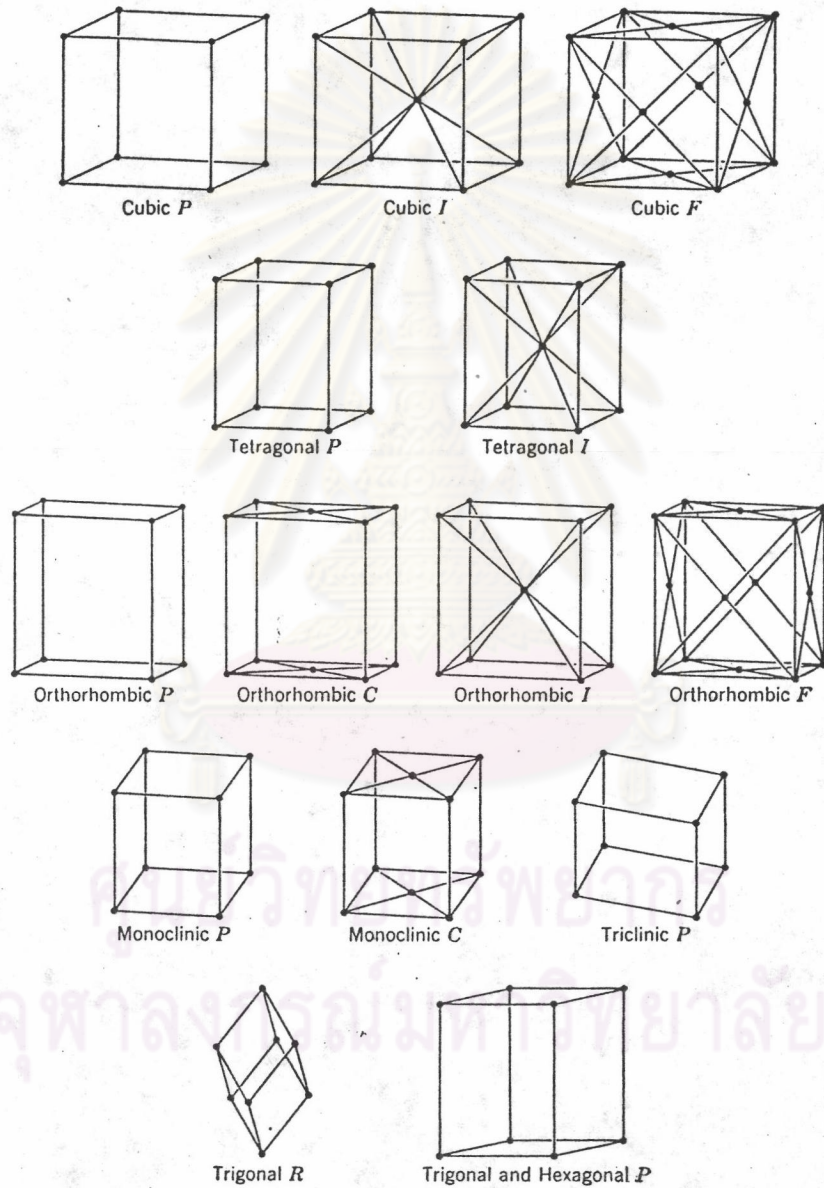


รูปที่ 2.10 แสดงเวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้ง 3



System	Number of Lattices in System	Lattice Symbols	Nature of Unit-Cell Axes and Angles	Lengths and Angles to Be Specified
Triclinic	1	<i>P</i>	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	$a, b, c$ $\alpha, \beta, \gamma$
Monoclinic	2	<i>P</i> <i>C</i>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$a, b, c$ $\beta$
Orthorhombic	4	<i>P</i> <i>C</i> <i>I</i> <i>F</i>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a, b, c$
Tetragonal	2	<i>P</i> <i>I</i>	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a, c$
Cubic	3	<i>P</i> <i>I</i> <i>F</i>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a$
Trigonal	1	<i>R</i>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma$ $< 120^\circ, \neq 90^\circ$	$a$ $\alpha$
Hexagonal	1	<i>P</i>	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	$a, c$

ตาราง 2.4 แสดงสมบัติเฉพาะของแลตทิซ 3 มิติ 14 แบบ



รูปที่ 2.11 แสดงรูปทรงเรขาคณิต 3 มิติของแลตทิซ 14 แบบ





ในการวิจัยครั้งนี้ใช้ทอง ซึ่งแลตทิซเป็นแบบคิวบิก ที่มีชื่อเรียกว่าเฟซ-เซนเตอร์  
คิวบิก ซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น fcc เป็นสารตัวอย่างในการทดลอง ลักษณะเฉพาะของแลตทิซ  
คิวบิกมีสมบัติ แสดงได้ดังตาราง 2.5 นี้

	Simple	Body-centered	Face-centered
Volume, conventional unit cell	$a^3$	$a^3$	$a^3$
Lattice points per cell	1	2	4
Volume, primitive cell	$a^3$	$\frac{1}{2}a^3$	$\frac{1}{4}a^3$
Lattice points per unit volume	$1/a^3$	$2/a^3$	$4/a^3$
Number of nearest neighbors <sup>o</sup>	6	8	12
Nearest-neighbor distance	$a$	$3^{1/2}a/2$	$a/2^{1/2}$
Number of second neighbors	12	6	6
Second neighbor distance	$2^{1/2}a$	$a$	$a$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

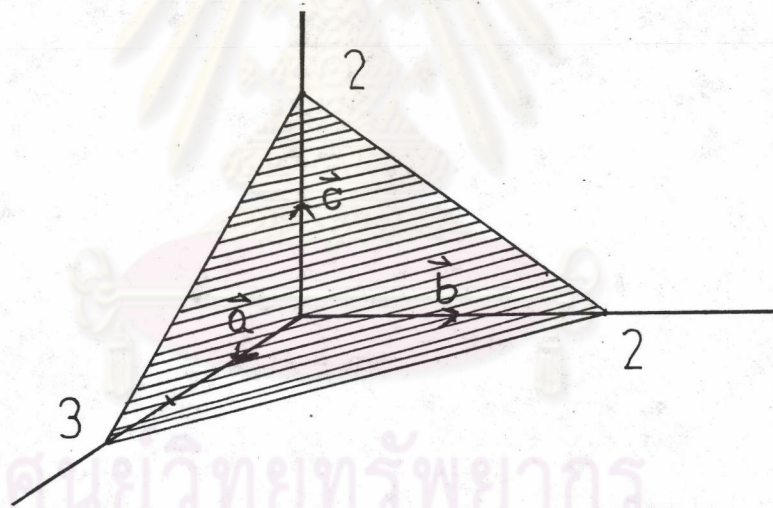
ตาราง 2.5 ลักษณะเฉพาะของแลตทิซแบบคิวบิก

2.5 ระบบการเรียกชื่อระนาบของผลึก (8)

การเรียกชื่อระนาบของผลึกทำได้โดยการใส่จุด 3 จุด บนระนาบที่ตัดแกน  
ของเวกเตอร์แกนผลึกทั้งสาม โดยขนาดของเวกเตอร์ที่จุดระนาบตัดจะบอกไว้ในหน่วย  
ของค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) หลักการเรียกระนาบของผลึกทำได้ดังนี้คือ

1. หาจุดตัดของระนาบที่ต้องการบนแกน  $a, b$  และ  $c$  ในหน่วยของค่าคงที่แลตทิส
2. กลับเศษเป็นส่วนของตัวเลขข้อ 1 แล้วทำให้เป็นจำนวนเต็มบวกหรือลบหรือศูนย์ ค่าน้อยที่สุด ด้วยอัตราส่วนเดียวกัน แล้วเขียนชื่อระนาบในวงเล็บด้วยสัญลักษณ์ที่เรียกว่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) คือ  $h, k$  และ  $l$  เป็นตัวเลขที่หาได้จากข้อ 2 นี้
3. ในกรณีที่จุดตัดแกนใดมีค่าเป็นลบ ให้เขียนเครื่องหมายลบไว้ข้างหน้าตัวเลขบนแกนนั้นด้วย เช่น  $(\bar{1}00)$ ,  $(\bar{1}11)$  เป็นต้น

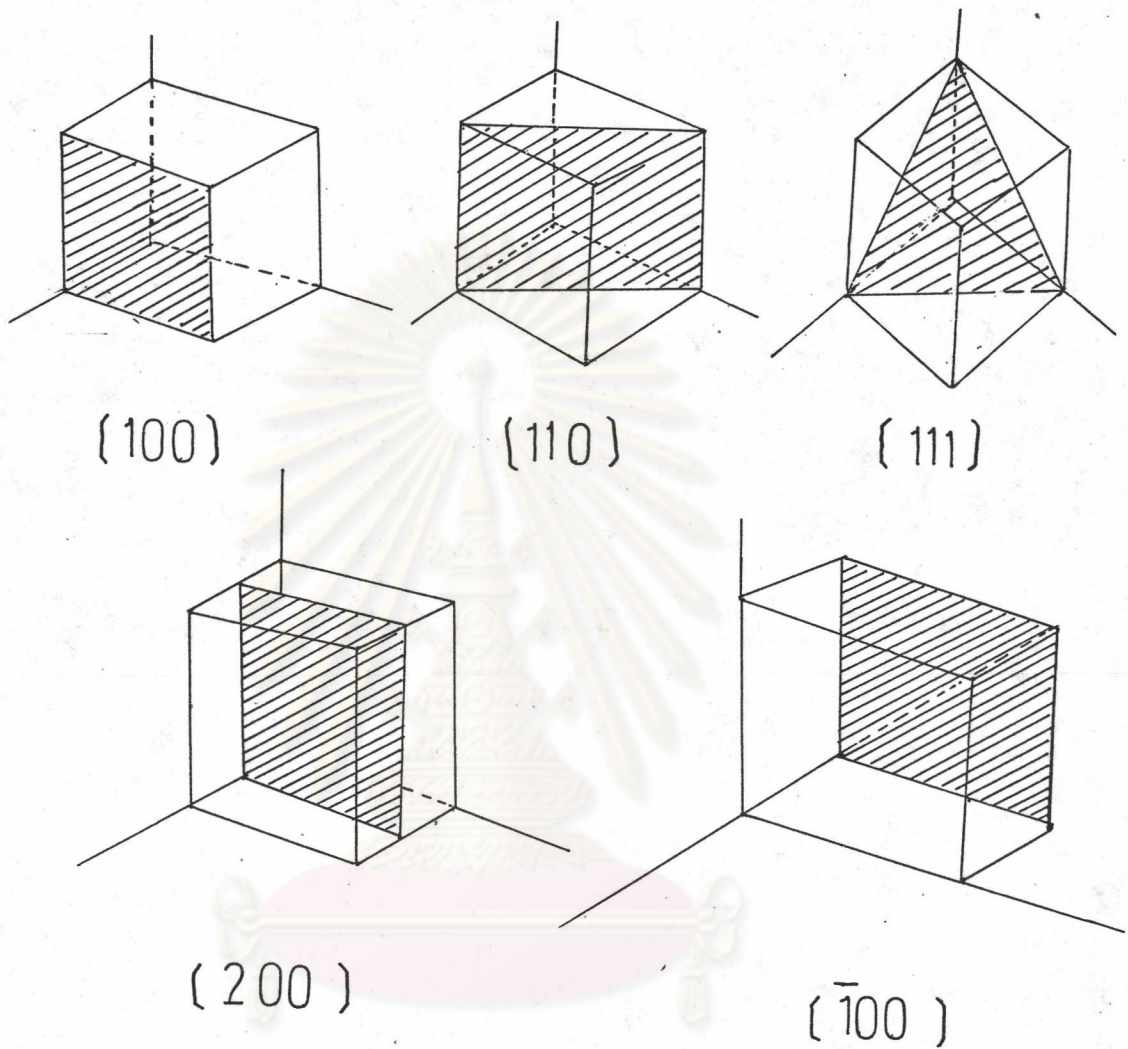
ตัวอย่างการหาจุดตัดแกนแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.12 และตัวอย่างบางระนาบของผลึกแสดงไว้ด้วยรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงจุดตัดของระนาบบนแกนทั้งสามของระนาบ (233)

จากรูปที่ 2.12 จุดตัดแกนทั้ง 3 คือ  $3a, 2b, 2c$  กลับเศษเป็นส่วนของจำนวนทั้งสาม คือ  $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$  ทำให้เป็นจำนวนเต็มค่าน้อยที่สุดด้วยอัตราส่วนเดียวกันได้เป็น  $2, 3, 3$  ดังนั้นชื่อของระนาบนี้เขียนได้เป็น (233)





รูปที่ 2.13 แสดงระนาบที่สำคัญบางระนาบของผลึกคิวบิก

## 2.6 การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนผ่านฟิล์มบาง

การเลี้ยวเบนเป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก โดยความยาวคลื่นที่ใช้ศึกษาการเลี้ยวเบนจากผลึกนั้น จะต้องมีค่าพอ ๆ กับระยะห่างของอะตอมภายในผลึก คือประมาณ 1 อังสตรอม คลื่นที่ใช้ในการศึกษาการเลี้ยวเบนมีอยู่ 3 ชนิด คือ รังสีเอกซ์ รังสีแคโทดหรืออิเล็กตรอนและนิวตรอน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนซึ่งเกี่ยวข้องกับทฤษฎีการวิจัยครั้งนี้เท่านั้น



### 2.6.1 ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน

ตามทฤษฎีทวิภาพของคลื่นและอนุภาคของ เดอ บรอยล์ ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน สามารถหาได้จาก

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์

$p$  คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอน

ในการที่อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV \quad (2.22)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

$e$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

$v$  คือ อัตราเร็วของอิเล็กตรอน

$V$  คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

จากสมการ (2.21) และ (2.22) สามารถเขียนความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนได้เป็น

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \quad (2.23)$$



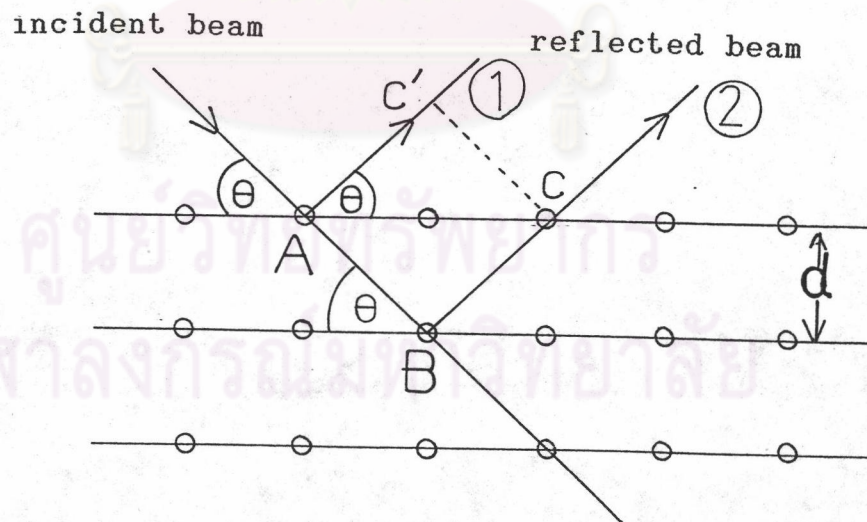
เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ แล้ว จะสามารถเขียนสมการ (2.23) ได้เป็น

$$\lambda = \sqrt{\frac{150.78}{V}} \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) จะเห็นได้ว่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในหลอดสุญญากาศเพียงอย่างเดียว

### 2.6.2 กฎของแบรกก์ (Bragg law)

เมื่อคลื่นที่มีความถี่เดียวกระทบผิวของผลึก จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้นเมื่อมุมตกกระทบ ความยาวคลื่น และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกมีค่าที่เหมาะสม เราอาจอธิบายการเลี้ยวเบนนี้ โดยอาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.14 ดังนี้ (8)



รูปที่ 2.14 แสดงการสะท้อนของคลื่นบนระนาบของอะตอมในผลึก

พิจารณารูป 2.14 จะเห็นว่าคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อทางเดินของคลื่นทั้งสองมีค่าต่างกันเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ให้  $\Delta$  เป็นทางเดินที่ต่างกันของคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า

$$\Delta = n\lambda, n = 1, 2, 3 \quad (2.25)$$

จากภาพ  $\Delta = AB + BC - AC' = 2AB - AC'$

$$AB = d / \sin \theta \quad (2.26)$$

และ  $AC' = AC \cos \theta = \left( \frac{2d}{\tan \theta} \right) \cos \theta$

แทนค่าสมการ (2.26) ลงในสมการ (2.25) จะได้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.27)$$

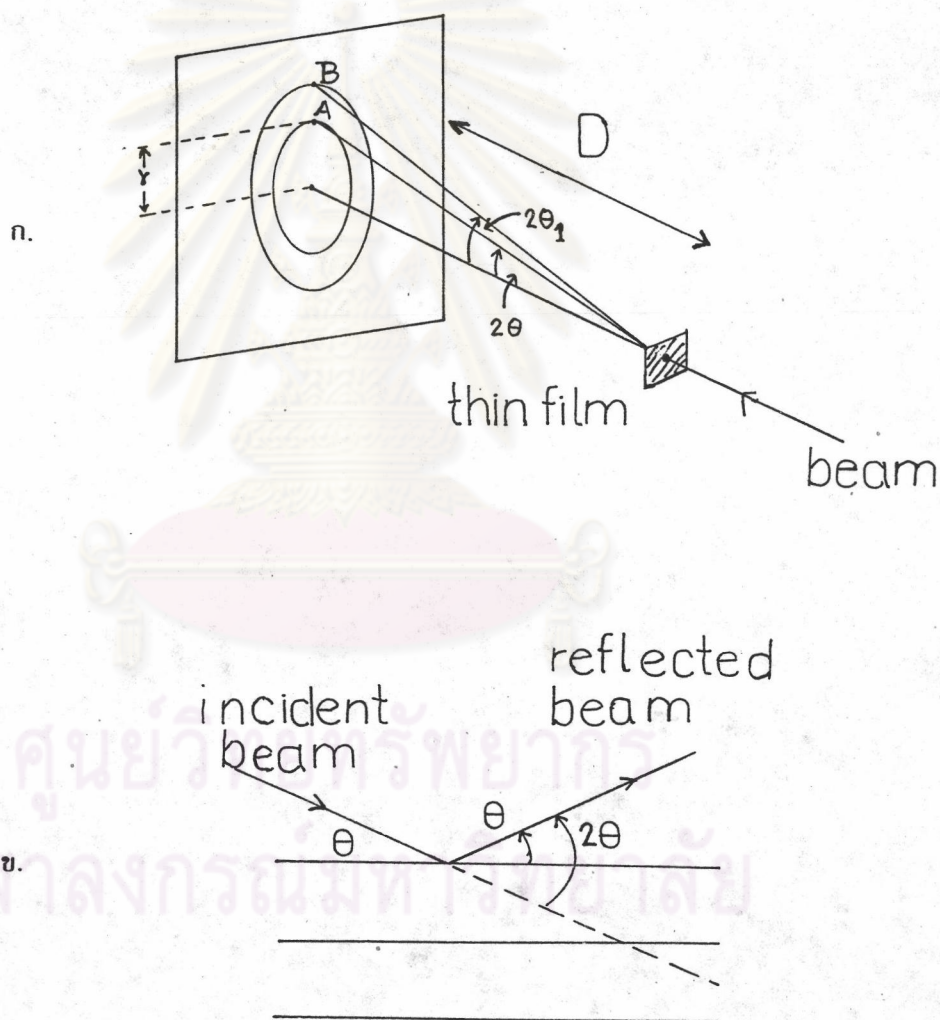
สมการ (2.27) นี้เรียกว่ากฎของแบร็ก เป็นสมการที่สามารถวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนผ่านฟิล์มบางได้

### 2.6.3 การหาความยาวคลื่นจากภาพการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนผ่านฟิล์มบาง(3)

ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้ฟิล์มบางของทองซึ่งมีโครงสร้างแลตทิซแบบเฟซ-เซนเตอร์ คิวบิก เป็นตัวอย่างในการทดลอง ซึ่งจะให้ภาพการเลี้ยวเบนเป็นรูปร่างกลมของแถบสว่างหลายวงซ้อนกันอยู่ โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน การวิเคราะห์ภาพการเลี้ยวเบนนี้



โดยใช้สมการของแบร็ก คือสมการ (2.27) จะสามารถหาความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นที่หาได้จากสมการ (2.24) การวิเคราะห์ภาพการเลี้ยวเบนสามารถทำได้โดยเริ่มการพิจารณาจากรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 (ก) แสดงภาพการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนผ่านฟิล์มบาง

(ข) แสดงมุมที่รังสีตกกระทบกระทำกับระนาบผลึก

จากรูปที่ 2.15 พิจารณาเฉพาะวงกลมรัศมี  $r = OA$   $D$  คือระยะห่างระหว่างฟิล์มบางและจอภาพ ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องมือ มุม  $2\theta$  คือมุมที่แนวรังสีเลี้ยวเบนกระทำกับแนวรังสีเดิม  $2\theta$  เกิดจากการที่แนวรังสีตกกระทบ และแนวรังสีสะท้อนทำมุมกับระนาบของแลตทิซเป็นมุม  $\theta$  ตามรูปที่ 2.15 (ข) มุม  $2\theta$  ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องมือ แต่สามารถหาได้ในรูปของ  $\tan 2\theta$  ตามสมการ

$$\tan 2\theta = \frac{r}{D} \quad (2.28)$$

กรณีที่มุม  $2\theta$  มีค่าน้อยสามารถประมาณได้ว่า  $\tan 2\theta \approx \sin 2\theta \approx 2\theta$  ทำให้สามารถหามุม  $\theta$  ออกได้ในรูป

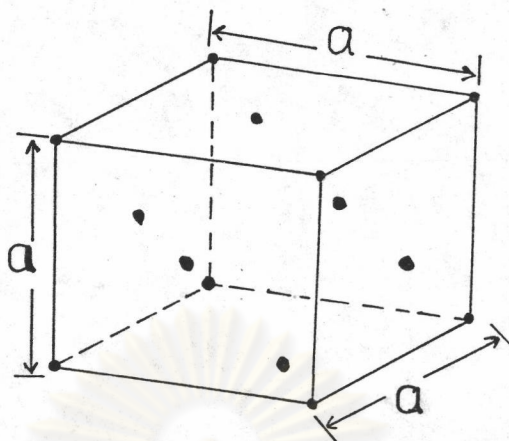
$$\theta \approx \frac{r}{2D} \quad (2.29)$$

จากสมการของแบร็ก  $2d \sin \theta = n\lambda$  ค่า  $d$  คือระยะห่างระหว่างระนาบของแลตทิซซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแลตทิซ และระนาบที่คลื่นตกกระทบและสะท้อนในกรณีแลตทิซเป็นแบบคิวบิก ค่า  $d$  ให้ได้ด้วยสมการ

$$d = \frac{a}{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2}} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $a$  คือความยาวหน่วยเซลล์ของแลตทิซ ซึ่งกรณีที่แลตทิซเป็นแบบคิวบิก ความยาวหน่วยเซลล์จะมีค่าเท่ากับ  $a$  ทั้งสามด้านตามเวกเตอร์แกนผลึก ดังรูปที่ 2.16 และ  $H$ ,  $K$  และ  $L$  คือดัชนีบอกระนาบใด ๆ ของมิลเลอร์





รูปที่ 2.16 แสดงค่า  $a$  ของแลตทิซแบบเฟส - เซนเตอร์ คิวบิก

จากสมการ (2.30) เมื่อคูณดัชนีของมิลเลอร์ด้วยลำดับของการสะท้อน  $n$  ใดๆ โดยที่  $n$  ใดๆ คือลำดับของการแทรกสอดตามสมการของแบร็ก เนื่องจากการสะท้อนบนระนาบ  $(hkl)$  ใดๆ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะเห็นเฉพาะลำดับแรกของการแทรกสอดเท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.30) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$d = \frac{na}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.31)$$

โดยที่  $nH = h$ ,  $nK = k$  และ  $nL = l$  เมื่อแทนสมการ (2.31) ลงในสมการของแบร็ก คือสมการ (2.27) เขียนใหม่ได้เป็น

$$d = \frac{2a \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.32)$$

กรณีที่มุม  $\theta$  มีค่าน้อย สามารถประมาณได้ว่า  $\sin \theta \approx \theta$  และสามารถแทนค่า  $\theta$  ด้วยสมการ (2.29) ดังนั้นสมการ (2.32) เขียนได้เป็น

$$\lambda = \frac{a}{D} \frac{1}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.33)$$

สมการ (2.33) นี้ เป็นสมการที่ใช้หาความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนบนจอภาพ ค่า  $a$  ในสมการ (2.33) นี้เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างของแลตทิซคิวบิก ค่า  $a$  ของธาตุและสารประกอบบางชนิดให้ได้ดังตาราง 2.6 คือ (8)

Crystal	$a$ (Å)	Crystal	$a$ (Å)
Al	4.03	KCl	6.29
Cu	3.61	PbS	5.92
Ni	3.52	AgBr	5.77
Au	4.08	MgO	4.20
LiH	4.08	MnO	4.43
NaCl	5.63	KBr	6.59

ตาราง 2.6 แสดงค่า  $a$  ของผลึกแบบคิวบิกของธาตุและสารประกอบบางชนิด

ในภาพการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนเนื่องจากแลตทิซแบบ เฟส-เซนเตอร์ คิวบิกนี้วงสว่างแต่ละวงที่เห็น เกิดจากระนาบต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับ แฟคเตอร์โครงสร้าง (structure factor) ของแลตทิซแต่ละชนิด สำหรับแลตทิซแบบ เฟส-เซนเตอร์ คิวบิก แฟคเตอร์โครงสร้างให้ได้ด้วยสมการ (2.34) (3)

$$S(hkl) = f[1 + e^{-i\pi(h+k)} + e^{-i\pi(k+l)} + e^{-i\pi(l+h)}] \quad (2.34)$$

เมื่อ  $S(hkl)$  คือแฟคเตอร์โครงสร้างเนื่องจากโครงสร้างของแลตทิซ และ  $f$  เป็นแฟคเตอร์เนื่องจากการจัดรูปของอะตอม (atomic form factor) ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมและการกระจายของอะตอมภายในหน่วยเซลล์



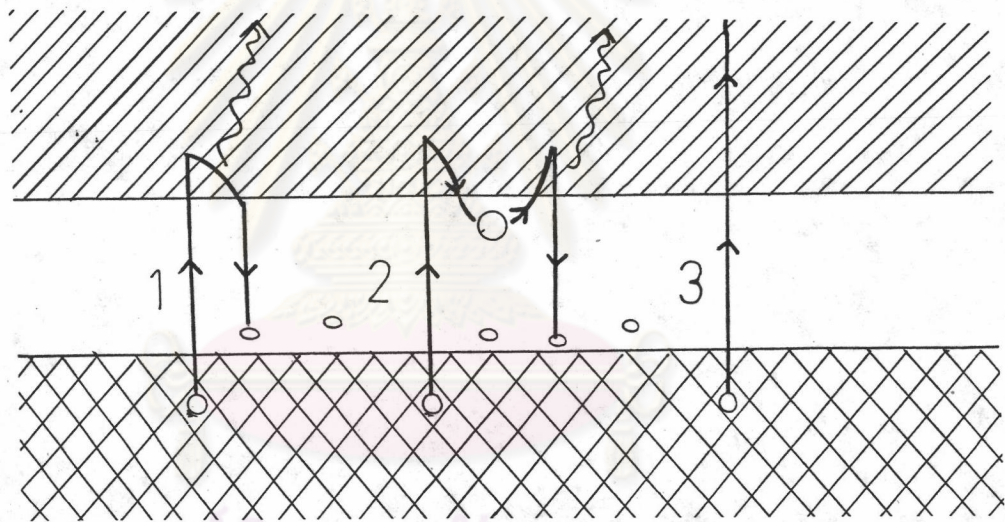
พิจารณาจากสมการ (2.34)  $S(hk1)$  จะมีค่าได้เมื่อดัชนีของมิลเลอร์ ( $hk1$ ) มีค่าเป็นเลขคู่และศูนย์พร้อมกัน หรือเมื่อเป็นเลขคี่พร้อมกันหมดเท่านั้น นอกจากนี้จะทำให้ค่า  $S(hk1)$  เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าคลื่นที่ตกกระทบบนระนาบนั้นจะไม่เกิดภาพการเลี้ยวเบนที่จอภาพ ด้วยการพิจารณาสมการ (2.34) ทำให้เราทราบว่าในแลตทิซแบบ เฟส-เซนเตอร์ คิวบิก นี้ระนาบที่ลาอูว์เอ็กละรอบตกกระทบแล้วทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่จอภาพได้แก่ ระนาบที่แสดงไว้บนระนาบดังตาราง(2.7) คือ (3)

$hk1$	$(h^2+k^2+l^2)$	$(h^2+k^2+l^2)^{0.5}$
111	3	1.732
200	4	2.000
220	8	2.828
311	11	3.316
222	12	3.464
400	16	4.000
331	19	4.358
420	20	4.472
422	24	4.898
511,333	27	5.196
440	32	5.656

ตาราง 2.7 แสดงระนาบที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของแลตทิซแบบเฟส-เซนเตอร์ คิวบิก

## 2.7 การเรืองแสงของจอภาพ

ภายในของจอภาพของหลอดรังสีแคโทด ส่วนมากจะฉาบไว้ด้วยสารเรืองแสง (phosphor) ซึ่งสารนี้จะมีสมบัติที่สามารถปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ในย่านที่มองเห็น ด้วยตาเปล่าออกมาเมื่อถูกชน (bombard) ด้วยรังสีแคโทด การเรืองแสงของสารเรืองแสงนี้ เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานสุดท้ายและแถบการนำ มีลักษณะดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสารเรืองแสง

การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสารเรืองแสงแบบที่ 1 คือ อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดถูกกระตุ้นขึ้นไปแถบการนำ และกลับมายู่ที่ตอนล่างของแถบต้องห้าม (forbidden band) เนื่องจากเกิดการไม่บริสุทธิ์ เพราะใส่สารเจือปนเข้าไปที่เรียกว่า สารมลทิน (impurity element) แบบที่ 2 คือ อิเล็กตรอนมีการชนกับอิเล็กตรอนของสารมลทิน แบบที่ 3 คือ อิเล็กตรอนจากแถบพลังงานสุดท้ายจะ



หลุดออกมาจากแถบการนำออกไปชนกับอิเล็คตรอนของอะตอมอื่น ซึ่งจะทำให้เกิด  
 อิเล็คตรอนทุติยภูมิ เปลี่ยนระดับพลังงานแทน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนระดับพลังงานของ  
 อิเล็คตรอนในสารเรืองแสง อาจเกิดแบบอื่นๆได้อีกในลักษณะที่ใกล้เคียง กับ 3 แบบที่  
 กล่าวถึง แต่ผลสุดท้ายคือ ในช่วงที่อิเล็คตรอนวิ่งกลับลงมาจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออก  
 มาในช่วงที่ตามองเห็น โดยเหตุนี้ความถี่ของแสงที่สารเรืองแสงปล่อยออกมาจึงมีค่าคงที่ไม่  
 ขึ้นกับสมบัติเฉพาะของอิเล็คตรอนที่เข้าชนในตอนแรก เช่นไม่ขึ้นกับความเร็วของ  
 อิเล็คตรอนเข้าชน เป็นต้น (7)

สารเรืองแสงมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะให้สีของแสงที่ออกมาเฉพาะตัวและ  
 มีสมบัติแตกต่างกันออกไป สมบัติบางประการของสารเรืองแสงต่างๆแสดงไว้ดังตาราง  
 2.8 (9)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

No.	Phosphor	Chemical composition	Color	Spectral maximum, angstrom units	Approx. candle power per watt
1	Zinc oxide.....	ZnO	Violet	Ultraviolet	<0.1
2	Zinc sulphide.....	ZnS:Ag	Blue-violet	4,700-4,500	5*
3	Calcium tungstate.....	CaWO <sub>4</sub>	Blue	4,300	<1
4	Zinc silicate.....	ZnO + SiO <sub>2</sub>	Blue	4,200	<1
5	Zinc sulphide.....	ZnS	Light blue	4,700	1-5*
6	Zinc aluminate.....	(ZnO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ):Mn	Green-blue	5,130	~1
7	Zinc silicate (willemitite).....	(ZnO + SiO <sub>2</sub> ):Mn	Blue-green	5,230	3*
8	Zinc sulphide.....	ZnS:Cu	Green	4,700-5,250	>4*
9	Zinc germanate.....	(ZnO + GeO <sub>2</sub> ):Mn	Yellow-green	5,370	1.5
10	Beta zinc silicate.....	(ZnO + SiO <sub>2</sub> ):Mn	Green-yellow	5,600-5,700	3*
11	Zinc beryllium silicate.....	(ZnO + BeO + SiO <sub>2</sub> ):Mn	Green to orange	5,230-6,500	1-2*
12	Zinc cadmium sulphide.....	(ZnS + CdS):Ag	Blue to red	4,700->7,000	5*
13	Calcium silicate.....	(CaO + SiO <sub>2</sub> ):Mn	Green to orange	5,500-6,500	<1
14	Cadmium silicate.....	(CdO + SiO <sub>2</sub> ):Mn	Orange yellow	5,850	~1
15	Magnesium silicate.....	(MgO + SiO <sub>2</sub> ):Mn	Orange-red	6,400-6,700	<1
16	Zinc aluminate.....	(ZnO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ):Cr	Red	>7,000	<1
17	Zinc beryllium zirconium silicate.....	[ZnO + BeO + (Ti - Zr - Th - O <sub>2</sub> ) + SiO <sub>2</sub> ]:Mn	White	4,200 + 5,500-6,000	~1*
18	Magnesium tungstate.....	MgO + WO <sub>3</sub>	Very light blue	4,800	<1
19	Zinc borate.....	(ZnO + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ):Mn	Yellow-orange	5,400-6,000	~1*
20	Cadmium borate.....	(CdO + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ):Mn	Green-orange	5,300-6,300	<1
21	Cadmium tungstate.....	CdO + WO <sub>3</sub>	Light blue	4,900	<1*

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 2.8 แสดงสมบัติที่สำคัญของสารเรืองแสงบางชนิด