

## เอกสารอ้างอิง

1. Loferski , J.J., J. Appl. Phys., 27, 777 , 1956.
2. Shay , J.L., and J.H. Wernick, Ternary Chalcopyrite Semiconductor , pp.1-78 , Pergamon Press , London , 1975.
3. Wasim , S.M., " Transport properties of  $\text{CuInSe}_2$  ," Solar Cells, 16, 289-316, 1986.
4. Von Bardeleben , H.J., " Selenium self-diffusion study in I-III-VI<sub>2</sub> semiconductor :  $\text{CuInSe}_2$  ," J. Appl. Phys., 56, 321-326, 1984.
5. Kazmerski ,L.L., " The utilization of I-III-VI<sub>2</sub> ternary compound semiconductor in thin film heterojunction and homojunction photovoltaic devices ," Ternary Compound , pp.217-228, The Institute of Physics Conference Series , No.35, Bristol, 1977.
6. Parkes,J., R.D.Tomlimson,and Hampshire,M.J., " The fabrication of p and n type single crystals of  $\text{CuInSe}_2$  ," J. Crystal Growth, 20, 315-318, 1973.
7. Hamakawa, Y., " Recent Advance in Solar Cell Technology, " paper presented at PVSEC-III , Tokyo, 1987.
8. Kittle, C., Introduction to Solid State Physics, pp.185-204, Wiley Eastern, New Delhi, 5th ed., 1985.
9. Kittle, C., Introduction to Solid State Physics, pp.205-236, Wiley Eastern, New Delhi, 5th ed., 1985.
10. Ashcroft, N.W.,and N.D. Mermin, Solid State Physics, pp.572-585, Holt-Saunders Japan Ltd., Tokyo, 1981.
11. Shay, J.L., and J.H. Wernick, Ternary Chalcopyrite Semiconductor, pp.1-2 , Pergamon Press , London , 1975.

12. Fearheiley, M.L., "The phase relation in the Cu,In,Se system and the growth of  $\text{CuInSe}_2$  single crystals," Solar Cells, 16, 91-100, 1986.
13. Becker, K.D., and S. Wagner, " Temperature-dependent nuclear magnetic resonance in  $\text{CuInX}_2$  ( X=S,Se,Te ) chalcopyrite-structure compounds," Phy.Rev.B, 27(9), 1983.
14. Tomlinson, R.D., " Fabrication of  $\text{CuInSe}_2$  single crystals using melt-growth techniques, " Solar Cells, 16, 17-26, 1986.
15. Shih, I., C.H. Champness, and A. Vahidshahidi, " Growth by directional freezing of  $\text{CuInSe}_2$  and diffused homojunctions in bulk material, " Solar Cells, 16, 27-41, 1986.
16. Haupt,H., and K.Hess, " Growth of large  $\text{CuInSe}_2$  single crystals," Ternary Compound, pp.5-12, The Institute of Physics Conferences Series, No.35, Bristol, 1977.
17. Tell, B., J.L. Shay, and H.M. Kasper, " Room temperature Electrical Properties of Ten I-III-VI<sub>2</sub> Semiconductors," J. Appl. Phys., 43, 2496, 1972.
18. Endo, S., T. Irie, and H. Nakanishi, " Preparation and some properties of  $\text{CuInSe}_2$  single crystals, " Solar Cells, 16, 1-15, 1986.
19. Datta, T., R. Noufi, and K. Dbe , " Electrical conductivity of p-type  $\text{CuInSe}_2$  thin films, " Appl.Phys. Lett., 47(10), 1102-1104, 1985.
20. Groenink, J.A., and P.H. Janse , Z. Phys. Chem. 110, 17, 1978.
21. Rincon, C., C. Bellabarba, J. Gonzalez, and G. Sanchezperez, " Optical properties and characterization of  $\text{CuInSe}_2$  ," Solar Cells, 16, 335-349, 1986.

22. Qiu, C.X., and I. Shih, " Effect of Heat Treatment on Electrodeposited  $\text{CuInSe}_2$  Films, " Solar Energy Materials , 15, 291-223, 1987.
23. รุฒินัย แก้วแดง " การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (  $\text{CuInSe}_2$  ) " วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530.
24. Tomlinson, R.D., E. Elliott, J. Parkes, and M.J. Hampshire, " Homojunction fabrication in  $\text{CuInSe}_2$  by copper diffusion, " Appl. Phys. Lett., 26(7), 383, 1975.
25. Yu, P.W., S.P. Faile, and Y.S. Park, " Cadmium-diffused  $\text{CuInSe}_2$  junction diode and photovoltaic detection, " Appl. Phys. Lett., 26(7), 384-385, 1975.
26. Yu, P.W., Y.S. Park, and J.I. Grant, " Electroluminescence in Br, Cl, and Zn-inplanted  $\text{CuInSe}_2$  p-n junction diodes, " Appl. Phys. Lett., 28(4), 214-216, 1976.
27. Yu, P.W., Y.S. Park, S.P. Faile, and J.E. Ehret, " Electroluminescence and photovoltaic detection in Cd-implanted  $\text{CuInSe}_2$  p-n junction diodes, " Appl. Phys. Lett., 26(12), 717-719, 1975.
28. Tell, B., S. Wagner, P.M. Bridenbaugh, " Motion of p-n junctions in  $\text{CuInSe}_2$  , " Appl. Phys. Lett., 28(8), 454-455, 1976.
29. Smith, R.C., " Device Applications of The Ternary Semiconducting Compounds, " J. Phys. (Paris), 36, C3-89 - C3-99, 1975.
30. Gonzalez, J., C. Rincon, A. Redondo, and P. Negrete, " Photodetecting Properties of  $\text{CuInSe}_2$  Homojunctions, " Jan. Jour. Appl. Phys., 19, Supplement 19-3, 29-32, 1980.



31. Smith, R.A., Semiconductors, pp. 77-96, Cambridge University Press, London, 2nd ed., 1978.
32. Shockley, W., Electrons and Holes in Semiconductors, pp.65-75, D. Van Nostrand Company Ltd., New York, 1956.
33. Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, pp.7-60, John Wiley & Sons, New York, 2nd ed., 1981.
34. Jain, G.C. and W.B. Berry, Transport Properties of Solids and Solid State Energy Conversion, pp.11-29, Tata McGraw-Hill, Bombay, 1972.
35. Wert, C.A., and R.M. Thomlinson, Physics of Solids, pp.278-307, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 2nd ed., 1970.
36. Runyan, W.R., Semiconductor Measurements and Instrumentation, pp.74-75, McGraw-Hill, New York, 1975.
37. van der Pauw, L.J., " A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, " Philips Res. Repts., 13, 1-9, 1958.
38. van der Pauw, L.J., " A method of measuring the resistivity and Hall effect of lamellae of arbitrary shape, " Philips technical review, 20(8), 220-224, 1958.
39. Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, pp.63-94, John Wiley & Sons, New York, 2nd ed., 1981.
40. Smith, R.A., Semiconductors, pp.171-215, Cambridge University Press, London, 2nd ed., 1978.
41. Jain, G.C. and W.B. Berry, Transport Properties of Solids and Solid State Energy Conversion, pp.161-196, Tata McGraw-Hill, Bombay, 1972.

42. Shockley, W., Electrons and Holes in Semiconductors, pp. 295-317, D. Van Nostrand Company Ltd., New York, 1956.
43. ธรรมศักดิ์ สิงคเสลิต " ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกและช่องว่างแถบพลังงานของโลหะผสม กึ่งตัวนำ  $AgGa_y In_{(1-y)} Te_{2(1-z)} Se_{2z}$  เมื่อ  $y = 0.2$  " วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2526.
44. Azaroff, L.A., Elements of x-ray crystallography, pp. 390-415, McGraw-Hill, New York, 1986.
45. Wagner, S., J. L. Shay, and H. M. Kasper, J. Phys. (Paris), 36, C3-C101, 1975.
46. Azaroff, L.A., Elements of x-ray crystallography, pp. 135-154, McGraw-Hill, New York, 1986.
47. Runyan, W.R., Semiconductor Measurements and Instrumentation, pp. 7-8, McGraw-Hill, New York, 1975.

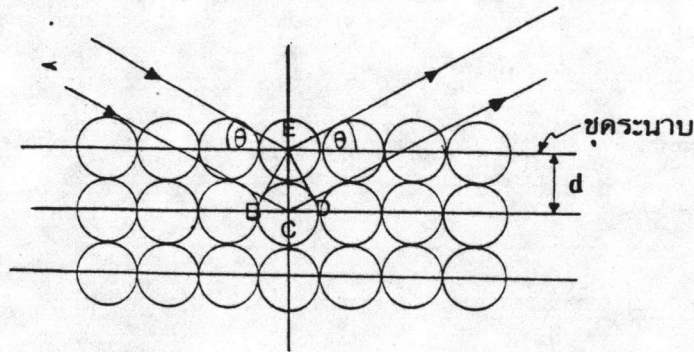
## ภาคผนวก ก

## การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของผลึก

## กฎของแบรกก์ (Bragg law)

การเลี้ยวเบนและแทรกสอดของรังสีเอกซ์จากผลึกสามารถอธิบายโดยอาศัยสมบัติการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในลักษณะที่เป็นคาบของอะตอมของผลึก การเรียงตัวในลักษณะนี้จะปรากฏเป็นระนาบชุดต่าง ๆ ขึ้น ถ้ากำหนดให้ระนาบแต่ละชุดมีระยะห่างระหว่างระนาบเป็น  $d$  เมื่อให้รังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบเหล่านี้ รังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนมาแทรกสอดซึ่งกันและกัน เงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกันเพื่อให้ได้ความเข้มที่มีค่าสูงที่สุด เกิดได้นั้นแบรกก์กำหนดเงื่อนไขไว้ดังนี้

1. มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบบนผลึกต้อง เท่ากับมุมที่สะท้อนออกจากระนาบผลึก
2. รังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากชุดระนาบต่าง ๆ ที่ขนานกันนั้นจะต้องมีเฟส (phase) ของคลื่นรังสีตรงกัน



รูปที่ 1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

พิจารณารูปที่ 1 จากรูป  $\theta$  คือมุมที่รังสีเอกซ์ทำกับผิวระนาบที่สะท้อนซึ่งเรียกว่ามุมของแบรกก์ (Bragg angle) ความแตกต่างของทางเดิน (path difference) ของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนมาจากระนาบสองระนาบมีค่าเท่ากับ  $BC+CD$  จากเงื่อนไขข้อที่ 2 ของแบรกก์ทำให้ได้ความสัมพันธ์ คือ

$$BC+CD = n\lambda \quad (1)$$

โดยที่  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $n$  = เลขจำนวนเต็มใด ๆ มีค่า  $1, 2, 3, \dots$



จากรูป  $\triangle EBC$  และ  $\triangle ECD$  จะได้ความสัมพันธ์

$$BC+CD = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2)$$

จากสมการ(1) และ (2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างระนาบ ( $d_{hkl}$ ) มุมของแบรกก์ ( $\theta$ ) และความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ดังนี้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3)$$

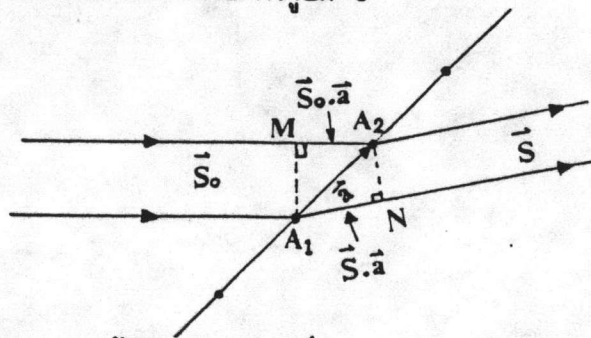
### เงื่อนไขของเลออี [44]

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผลึกซึ่งประกอบด้วยอะตอมต่างๆ เรียงกันเป็นสามมิติ ในการคิดเพื่อความสะดวกจะคิดว่าอะตอมเรียงกันอยู่ใน 1 มิติก่อนแล้วจึงขยายไปเป็น 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับ ถ้ามีอะตอมเรียงกันเป็นแนวแลตทิซใน 1 มิติ โดยมีระยะห่างกันเป็น  $a$  ดังรูปที่ 2 โดยให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  ตกกระทบบนแลตทิซ  $S_0$  กับ  $S_1$  เป็นเวกเตอร์ที่มีขนาด 1 หน่วยของรังสีตกกระทบบนและรังสีเลี้ยวเบนตามลำดับ ถ้าคลื่นของรังสีเอ็กซ์ทั้งสองมีความแตกต่างของทางเดินเท่ากับ  $m\lambda$  หรือ  $a \cdot (S_1 - S_0)$  มีค่าเป็น  $h$  เท่าของความยาวคลื่นจะทำให้รังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา มีเฟสตรงกันซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ดังนั้น

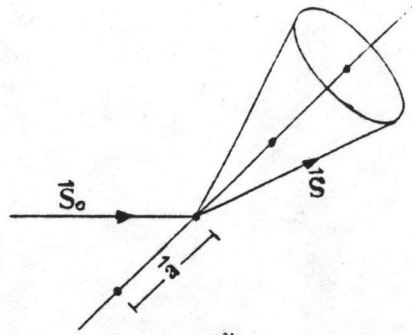
$$a \cdot (S_1 - S_0) = h\lambda \quad (4)$$

เมื่อ  $h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

สมการที่ (4) นี้แสดงเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามความคิดของเลออี ใน 1 มิติ จึงเรียกว่าเงื่อนไขของเลออีใน 1 มิติ ซึ่งจากสมการที่ (4) นี้มุมที่แนวรังสีเลี้ยวเบนทำกับแนวแลตทิซจะพบว่ามีโอกาสเป็นไปได้โดยรอบแนวแลตทิซ ดังนั้นมุมจึงเป็นक्रमของกรวยการสะท้อนของเลออี ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 แสดงทิศทางการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านจุดแลตทิซ  $A_1$  และ  $A_2$



รูปที่ 3 แสดงกรวยของการเลี้ยวเบนใน 1 มิติ

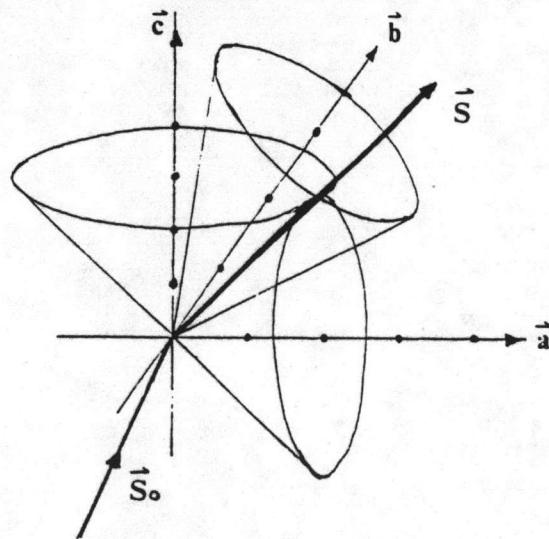
ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีอะตอมเรียงกันในระนาบแลตทิซโดยที่อะตอมแต่ละอะตอมในแต่ละแนวห่างกันเป็นระยะ  $a$  และ  $b$  ดังนั้นเงื่อนไขของเลี้ยวเบนต้องมี 2 เงื่อนไข คือ

$$\begin{aligned} \text{a. } (\vec{S} - \vec{S}_0) &= h\lambda \\ \text{b. } (\vec{S} - \vec{S}_0) &= k\lambda \end{aligned} \tag{5}$$

ถ้ามีอะตอมเรียงกันในโครงแลตทิซ โดยที่อะตอมแต่ละอะตอมในแต่ละแนวห่างกันเป็นระยะ  $a, b$  และ  $c$  ดังนั้น เงื่อนไขของเลี้ยวเบนต้องมี 3 เงื่อนไขคือ

$$\begin{aligned} \text{a. } (\vec{S} - \vec{S}_0) &= h\lambda \\ \text{b. } (\vec{S} - \vec{S}_0) &= k\lambda \\ \text{c. } (\vec{S} - \vec{S}_0) &= l\lambda \end{aligned} \tag{6}$$

สมการที่ (6) แสดงว่า เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกโดยเลี้ยวเบนในทิศทางที่ทำให้สมการที่ (6) นี้เป็นจริงแล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ตามเงื่อนไขเลี้ยวเบนใน 3 มิติ



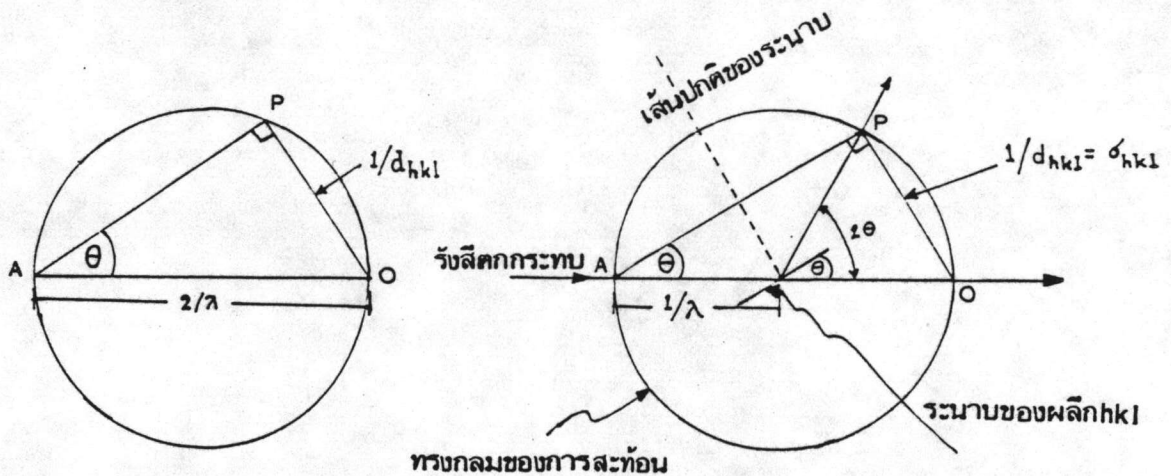
ความสัมพันธ์ระหว่าง เจริญ โยของ เลาอ์กับกฎของแบรกก์

จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda/2}{d_{hkl}} = \frac{1/d_{hkl}}{2/\lambda} = \frac{\sigma_{hkl}}{2/\lambda} \quad (7)$$

ซึ่งสมการนี้เมื่อนำมาเขียนรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก พบว่าสามเหลี่ยมนี้อยู่ในครึ่งวงกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลางยาว  $2/\lambda$  เป็นด้านตรงข้ามมุมฉากดังรูปที่ 5 (ก) และ (ข) ในกรณี 3 มิติ วงกลมจะเป็นทรงกลมเรียกว่าทรงกลมของการสะท้อน (sphere of reflection)



รูปที่ 5 แสดงทิศทางรังสีตกกระทบและสะท้อนตามกฎของแบรกก์

จากรูปที่ 5(ข) ถ้าวางผลึกไว้ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม ดังนั้นรังสีเอ็กซ์ตกกระทบทำมุม  $\theta$  กับระนาบของผลึกแล้วเกิดรังสีเลี้ยวเบนไปตัดเส้นรอบวงที่จุด P ซึ่งอยู่ห่างจากจุด O เป็นระยะ  $\sigma_{hkl}$  ดังนั้นจุด O จึงเป็นจุดเริ่มต้นของแลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice) และจุด P เป็นแลตทิซส่วนกลับของระนาบ hkl ถ้าหมุนผลึกก็ทำให้รังสีเอ็กซ์ทำมุมต่างๆ กับระนาบของผลึกและเกิดการเลี้ยวเบนไปตัดผิวของทรงกลมการสะท้อน

ในเงื่อนไขของเลออี เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนผลึกที่มีจุดแลตทิซ 2 จุด มีระยะห่างกันเป็น  $\vec{R}$  ในแลตทิซส่วนกลับ โดยที่

$$\vec{R} = p\vec{a}^* + q\vec{b}^* + r\vec{c}^* \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแลตทิซส่วนกลับกับแลตทิซปกติพบว่า ทิศทางของ  $\vec{a}^*$ ,  $\vec{b}^*$  และ  $\vec{c}^*$  ตั้งฉากกับระนาบของ  $bc$ ,  $ac$  และ  $ab$  ตามลำดับและ

$$\vec{a} \cdot \vec{a}^* = \vec{b} \cdot \vec{b}^* = \vec{c} \cdot \vec{c}^* = 1 \quad (9)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{R} &= p \\ \vec{b} \cdot \vec{R} &= q \\ \vec{c} \cdot \vec{R} &= r \end{aligned} \quad (10)$$

ถ้าคิดว่า  $\vec{R}$  เป็นค่าผลต่างระหว่างเวกเตอร์ที่มีขนาด 1 หน่วย  $\vec{S}$  และ  $\vec{S}_0$  คูณด้วย  $1/\lambda$  ดังรูปที่ 6 แทนค่า  $\vec{R}$  ลงในสมการที่ (10) ก็จะได้เงื่อนไขของเลออี 3 เงื่อนไขดังนี้

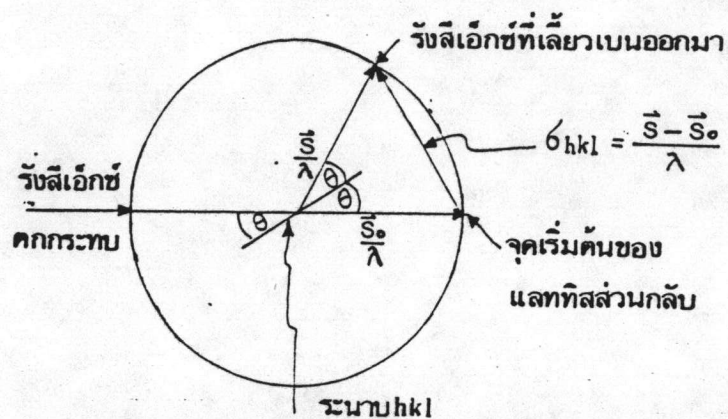
$$\begin{aligned} p &= \vec{a} \cdot \left( \frac{\vec{S} - \vec{S}_0}{\lambda} \right) = h \\ q &= \vec{b} \cdot \left( \frac{\vec{S} - \vec{S}_0}{\lambda} \right) = k \\ r &= \vec{c} \cdot \left( \frac{\vec{S} - \vec{S}_0}{\lambda} \right) = l \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ  $h, k, l$  จากเงื่อนไขของเลออีต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม เพราะฉะนั้นได้ความจริงว่า

$$\frac{\vec{S} - \vec{S}_0}{\lambda} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^* = \vec{G}_{hkl} \quad (12)$$

จะเห็นว่า ความจริงกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์นั้นมีความหมายเหมือนกับเงื่อนไขของเลออี เพราะว่าถ้าพิจารณาจากความจริงที่ว่า

$$\frac{1}{\lambda} |\vec{S} - \vec{S}_0| = |\vec{G}_{hkl}| \quad (13)$$



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขของเลี้ยวเบนของเลี้ยวเบนกับแลตทิซส่วนกลับ

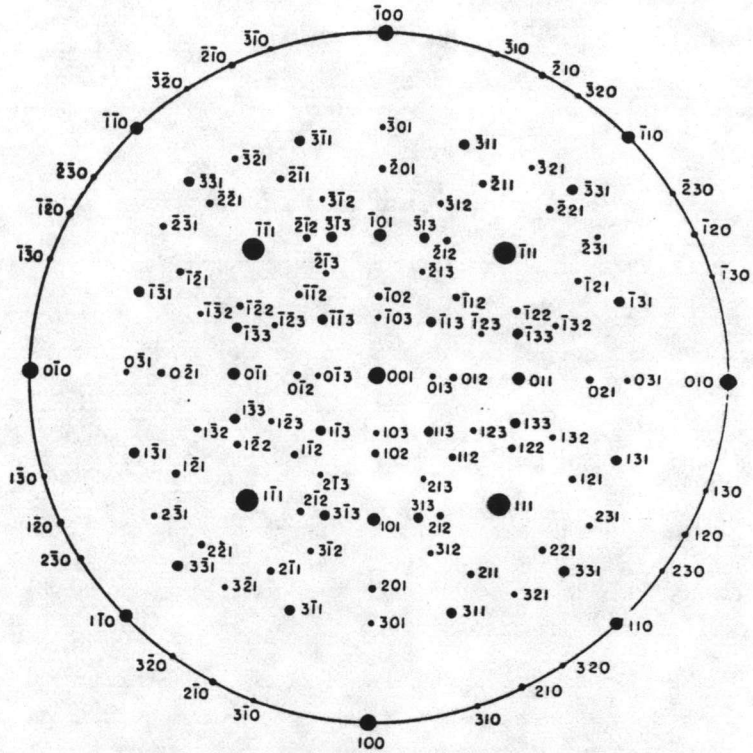
จากรูปที่ 6 จะพบว่า

$$|\vec{S} - \vec{S}_0| = 2 \sin \theta \quad (14)$$

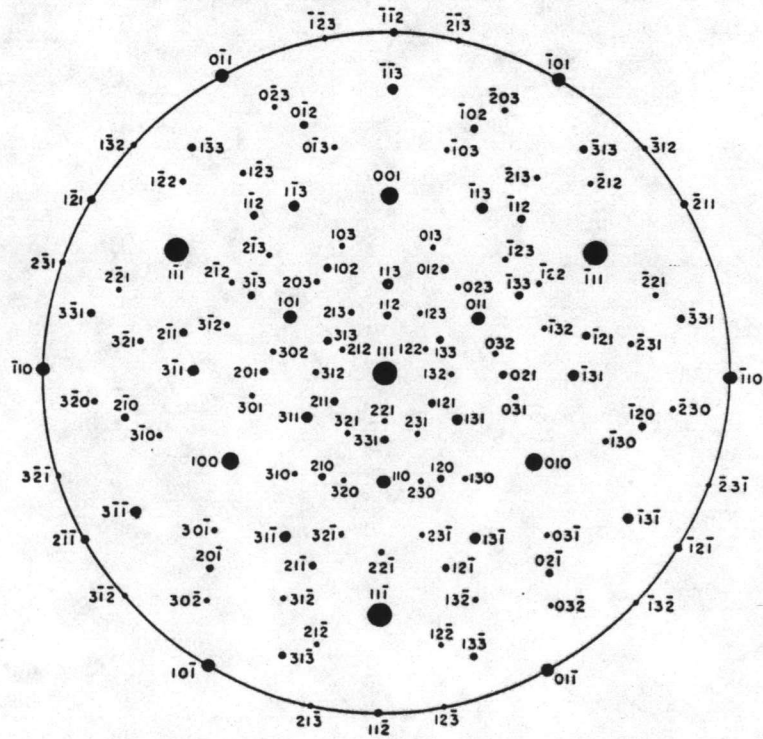
แทนค่า  $|\vec{S} - \vec{S}_0| = 2 \sin \theta$  และ  $|\vec{\sigma}_{hkl}| = \frac{1}{d_{hkl}}$  ลงในสมการที่ (13) ก็จะได้กฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์นั่นเอง



ภาคผนวก ข



Standard (001) projection for a face-centered cubic crystal.



Standard (111) projection for a face-centered cubic crystal.



ประวัติเขียน

นางสาว กัลยา เอี้ยประเสริฐศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ.  
2502 ที่จังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษาปริญญาศึกษาศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตประสานมิตร เมื่อ พ.ศ. 2524 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อใน  
ระดับปริญญาโทที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย