

รายการอ้างอิง

1. Rockett, A. and Birkmire, R.W. CuInSe_2 for photovoltaic applications. *J. Appl. Phys.* 70 (October 1991): R81-R97.
2. Stolt, L. and Hedstrom, J. ZnO/CdS/CuInSe_2 thin-film solar cells with improved performance. *Appl. Phys. Lett.* 62 (February 1993): 597-602.
3. Albin, D., and others. Fundamental thermodynamics and experiments in fabricating high efficiency CuInSe_2 solar cells by selenization without the use of H_2Se . In Noufi, R. (ed.), *AIP Conference Proceedings 268: Photovoltaic Advanced Research & Development Project*, pp. 108-121. New York : American Institute of Physics, 1992.
4. Bunshah, R.F., and others. *Deposition technologies for films and coatings: Development and applications*. New Jersey: Noyes Publications, 1982.
5. Vossen, J.L. and Kern, W. *Thin film processes II*. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
6. Chapman, B. *Glow discharge processes : Sputtering and plasma etching*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
7. Granqvist, C.G. and Niklasson, G.A. *Thin film technology*, pp. 48. Gothenburg : Physics Department Chalmers University of Technology, n. d.
8. Granqvist, C.G. and Niklasson, G.A. *Thin film technology*, pp. 45. Gothenburg : Physics Department Chalmers University of Technology, n. d.
9. Vossen, J.L. and Kern, W. *Thin film processes II*, pp. 20. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
10. Wasa, K. Sputtering techniques and applications. In Chopra, K.L. and Malhotra, L.K.(ed.), *Thin Film Technology and Applications Proceedings of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications November 19-30 New Delhi, India.*, pp. 36. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1984.

11. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 80. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
12. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 13-44. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
13. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 82-93. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
14. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 81-82. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
15. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 124-125. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1980.
16. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 115-123. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
17. Ohring, M. **The materials science of thin films**, pp. 53. San Diego: Academic Press Inc., 1992.
18. Ohring, M. **The materials science of thin films**, pp. 51. San Diego: Academic Press Inc., 1992.
19. Ohring, M. **The materials science of thin films**, pp. 106. San Diego: Academic Press Inc., 1992.
20. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 51. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
21. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 55. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
22. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 56. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
23. Bunshah, R.F., and others. **Deposition technologies for films and coatings: Development and applications**, pp. 32. New Jersey: Noyes Publications, 1982.
24. Maniv, S. and Westwood, W.D. Calculation of the current-voltage-pressure characteristics of dc diode sputtering discharges. **J. Appl. Phys.** 53 (February 1982): 356-860.

25. Hagstrom, H.D., *Phys. Rev.* 104 (1956): 672.
26. Riviere, J.C. Auger Spectroscopy. In Mulvey, T., and Webster, R.K. (ed.), **Modern Physical Techniques in Materials Technology**, pp. 187-192. London : William Clowes & Sons, 1974.
27. Davis, W.D., and Vanderslice, T.A., Ion Energy at the Cathode of a Glow discharge. *Phys. Rev.* 131 (July 1963): 219-228.
28. Ohring, M. **The materials science of thin films**, pp. 123-125. San Diego: Academic Press Inc., 1992.
29. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 263. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
30. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching** pp. 263-179. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
31. Bunshah, R.F., and others. **Deposition technologies for films and coatings: Development and applications**, pp. 180. New Jersey: Noyes Publications, 1982.
32. Ohring, M. **The materials science of thin films**, pp. 112-113. San Diego: Academic Press, Inc., 1992.
33. Wasa, K. Sputtering techniques and applications. In Chopra K.L. and Malhotra L.K. (ed.), **Thin Film Technology and Applications Proceedings of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications November 19-30 New Delhi, India.**, pp. 31. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1984.
34. Wasa, K. Sputtering techniques and applications. In Chopra K.L. and Malhotra L.K. (ed.), **Thin Film Technology and Applications Proceedings of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications November 19-30 New Delhi, India.**, pp. 32. New Delhi : McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1984.

35. Wasa, K. Sputtering techniques and applications. In Chopra K.L. and Malhotra L.K. (ed.), **Thin Film Technology and Applications Proceedings of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications November 19-30 New Delhi, India.**, pp. 30. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1984.
36. Chapman, B. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**, pp. 185. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1980.
37. Vossen, J.L. and Kern, W. **Thin film processes II**, pp. 179. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
38. Turner, G.M., Falconer, I.S., James, B.W., and McKenzie, D.R. Monte Carlo calculation of the thermalization of atoms sputtered from the cathode of a sputtering discharge. **J. Appl. Phys.** 65 (May 1989): 3671-3679.
39. Wasa, K. Sputtering techniques and applications. In Chopra K.L. and Malhotra L.K. (ed.), **Thin Film Technology and Applications Proceedings of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications November 19-30 New Delhi, India.**, pp. 42. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1984.
40. Vossen, J.L. and Kern, W. **Thin film processes II**, pp. 180. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
41. Bunshah, R.F., and others. **Deposition technologies for films and coatings: Development and applications**, pp. 213-217. New Jersey: Noyes Publications, 1982.
42. Wasa, K. Sputtering techniques and applications. In Chopra K.L. and Malhotra L.K. (ed.), **Thin Film Technology and Applications Proceedings of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications November 19-30 New Delhi, India.**, pp. 40-41. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1984.
43. Swann, S. Spatial distribution of sputtered atoms from magnetron source. **J. Vac. Sci. Technol.** A 5 (July/August 1987): 1750-1754.

44. Swann, S. Film thickness distribution in magnetron sputtering. *Vacuum*. 38 (1988): 791-794.
45. Swann, S., Collett, S.A., and Scarlett, I.R. Film thickness distribution control with off-axis circular magnetron sources onto rotating substrate holders: Comparison of computer simulation with practical results. *J. Vac. Sci. Technol. A* 8 (May/June 1990): 1299-1303.
46. Vossen, J.L. and Kern, W. *Thin film processes II*, pp. 51. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
47. Bunshah, R.F., and others. *Deposition technologies for films and coatings: Development and applications*, pp. 194. New Jersey: Noyes Publications, 1982.
48. Westwood, W.D. and Maniv, S. The current-voltage characteristic of magnetron sputtering systems. *J. Appl. Phys.* 54 (December 1983): 6841-6846.
49. สุชาติ สุภาพ. ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยเทคนิคสปัตเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
50. T. Burinprakhon, S. Chatraphorn, and K. Yoodee. Technical Report on a DC Magnetron Sputtering System. *J. Sci. Res. Chula, Univ.* 17 (1992): 131-139.
51. สมพงษ์ ชัดราภรณ์, ขจรยศ อยู่ดี และ ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน. การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง. *วารสารโลหะ วัสดุ และแร่*. 4 (มิถุนายน 2537): 43-54.
52. ธนา สุทธิโอภาส. การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของการดูดกลืนแสงพื้นฐานของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ และส่วนหางของเออบาค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
53. รัฐินัย แก้วแดง. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInSe₂). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
54. Cullity, B.D. *Elements of x-ray diffraction*. 3rd ed. Reading: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1967.

55. Booker, G. R. Scanning Electron Microscopy. In Mulvey, T., and Webster, R.K. (ed.), **Modern Physical Techniques in Materials Technology**, pp. 148-171. London: William Clowes & Sons, 1974.
56. Poole, D., M. Electron-Probe Microscopy. In Mulvey, T., and Webster, R.K. (ed.), **Modern Physical Techniques in Materials Technology**, pp. 172-186. London: William Clowes & Sons, 1974.
57. Ohring, M. **The materials science of thin films**, pp. 253-255. San Diego: Academic Press, Inc., 1992.
58. Granqvist, C.G. and Niklasson, G.A. **Thin film technology**, pp. 121-122. Gothenburg : Physics Department Chalmers University of Technology, n. d.
59. Pearson, W.B. **A Handbook of Lattice Spacings and Structure of Metal and Alloy**, pp. 581. Belfast: The university press, 1964.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

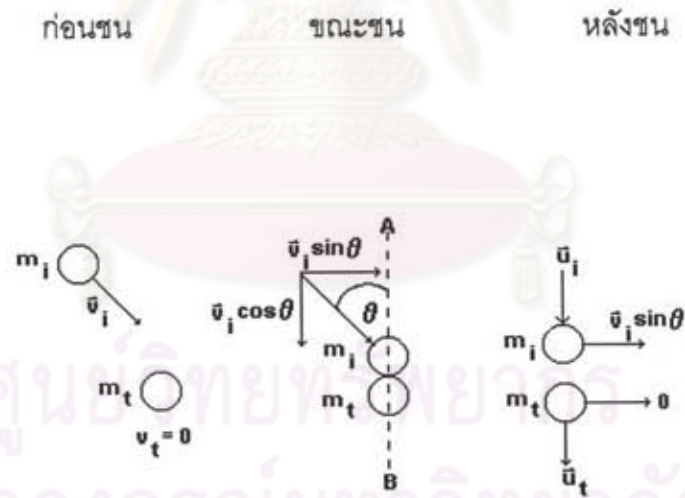


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

แบบจำลองลูกบิลเลียด(Billiard ball model)

พิจารณาการชนกันระหว่างอนุภาคทรงกลมแข็ง 2 อนุภาคมวล m_1 และ m_2 ซึ่งแสดงดังรูปที่ ผ-1 กำหนดให้ก่อนชนอนุภาคมวล m_1 อยู่นิ่ง อนุภาคมวล m_2 เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_1 ในทิศที่ทำมุม θ กับแนวที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองขณะชน มวล m_1 จะได้รับแรงกระทำและเคลื่อนที่ออกไปในทิศตามแนวที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองขณะที่สัมผัสกัน โดยไม่ขึ้นกับขนาดของมุม θ กล่าวคือ ทิศของความเร็วหลังชนของอนุภาคมวล m_1 ขึ้นกับตำแหน่งที่อนุภาคทั้งสองสัมผัสกันขณะชน การชนของอนุภาคมวล m_2 ซึ่งมีความเร็วในทิศต่างๆ กัน สามารถทำให้มวล m_1 เคลื่อนที่ออกไปในทิศเดียวกันได้ ถ้าขณะชนทุกครั้งมวลทั้งสองสัมผัสกัน ณ จุดเดิม ความเร็วของอนุภาคทั้งสองก่อนชนและหลังชน



รูปที่ ผ-1 ภาพจำลองการชนของอนุภาคทรงกลมแข็ง 2 อนุภาคตามแบบจำลองลูกบิลเลียด

จากรูปที่ ผ-1 AB คือแนวที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองขณะชน ก่อนชนมวล m_i มีความเร็วองค์ประกอบย่อยแนวขนานและตั้งฉากกับแนว AB เป็น $\vec{v}_i \cos\theta$ และ $\vec{v}_i \sin\theta$ ตามลำดับ ส่วนมวล m_t มีความเร็วเป็น 0 หลังชน โดยกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมมวล m_i จะมีความเร็วองค์ประกอบย่อยแนวขนานและตั้งฉากกับแนว AB เป็น u_i และ $v_i \sin\theta$ ตามลำดับ ขณะที่มวล m_t มีความเร็วลัพธ์ u_t ในทิศตามแนว AB

การชนแยกพิจารณาได้ 2 แบบ

1. การชนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ (elastic collision) กรณีนี้อนุภาคทั้งสองจะมีการแลกเปลี่ยนเฉพาะพลังงานจลน์

จากกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น จะได้

$$m_i v_i \cos\theta = m_i u_i + m_t u_t \quad (1)$$

จากกฎอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_i (u_i^2 + v_i^2 \sin^2\theta) + \frac{1}{2} m_t u_t^2 \quad (2)$$

สมการ (2) จัดเทอมใหม่ จะได้

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 (1 - \sin^2\theta) = \frac{1}{2} m_i u_i^2 + \frac{1}{2} m_t u_t^2$$

$$m_i v_i^2 \cos^2\theta = m_i u_i^2 + m_t u_t^2 \quad (3)$$

หารสมการ (3) ด้วยสมการ (1) จะได้

$$v_i \cos\theta = \frac{m_i u_i^2 + m_t u_t^2}{m_i u_i + m_t u_t} \quad (4)$$

จากสมการ (1) หาทังสองข้างของสมการด้วย m_i จะได้

$$v_i \cos \theta = \frac{m_i u_i + m_t u_t}{m_i} \quad (5)$$

สมการ (5) เท่ากับสมการ (4) ดังนั้น

$$\frac{m_i u_i^2 + m_t u_t^2}{m_i u_i + m_t u_t} = \frac{m_i u_i + m_t u_t}{m_i}$$

$$\frac{(m_i u_i + m_t u_t)^2}{m_i} = m_i u_i^2 + m_t u_t^2 \quad (6)$$

กระจายเทอมยกกำลังสองทางด้านซ้ายมือของสมการ (6) และหารด้วย m_i แล้วหาร
ทั้งสองข้างของสมการด้วย $m_i u_i$ และจัดเทอมใหม่ จะได้

$$2u_i = u_t - \frac{m_t}{m_i} u_t$$

ดังนั้น

$$u_i = \frac{(m_i - m_t)}{2m_i} u_t \quad (7)$$

แทนค่า u_i จากสมการ (7) ในสมการ (1) จะได้

$$v_i = \frac{(m_i + m_t)}{2m_i \cos \theta} u_t \quad (8)$$

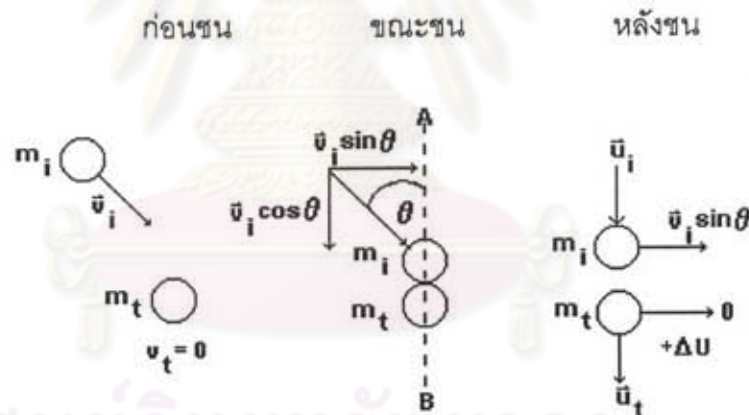
จากสมการ (7) และสมการ (8) สามารถหาสัดส่วนของพลังงานจลน์ที่ส่งผ่านจาก
อนุภาคมวล m_i ไปยังอนุภาคมวล m_t ได้ดังนี้

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{\frac{1}{2} m_t u_t^2}{\frac{1}{2} m_i v_i^2} = \frac{4 m_i m_t}{(m_i + m_t)^2} \cos^2 \theta \quad (9)$$

สมการ (9) สามารถใช้ได้กับอนุภาคมวลขนาดใหญ่ จนถึงระดับขนาดของอะตอม โดยต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขการชนแบบยืดหยุ่น

เทอม $\frac{4m_i m_t}{(m_i + m_t)^2}$ ของด้านขวามือของสมการ (9) เป็นที่รู้จักกันดีและเรียกว่า ฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน(Energy transfer function) ซึ่งมีค่าเป็น 1 เมื่อ $m_i = m_t$ ในกรณีที่ $m_i \ll m_t$ ดังเช่นกรณีที่อิเล็กตรอนชนกับอะตอมหรือโมเลกุล ฟังก์ชันการส่งผ่านมีค่าประมาณ $4m_i/m_t$ แต่เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างมวลของอิเล็กตรอนต่อมวลของอะตอม (m_i/m_t) มีค่าน้อยมากน้อยมาก ดังนั้นการส่งผ่านพลังงานในกรณีแบบนี้จึงเกิดขึ้นได้น้อย

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น(inelastic collision) สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่น จะต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอนุภาคด้วย สมมติอนุภาคที่ถูกชนได้รับพลังงานภายในเพิ่มขึ้น ΔU ดังรูปที่ ๘-2



รูปที่ ๘-2 ภาพจำลองการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมยังเหมือนเดิมคือ

$$m_i v_i \cos \theta = m_i u_i + m_t u_t \quad (10)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานต้องเพิ่ม ΔU ในเทอมพลังงานรวมหลังการชน ดังนี้

$$\frac{1}{2}m_i v_i^2 = \frac{1}{2}m_i(u_i^2 + v_i^2 \sin^2 \theta) + \frac{1}{2}m_t u_t^2 + \Delta U \quad (11)$$

คูณสมการ (11) ด้วย 2 จะได้

$$\begin{aligned} m_i v_i^2 &= m_i(u_i^2 + v_i^2 \sin^2 \theta) + m_t u_t^2 + 2\Delta U \\ &= m_i u_i^2 + m_i v_i^2 \sin^2 \theta + m_t u_t^2 + 2\Delta U \end{aligned} \quad (12)$$

จากสมการ (10) ย้ายข้างเทอม $m_t u_t^2$ แล้วกำลังสองทั้งสองข้างและหารสมการด้วย m_i จะได้

$$m_i u_i^2 = m_i v_i^2 \cos^2 \theta - 2m_t v_i u_t \cos \theta + \frac{m_t^2 u_t^2}{m_i}$$

แทนค่า $m_i u_i^2$ ที่ได้นี้ ลงในสมการ (12) แล้วจัดเทอมใหม่จะได้

$$2m_t u_t v_i \cos \theta = \frac{m_t^2 u_t^2}{m_i} + m_t u_t^2 + 2\Delta U$$

และจะได้

$$2\Delta U = 2m_t u_t v_i \cos \theta - \frac{m_t}{m_i}(m_t + m_i)u_t^2 \quad (13)$$

จากสมการ (13) หาอนุพันธ์อันดับ 1 ของ ΔU เทียบกับ u_t แล้วให้เท่ากับ 0 จะได้เงื่อนไขสำหรับค่าสูงสุดของ ΔU คือ

$$v_i \cos \theta = \frac{(m_i + m_t)}{m_i} u_t$$

หรือ

$$u_t = \frac{m_i v_i \cos \theta}{m_i + m_t} \quad (14)$$

แทนค่ากลับเข้าไปในสมการ (13) จะได้ค่าสูงสุดของ ΔU เป็น

$$\Delta U = \frac{m_i m_t}{2(m_i + m_t)} v_i^2 \cos^2 \theta \quad (15)$$

จากสมการ (15) สามารถหาอัตราส่วนของพลังงานภายในสูงสุดที่อนุภาคถูกชนได้รับต่อพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชน ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta U}{\frac{1}{2} m_i v_i^2} = \frac{m_t}{m_i + m_t} \cos^2 \theta \quad (16)$$

$\frac{m_t}{m_i + m_t}$ คือ ฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงานในรูปพลังงานภายใน ซึ่งมีค่าเป็น 1 เมื่อ $m_t \ll m_i$ แสดงว่า การส่งผ่านในรูปพลังงานภายในเกิดขึ้นได้ดีในกรณีที่มวลของอนุภาคที่เข้าชนมีค่าน้อยกว่ามวลของอนุภาคที่ถูกชนมาก

สำหรับสัดส่วนการส่งผ่านพลังงานในรูปพลังงานจลน์ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{\frac{1}{2} m_t u_t^2}{\frac{1}{2} m_i v_i^2} \quad (17)$$

หาค่า v จากสมการ (13) แล้วแทนค่าในสมการ (17) จะได้

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{m_t u_t^2}{m_i} \left[\frac{2m_t u_t}{\frac{m_t}{m_i} (m_i + m_t) u_t^2 + 2\Delta U} \right]^2 \cos^2 \theta \quad (18)$$

การส่งผ่านพลังงานจลน์ตามสมการ (18) มีค่าสูงสุดเมื่อ $\Delta U=0$ และจะลดรูปเป็นสมการ (9) ซึ่งเป็นสัดส่วนการส่งผ่านพลังงานในการชนแบบยืดหยุ่น ดังนั้นแม้ว่าการส่งผ่านพลังงานในรูปภายในเกิดได้ดีในกรณี $m_1 \ll m_2$ แต่การส่งผ่านพลังงานในรูปพลังงานจลน์ก็ยังเกิดขึ้นได้น้อยมาก



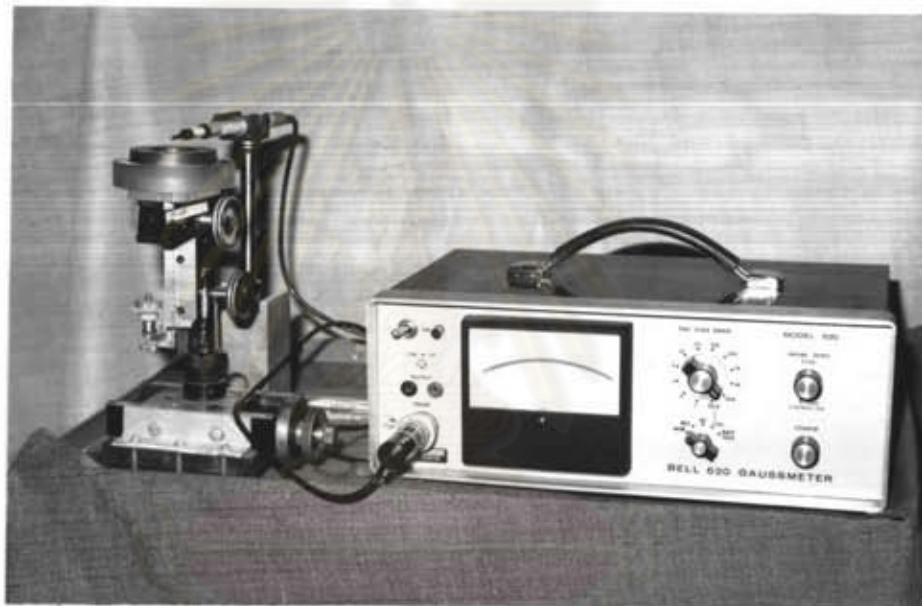
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ระบบวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

ชุดอุปกรณ์วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก มีส่วนประกอบสองส่วน คือ เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก และแท่นวางแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ ผ-3



รูปที่ ผ-3 ภาพถ่ายของอุปกรณ์วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก(ขวามือของรูปที่ ผ-3) เป็นเกาส์มิเตอร์ของ BELL model 620 พร้อมด้วยหัววัดแบบปรากฏการณ์ฮอลล์(ในภาพติดอยู่บนแท่นวางด้านซ้ายแล้ว) สามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้ตั้งแต่ขนาด 0.1 เกาส์ถึง 30 กิโลเกาส์

แท่นวางแม่เหล็กดัดแปลงมาจากขาตั้งกล้องจุลทรรศน์ นำมาประกอบเข้ากับชุดรางเลื่อนระยะและตลับพลาสติกวงกลม สามารถปรับตำแหน่งแม่เหล็กได้ 4 มิติ คือ ตามแนวแกน x แกน y แกน z และหมุนรอบแกนของแม่เหล็ก

การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่จุดเดียวกันเหนือแม่เหล็ก สามารถแยกวัดได้สองส่วน คือ สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับระนาบของแม่เหล็ก(B_x) และสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับระนาบของแม่เหล็ก(B_y) ความเข้มสนามแม่เหล็ก B_x วัดได้โดยการวางหัววัดให้ระนาบของหัววัดตั้งฉากกับระนาบของแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ ผ-4 ส่วนความเข้มสนามแม่เหล็ก B_y วัดได้โดยการวางหัววัดให้ระนาบของหัววัดขนานกับระนาบของแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ ผ-5



รูปที่ ผ-4 แสดงการวางหัววัดแม่เหล็กเพื่อวัด B_x



รูปที่ ผ-5 แสดงการวางหัววัดแม่เหล็กเพื่อวัด B_y

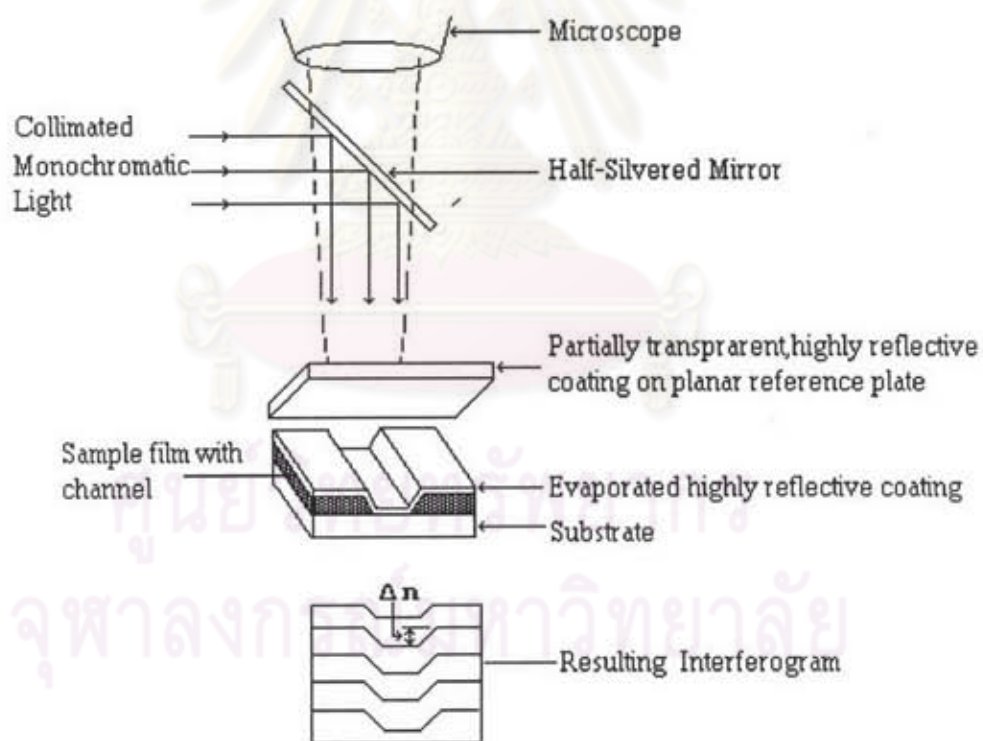
ชุดเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นนอกจากสามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กแล้ว ยังสามารถใช้สำหรับตรวจสอบแนวของเส้นแรงแม่เหล็กรอบแม่เหล็กได้ด้วย เนื่องจากหัววัดสนามแม่เหล็กสามารถตรวจจับการกลับทิศของเส้นแรงแม่เหล็กได้

ภาคผนวก ค

การวัดความหนาฟิล์มบางโดยวิธีโทลานสกี

ส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้ได้จัดสร้างระบบวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีของโทลานสกีขึ้น เพื่อที่จะใช้เป็นเครื่องมือวัดความหนาฟิล์มบางที่มีความแม่นยำมากกว่าการวัดความหนาโดยวิธีชั่งมวล

การวัดความหนาโดยวิธีโทลานสกีเป็นเทคนิคการวัดความหนาเชิงแสง ที่ให้ผลการวัดเป็นความหนาที่แท้จริงของฟิล์มบาง หลักการทดลองของเทคนิคนี้แสดงดังรูปที่ ผ-6



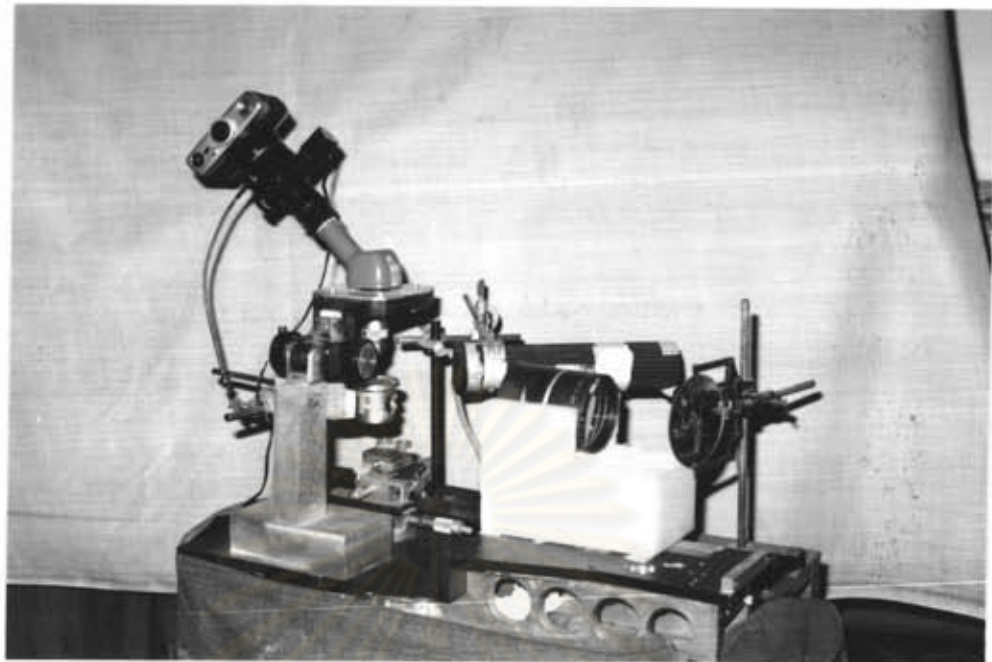
รูปที่ ผ-6 หลักการจัดอุปกรณ์วัดความหนาโดยวิธีโทลานสกี

ฟิล์มบางที่ต้องการวัดความหนา จะถูกเคลือบบนวัสดุรองรับโดยทำให้เป็นร่องเล็กๆ ซึ่งจะมีความลึกเท่ากับความหนาของฟิล์มบาง ฟิล์มนี้จะถูกเคลือบทับด้วยชั้นของฟิล์มบางที่มีการสะท้อนแสงดีโดยให้คลุมรวมทั้งส่วนของร่องด้วย เพื่อช่วยให้การสะท้อนแสงจากทุกบริเวณเท่าๆกัน ชั้นของฟิล์มบางช่วยการสะท้อนแสงนี้ไม่จำเป็นต้องมีถ้าวัสดุรองรับและฟิล์มที่ต้องการวัดความหนามีการสะท้อนแสงใกล้เคียงกัน ฟิล์มบางที่เตรียมเป็นร่องจะนำไปวางอยู่ใต้แผ่น Fizeau plate ซึ่งเป็นแผ่นวัสดุบางๆ ที่แสงสามารถทะลุผ่านได้บางส่วนและมีการสะท้อนแสงดี โดยจัดให้ Fizeau plate เอียงทำมุมเล็กๆกับระนาบฟิล์ม จากนั้นฉายแสงขนานความยาวคลื่นเดียวให้ตกกระทบบนที่กระกระจกสะท้อนแสง 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งวางเอียง 45 องศาที่ระนาบฟิล์ม แสงที่สะท้อนจากกระจกนี้จะตกกระทบบนมาที่จุดของฟิล์มบางและแผ่น Fizeau plate ที่วางประกบกันอยู่ โดยแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนที่ผิวล่างของแผ่น Fizeau plate อีกส่วนหนึ่งจะทะลุไปสะท้อนที่ผิวของฟิล์มบาง จากการมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ก็จะสามารถสังเกตเห็นริ้วการแทรกสอดของแสงทั้งสองจุดนี้เป็นจุดของริ้วมืดต่อเนื่องพาดขวางกับขอบของร่องบนฟิล์ม และมีระยะห่างระหว่างแต่ละริ้วคงที่ โดยที่ริ้วของการแทรกสอดเส้นเดียวกันจะมีการเหลื่อมกันระหว่างส่วนที่อยู่บนฟิล์มกับส่วนที่พาดผ่านร่องของฟิล์ม (ดูรูปล่างสุดในรูป ผ-6 ประกอบ) จากการวัดระยะการเหลื่อมกันของริ้วการแทรกสอด จะสามารถคำนวณความหนาของฟิล์ม (t) ได้จากสมการ

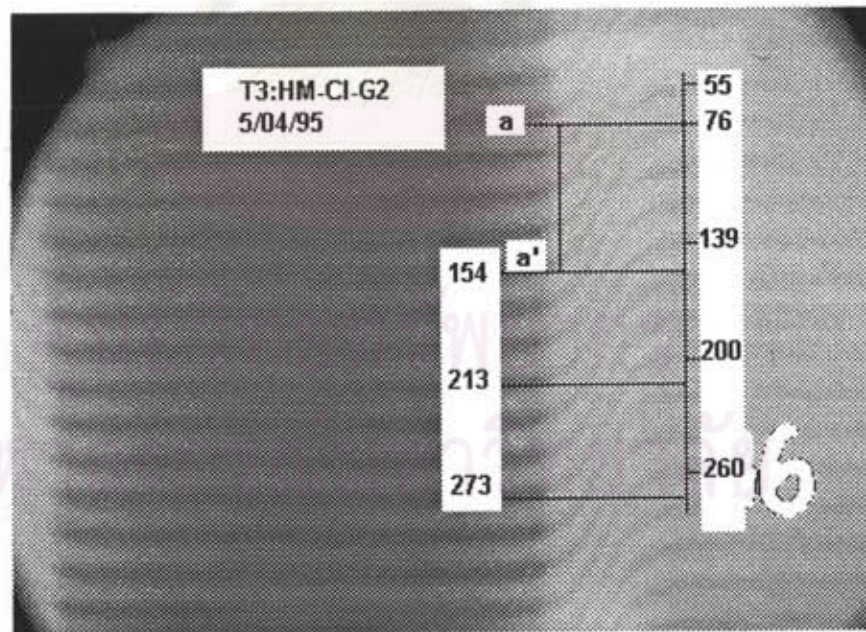
$$t = \Delta n \frac{\lambda}{2}$$

โดย Δn เป็นระยะเหลื่อมกันของริ้วการแทรกสอด ในหน่วยจำนวนเท่าของระยะระหว่างริ้วมืดที่อยู่ติดกัน และ λ เป็นความยาวคลื่นแสงที่ใช้

สำหรับระบบที่จัดสร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ ผ-7 มีส่วนประกอบต่างๆ คือ หลอดกำเนิดแสงโซเดียมความยาวคลื่น 5890 อังสตรอม กระจกแก้วสำหรับสะท้อนแสงและเลนส์รวมแสง กระจกแสงทะลุผ่าน 50 เปอร์เซ็นต์ที่วางเอียง 45 องศา (อยู่ใต้กล้องจุลทรรศน์) แทนวางฟิล์มซึ่งมีแผ่นกระจกปิดสไลด์ที่จะทำหน้าที่เป็นแผ่น Fizeau plate ติดไว้บนแกนหมุนซึ่งจะช่วยให้สามารถปรับมุมเอียงได้ และส่วนสุดท้ายคือกล้องจุลทรรศน์พร้อมด้วยกล้องสำหรับถ่ายรูปจากกล้องจุลทรรศน์ ในการวัดความหนาจะจัดกระจกแก้วและเลนส์หมุนโดยให้แสงโซเดียมโฟกัสลงบนกระจกเอียง 45 องศาพอดี แสงนี้จะสะท้อนตรงไปยังฟิล์มและกระจกปิดสไลด์ ก่อนที่จะสะท้อนกลับมาเข้าที่กล้องจุลทรรศน์และทำให้เห็นริ้วการแทรกสอดในที่สุด



รูปที่ ๘-7 ภาพถ่ายของระบบวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีโทลานสกี



รูปที่ ๘-8 ผลการระบุตำแหน่งของรีวกการแทรกสอดจากการอ่านบนจอคอมพิวเตอร์

ในระบบนี้การวัดการเลื่อมกันของริ้วการแทรกสอด จะใช้วิธีถ่ายภาพของริ้วการแทรกสอดจากกล้องจุลทรรศน์แล้วนำรูปที่ได้ไปสแกนเข้าเป็นภาพในคอมพิวเตอร์ แล้วใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวัดและระบุตำแหน่งของริ้วรอยการแทรกสอด ดังตัวอย่างในรูปที่ ๘-8 ซึ่งระยะ aa' คือระยะที่ริ้วการแทรกสอด a ซึ่งอยู่บนฟิล์มกับส่วนที่พาดบนร่องเลื่อมกัน โดยวิธีนี้ความละเอียดของการวัดความหนาจะขึ้นกับอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างริ้วการแทรกสอดในภาพต่อจำนวนหน่วยสเกลบนจอคอมพิวเตอร์ เช่น จะสามารถวัดความหนาของฟิล์มได้ละเอียดถึง $1/20$ ของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสงโซเดียม (ประมาณ 150 อังสตรอม) เมื่อขนาดของภาพมีระยะระหว่างริ้วรอยของการแทรกสอดประมาณ 20 หน่วยสเกลบนจอของคอมพิวเตอร์ จากตัวอย่างในรูปที่ ๘-8 หาได้ว่าระยะระหว่างริ้วเฉลี่ย คือ 20.5 หน่วยเซล ถ้าใช้ระยะที่ริ้ว a เลื่อมกัน ซึ่งเท่ากับ 78 หน่วยเซล จะคำนวณระยะการเลื่อมกันเป็นจำนวนเท่าของระยะระหว่างริ้วได้เท่ากับ 3.8 และได้ความหนาของฟิล์มเป็น 11,191 อังสตรอม

นอกจากการเตรียมให้ผิวฟิล์มและผิวบนร่องมีการสะท้อนแสงใกล้เคียงกันแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่ง คือ ในการทำร่องบนฟิล์มจะต้องให้ขอบของร่องมีความเอียงพอสมควร การเอียงนี้อยู่ในลักษณะที่ให้ร่องเปิดกว้างด้านบน เนื่องจากพบว่าถ้าขอบของฟิล์มตัดตรงตั้งฉากกับกระจก การระบุนความต่อเนื่องของริ้วการแทรกสอดระหว่างส่วนที่อยู่บนฟิล์มกับในร่องไม่สามารถทำได้เนื่องจากริ้วการแทรกสอดที่ใต้บนขอบฟิล์มจะซ้อนทับกันหมดและมองเห็นเป็นเส้นเดียว

สำหรับชุดการทดลองวัดความหนาโดยวิธีโกลานสกีนี้มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้เป็นระบบสมบูรณ์ในตัวเองที่สามารถอ่านความหนาฟิล์มได้ทันที โดยการเพิ่มระบบบันทึกภาพและระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงภาพของริ้วการแทรกสอดบนจอคอมพิวเตอร์ได้ในขณะที่ทำการทดลอง โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการถ่ายภาพ

ศูนย์วิจัยทรัพย์สินทางปัญญา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นายธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน เกิดวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2511 ที่อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์(เกียรตินิยมอันดับสอง) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2532 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2533



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย