

รายการอ้างอิง

- [1] Contreras,M.A.;Tuttle,J.;Gabor,A.;Tennant,A.;Ramanathan,K.;Asher,S.;Franz,A.; Keane,J.;Wang,L.;Scofield,J.; and Noufi,R. High efficiency Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells : processing of novel absorber structures First WCPEC;Dec.5-9, Hawaii (1994) : 68-75.
- [2] Rockett,A.; and Birkmire,R.W. CuInSe₂ for photovoltaic applications J.Appl.Phys. 70(7), (October 1991) : R81-R97.
- [3] Rau,U.; and Schock,H.W. Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells-recent achievements,current understanding, and future challenges, Applied Physics A (1999) : 13-29.
- [4] Contreras,M.A.;Egaas,B.;Ramanathan,K.;Hiltner,J.;Swartzlander,A.;Hasoon,F.; and Noufi,F. Progress in Photovoltaics : Research and Applications (July/August 1999)
- [5] Tuttle,J.R.;Albin,D.S.;Tennant,A.;Gabor,A.M.;Contreras,M.; and Noufi,R. Characterization of variable-band-gap thin-film Cu(In,Ga)Se₂ : a simple model for the interdiffusion of In and Ga in alloy structures Solar Energy Materials and Solar Cells. 35 (1994) : 193-201.
- [6] กัลยา เขียวประเสริฐศุกย์. การศึกษารอยต่อพี-เอ็น โฮโมจังค์ชันของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2531.
- [7] ชาญวิทย์ จิตยุทธการ. การเตรียมและการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2538.

- [8] พงษ์ ทรงพงษ์. การศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์โดย
สภานำไฟฟ้าเชิงแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
- [9] Yoodee, K. Crystallographic and Band Structure Properties of Some I-III-VI Chalcopyrite
Compounds and Alloys Ph.D. Thesis, Department of Physics, University of
 Ottawa, Ottawa, Canada, 1985.
- [10] Madelung, O. Semiconductors Basic Data 2nd revised Edition. Berlin : Springer-
 Verlag, 1996.
- [11] Samaan, A.N.Y.; Varidhyathan, R.; and Noufi, R. Growth and Characterization of
 Polycrystalline CuInSe₂ Thin Films Solar Cells 16 (1986) : 181-198.
- [12] Schock, H.W. Solar cells based on CuInSe₂ and related compounds : recent progress
 in Europe Solar Energy Materials and Solar Cells 34 (1994) : 19-26.
- [13] Mickelsen, R.A.; and Chen, W.S. Apply Physics Letters 36 (1980) : 371.
- [14] Gabor, A.M.; Tuttle, J.R.; Albin, D.S.; Contreras, M.A.; Noufi, R.; and Hermann, A.M.
 High-efficiency CuIn_xGa_{1-x}Se₂ solar cells made from (In_xGa_{1-x})₂Se₃ precursor
 films Apply Physics Letters 65 (11 July 1994) : 198-200.
- [15] Kohara, N.; Negami, T.; Nishitani, M.; and Wada, T. Preparation of Device-Quality
 Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films Deposited by Coevaporation with Composition Monitor
Japan Journal of Apply Physics 34 (1995) : L1141-L1144.
- [16] Graper, E.B. Handbook of Thin Film Process Technology. IOP Publishing, 1996.
- [17] Vossen, J.L.; and Kern, W. Thin Film Processes II. San Diego (USA) : Academic Press,
 Inc., (1991) : 139-146.
- [18] Tuttle, J.R.; Contreras, M.; Bode, M.H.; Niles, D.; Albin, D.S.; Matson, R.; Gabor, A.M.;
 Tennant, A.; Duda, A.; and Noufi, R. Structure, Chemistry, and growth mechanisms
 of photovoltaic quality thin-film Cu(In,Ga)Se₂ grown from a mixed-phase
 precursor J.Appl.Phys. 77(1) (1 January 1995) : 153-160.

- [19] Tuttle, J.R.; Albin, D.S.; Tennant, A.; Gabor, A.M.; Contreras, M.; and Noufi, R. Characterization of variable-band-gap thin-film Cu(In,Ga)Se₂ : a simple model for the interdiffusion of In and Ga in alloy structures Solar Energy Materials and Solar Cells 35 (1994) : 193-201.
- [20] Granqvist, C.G., and Niklasson, G.A. Thin Film Technology. Physics Department, Chalmers University of Technology, S-412 96 Gothenburg, Sweden.
- [21] ศุภสรโรหิต หน้มนสิทธิ. ฟิสิกส์ของวัสดุ. กรุงเทพมหานคร; ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 1992.
- [22] จลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนสำหรับงานด้านวัสดุศาสตร์. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542.
- [23] Goldstein, J.I., Romig, A.D., Jr., Newbury, D.E., Lyman, C.E., Echlin, P., Fiori, C., Joy, D.C., and Lifshin, E. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. 2nd Edition. New York : Plenum Press, 1992.
- [24] ธนุสิทธิ บรินทร์ประโคน. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [25] Hashimoto, Y.; Kohara, N.; Negami, T.; Nishitani, N.; and Wada, T. Chemical Bath Deposition of CdS Buffer Layer for CIGS Solar Cells Solar Energy Material and Solar Cells 50 (1998) : 71-77.
- [26] Sze, S.M. Physics of Semiconductor Devices 2nd Edition. New York : John Wiley & Sons, (1981) : 790-838.
- [27] ยุทธ อัครมาส. ฟิสิกส์ของระบบเซลล์สุริยะ. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [28] Schock, H.W. CuInSe₂ and Other Chalcopyrite-Based Solar Cells. A Publication of the Materials Research Society (October 1993) : 42-44.
- [29] Stolt, L. High Efficiency CIGS Solar Cells by the Coevaporation Method Technical Digest of the International PVSEC-9, Miyazaki, Japan. (1996) : 135-138.

- [30] Nakada,T.;Ohbo,H.;Fukuda,F.; and Kunioka,A. Improved Compositional Flexibility of Cu(In,Ga)Se₂-Based Thin Film Solar Cells by Sodium Control Technique Technical Digest of the International PVSEC-9, Miyazaki,Japan. (1996) : 139-140.
- [31] ฤทธิเดช แวนนุกุล. การเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สารประกอบ CuIn_{0.8}Ga_{0.2}Se₂ โดยวิธี EDS. โครงการนิสิตปริญญาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2541.
- [32] Nakada,T.;Iga,D.;Ohbo,H.; and Kunioka,A. Effects of Sodium on Cu(In,Ga)Se₂-Based Thin Films and Solar Cells Jpn.J.Appl. Phys. 36 (1997) : 732-737.
- [33] Shay,J.L.; and Wernick,J.H. Ternary Chalcopyrite Semiconductor London : Pergamon Press, (1975) : 1-78.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

จากบทที่ 3 ได้ศึกษาทฤษฎีการกระจายตัวของฟลักซ์ไอมาแล้ว ทำให้เราทราบว่าฟลักซ์หรืออัตราการเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นวัสดุรองรับของแหล่งระเหยแบบเอียง ดังรูปที่ 3.6 (b) สามารถคำนวณหาได้ ด้วยสมการ (3.27)

$$\frac{R_C}{R_A} = \frac{\cos(\theta'_c) \cdot \cos(\phi + \theta'_c)}{\cos(\phi)} \cdot \left(\frac{d_A}{d_c} \right)^2 \quad (ก.1)$$

และมีฟังก์ชันการกระจาย $f(\theta)$ อยู่ในรูปสมการทั่วไป คือ

$$f(\theta) = \left(\frac{\cos\theta}{\cos\phi} \right) \cdot \cos(\phi + \theta) \quad (ก.2)$$

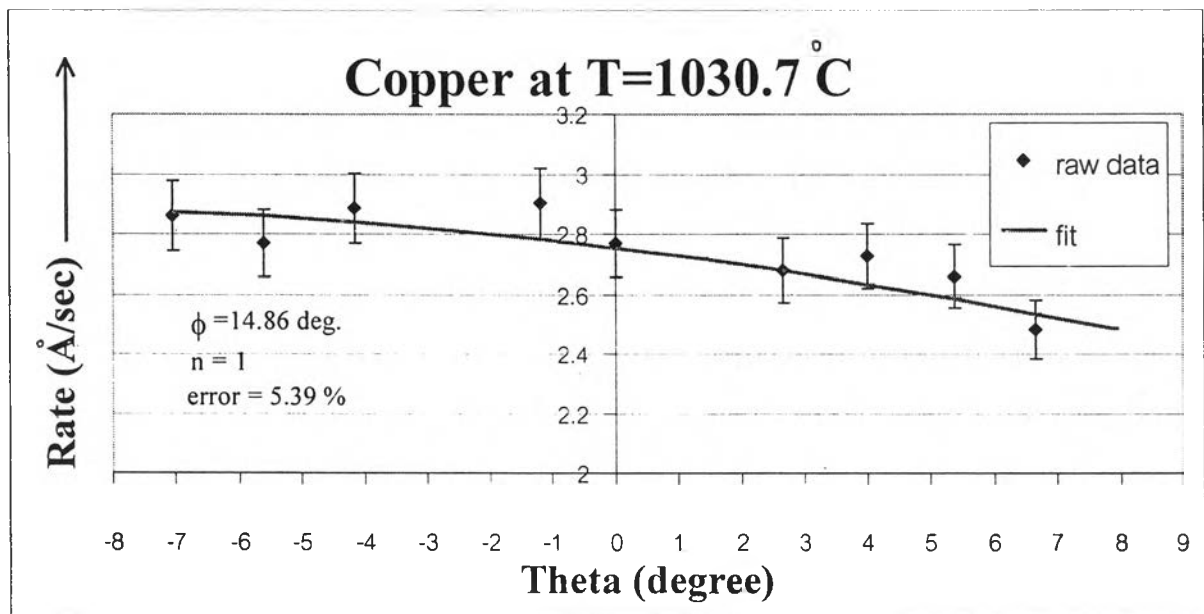
ดังนั้น เมื่อได้ข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละแหล่งระเหย คือ Cu, In, Ga และ Se แล้ว เราสามารถแปลงสมการที่ (ก.1) ให้เหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางได้ โดยทำการยกกำลัง n ของพจน์ $\cos(\phi + \theta'_c)$ ดังสมการ

$$\frac{R_C}{R_A} = \frac{\cos(\theta'_c) \cdot \cos^n(\phi + \theta'_c)}{\cos(\phi)} \cdot \left(\frac{d_A}{d_c} \right)^2 \quad (ก.3)$$

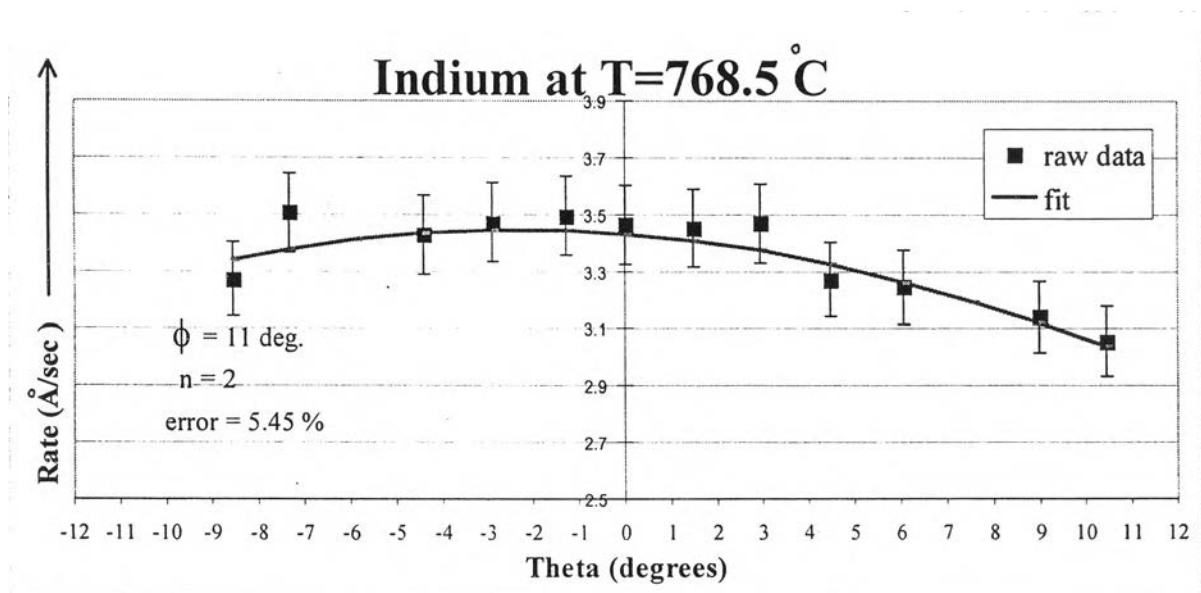
สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการวัดของแต่ละแหล่งกำเนิดซึ่งจะนำมาใช้คำนวณในสมการ (ก.3) แสดงดังตารางที่ ก.1 และสามารถแสดงกราฟของแต่ละแหล่งกำเนิดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (ก.3) เทียบกับข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละแหล่งกำเนิด ได้

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลของแต่ละแหล่งระเหยซึ่งใช้คำนวณในสมการ ก.3

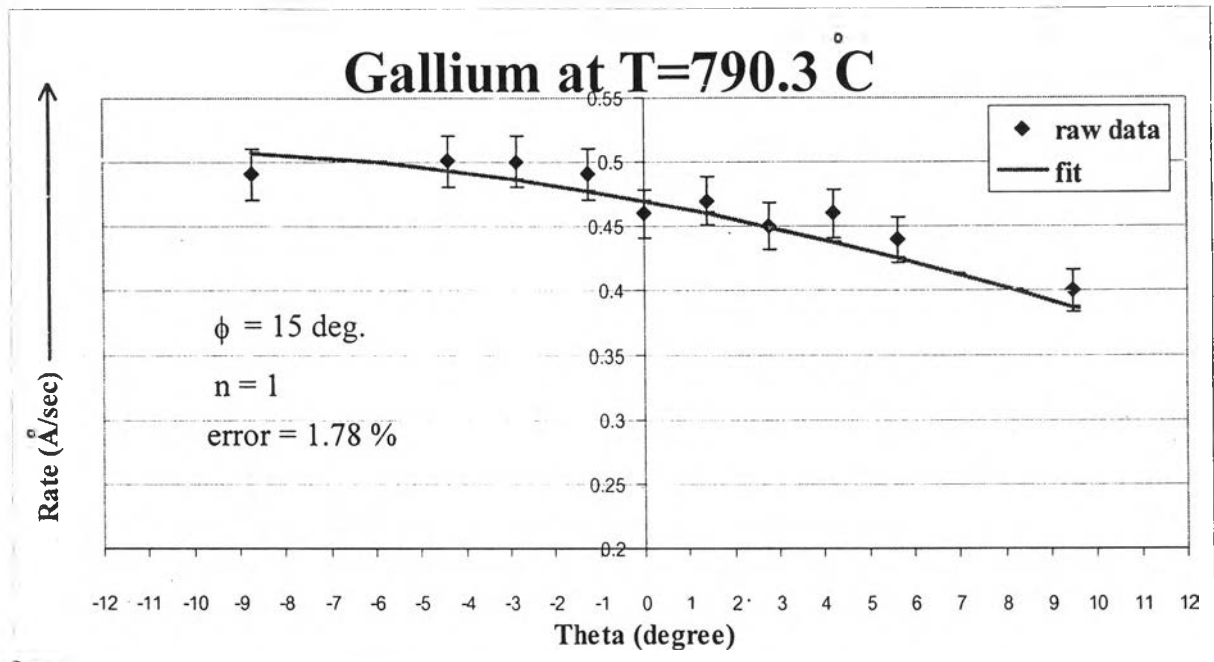
แหล่งระเหย	R_A (A/sec)	Phi (degree)	d_A (cm)
Cu	2.77	14.86	12.20
In	3.495	11	11.55
Ga	0.469	15	11.60
Se	224.38	20	13.20



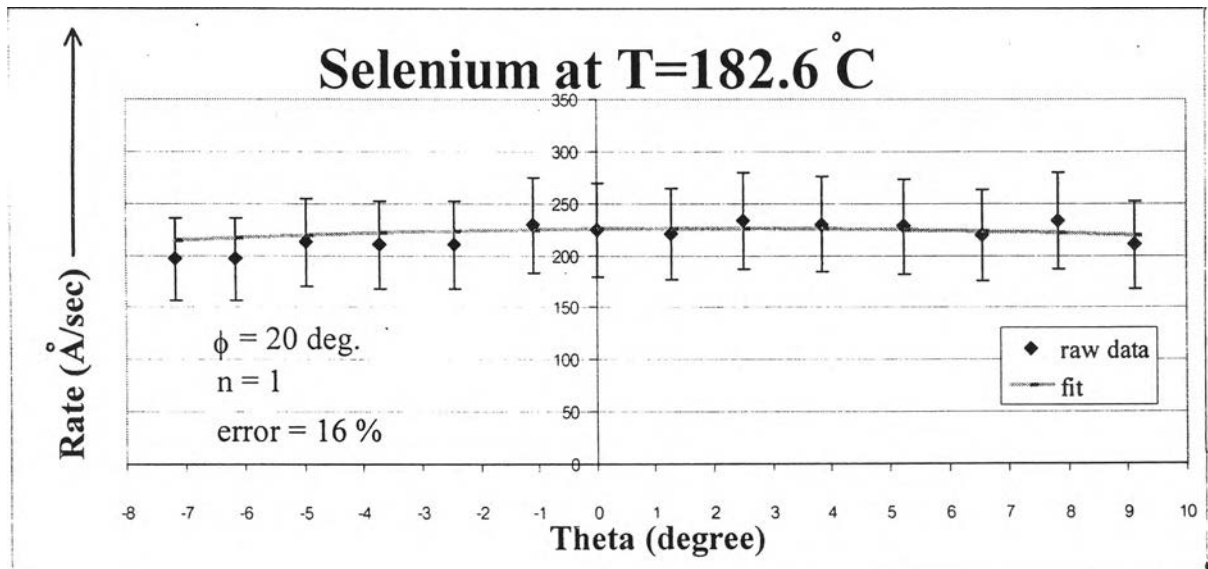
รูปที่ ก.1 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ $n=1$ ของแหล่งระเหย Cu



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ $n=2$ ของแหล่งระเหย In



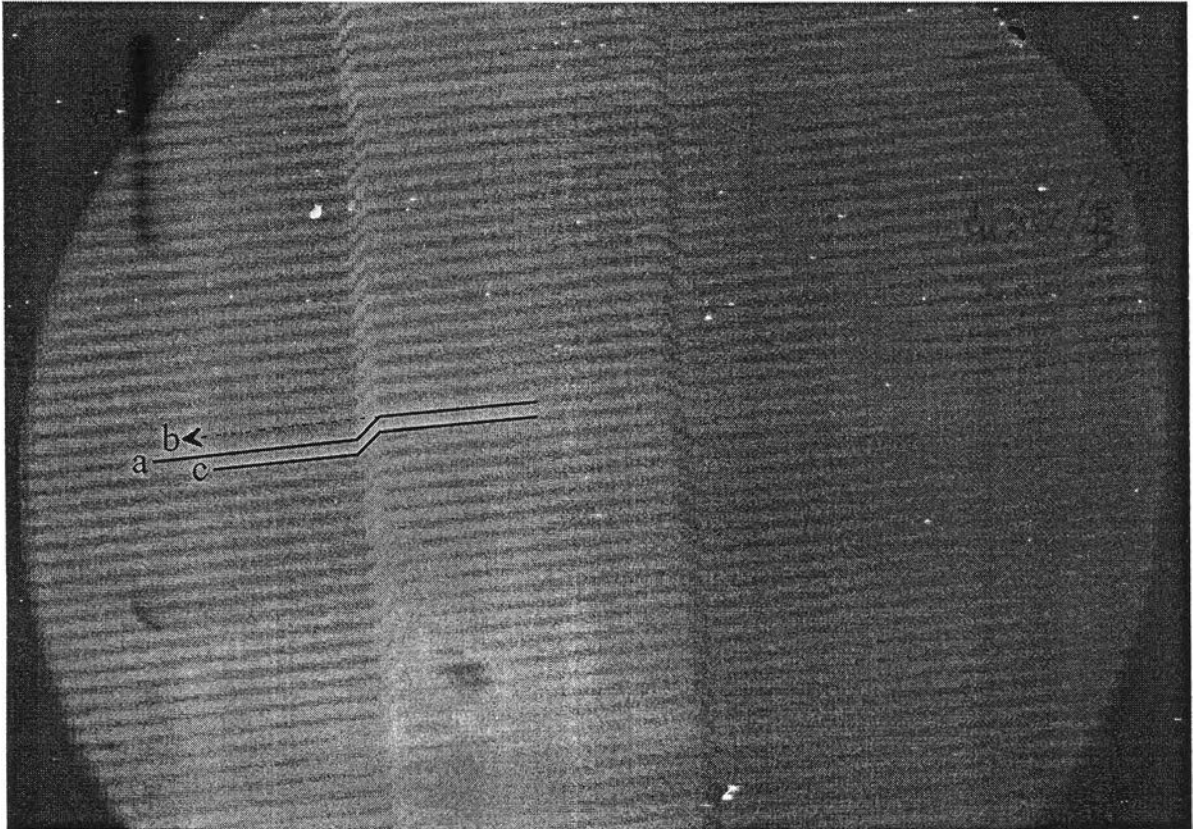
รูปที่ ก.3 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ $n=1$ ของแหล่งระเหย Ga



รูปที่ ก.4 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ $n=1$ ของแหล่งระเหย Se

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีโทลันสกี โดยใช้แสงโซเดียมที่มีความยาวคลื่น 5,890 อังสตรอม



รูปที่ ข.1 แสดงการเกิดการแทรกสอดบนฟิล์มบางจากแสงโซเดียมด้วยวิธีโทลันสกี

$$\text{ความหนาของฟิล์มบาง} = \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta n$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของแสงโซเดียม เท่ากับ 5,890 อังสตรอม

$$\Delta n \text{ คือ ระยะการเลื่อนของวัฏการแทรกสอด จากรูป เท่ากับ } \frac{(b-a)}{(a-c)}$$

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 1

มีความคลาดเคลื่อน 3.81 %

	In-1	In-2	In-3	In-4	In-5	In-6	Cu-1	Cu-2	Ga-1	Ga-2	Se-1	Se-2
A	15.41	462.5	221.2	64.62	21.93	9.55	225.5	30.07	33.47	5.18	149.7	23.42
C	3.03	3.4	3.61	3.81	4.03	4.26	8.04	8.89	9.22	10.21	11.13	12.39
w	0.07	0.06	0.06	0.07	0.05	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09
FWHM	0.17	0.13	0.14	0.17	0.12	0.17	0.17	0.18	0.18	0.21	0.19	0.22
พื้นที่ใต้กราฟ	2.85	65.27	33.66	11.88	2.79	1.69	40.29	5.83	6.41	1.15	30.96	5.53
พื้นที่ใต้กราฟรวม	Cu=46.12			In=118.14			Ga=7.55			Se=36.48		

ตารางที่ ค.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 2

มีความคลาดเคลื่อน 3.96 %

	In-1	In-2	In-3	In-4	In-5	In-6	Cu-1	Cu-2	Ga-1	Ga-2	Se-1	Se-2
A	15.64	462.7	221.7	63.99	22.46	10.58	221.5	29.91	34.41	5.38	149.8	23.64
C	3.03	3.39	3.61	3.81	4.02	4.26	8.04	8.88	9.22	10.21	11.14	12.39
w	0.07	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09
FWHM	0.17	0.13	0.14	0.16	0.13	0.15	0.17	0.18	0.18	0.2	0.2	0.22
พื้นที่ใต้กราฟ	2.83	65.39	34.08	11.15	3.03	1.67	39.7	5.63	6.7	1.16	31.06	5.54
พื้นที่ใต้กราฟรวม	Cu=45.33			In=118.14			Ga=7.86			Se=36.59		

ตารางที่ ค.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 3

มีความคลาดเคลื่อน 3.91 %

	In-1	In-2	In-3	In-4	In-5	In-6	Cu-1	Cu-2	Ga-1	Ga-2	Se-1	Se-2
A	16.44	470.1	226.3	64.79	22.81	9.77	220.3	30.17	30.02	4.55	148.4	23.38
C	3.01	3.38	3.59	3.79	4.01	4.24	8.02	8.87	9.2	10.19	11.12	12.37
w	0.07	0.06	0.06	0.07	0.05	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09
FWHM	0.17	0.13	0.14	0.18	0.12	0.16	0.17	0.18	0.18	0.21	0.2	0.22
พื้นที่ได้กราฟ	2.99	66.64	34.11	12.06	2.89	1.62	39.42	5.73	5.86	1.02	30.83	5.42
พื้นที่ได้กราฟรวม	Cu=45.14			In=120.31			Ga=6.88		Se=36.25			

ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์บนผิวหน้าฟิล์มบาง CIGS 2

มีความคลาดเคลื่อน 3.15 %

CIGS2 (Surface)	In-1	In-2	In-3	In-4	In-5	In-6	Cu-1	Cu-2	Ga-1	Ga-2	Se-1	Se-2
A	14.31	443.7	211.7	60.42	20.27	8.35	128.9	17.47	46.23	7.05	133.9	20.12
C	3.03	3.4	3.61	3.81	4.03	4.25	8.04	8.89	9.22	10.21	11.14	12.39
w	0.08	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09
FWHM	0.18	0.13	0.14	0.17	0.12	0.15	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22
พื้นที่ได้กราฟ	2.79	61.93	32.05	11.22	2.53	1.29	22.89	3.33	8.94	1.34	27.52	4.68
พื้นที่ได้กราฟรวม	Cu=26.22			In=111.81			Ga=10.28		Se=32.19			

ประวัติผู้วิจัย

นายศักดิ์ถาวร พงศ์วิเชียร เกิดวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ.2516 ที่อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2540

