การเตรียมฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ โดยวิธีการระเหยร่วม และการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์ม

นาย ศักดิ์ถาวร พงศ์วณิชยา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-143-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19498871

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ THIN FILMS DEPOSITED BY A COEVAPORATION METHOD

Mr. Sakthavorn Phongwanitchaya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Acadamic Year 2000

ISBN 974-346-143-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ โดยวิธีการระเหยร่วมและการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์ม
โดย	นาย ศักดิ์ถาวร พงศ์วณิชยา
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน)

..... กรรมการ
(ดร.ปิยวุฒิ ศรีชัยกุล)

นายศักดิ์ถาวร พงศ์วณิชยา : การเตรียมฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ โดยวิธีการระเหยร่วมและการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์ม. (PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ THIN FILMS DEPOSITED BY A COEVAPORATION METHOD) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ , 149 หน้า. ISBN 974-346-143-4.

ฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ แบบผลึกพหุได้เตรียมลงบนแผ่นวัสดุรองรับที่ร้อนด้วยวิธีเคลือบไอแบบกายภาพจากระบบแหล่งระเหยธาตุ 4 แหล่ง ภายใต้สุญญากาศในระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ แผ่นวัสดุรองรับเป็นกระจกโซดาไลม์ที่ถูกเคลือบโมลิบดีนัมหนา 1 ไมครอน ด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง ฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ ถูกเตรียมขึ้นด้วยกระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการ 2 ขั้น โดยขั้นแรกเป็นขั้นที่มี Cu มาก จะถูกเคลือบในอัตราส่วน $Cu/(In+Ga) > 1$ และจะเคลือบต่อเนื่องจนถึงขั้นที่สองที่มีเฉพาะ In Ga และ Se อุณหภูมิของแหล่งระเหย Cu In Ga และ Se คงที่ตลอดการเตรียมทั้งสองขั้น โดยในขั้นที่สองไม่มีการระเหย Cu ตลอดกระบวนการเตรียมใช้อัตราส่วน $Se/(Cu+In+Ga) > 3$ ขนาดเกรนและลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางตรวจสอบด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบางตรวจสอบด้วยวิธี Energy-Dispersive X-ray Spectrometry พบว่าฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ มีความหนาประมาณ 2.5 ไมครอน ขนาดเกรนประมาณ 1 ไมครอน และสัดส่วนอะตอมอยู่ในช่วง $0.56 \leq Cu/(In+Ga) \leq 1.01$ และ $0.18 \leq Ga/(In+Ga) \leq 0.55$ มีโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรต์ ค่าคงตัวแลตติซ a=5.660-5.797 อังสตรอม และ c=11.329-11.615 อังสตรอม แสดงทิศทางของระนาบ (112) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ เตรียมขึ้นมาโดยเคลือบ CdS หนา 50 nm ด้วยวิธีเคลือบแบบอาบสารเคมีเป็นชั้นกันชนบนฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ แล้วเคลือบตามด้วยฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้า ZnO(Al) หนา 500 nm ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง จากนั้นระเหย Al(Ni) ทำเป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ $Al(Ni)/ZnO(Al)/ZnO/CdS/Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2/Mo/SLG$ โดยวัดที่การฉายแสงมาตรฐาน AM1.5 ความเข้ม 100 mW/cm^2 เซลล์ที่ดีที่สุดมีพื้นที่รวม 0.49 cm^2 มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 8.9 % ความต่างศักย์วงจรเปิด 0.6 โวลต์ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 27.2 mA/cm^2 และฟิลแฟคเตอร์ 54.7 %

ภาควิชา .....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่อนิสิต ศักดิ์ถาวร พงศ์วณิชยา

สาขาวิชา ....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา ..2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

407 23936 23 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: THIN FILMS / CIGS / SOLAR CELLS / SEM / COEVAPORATION

SAKTHAVORN PHONGWANITCHAYA : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF Cu(In1-xGax)Se2 THIN FILMS DEPOSITED BY A COEVAPORATION METHOD. THESIS ADVISOR : ASSIST PROF. KAJORNYOD YOODEE,Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSIST PROF.SOMPHONG CHATRAPORN , 149 pp. ISBN 974-346-143-4.

Polycrystalline $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ thin films were deposited on heated substrates by the physical vapor deposition technique from a four-source elemental evaporation system under a vacuum of 10^{-6} mbar. The substrates were soda-lime glass (SLG) coated by dc sputtering with a 1 μm thick Mo layer. The $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ film was deposited using the bi-layer process in which a Cu-rich layer with Cu/(In+Ga) > 1 was first deposited and followed continuously by a second layer containing only In, Ga and Se with Se/(Cu+In+Ga) > 3 throughout the process. In this process In, Ga and Se source temperatures were kept constant through both layers and the Cu source was simply turned off during the second layer deposition. The grain size and surface morphology of $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ films were evaluated by a scanning electron microscope. X-ray diffraction and energy-dispersive X-ray spectrometry were used to analyse the crystal structure and composition of the films, respectively. It was found that these $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ films obtained with ~ 2.5 μm thickness have grain sizes of ~ 1 μm and ratios of atomic compositions of $0.56 \leq Cu/(In+Ga) \leq 1.01$ and $0.18 \leq Ga/(In+Ga) \leq 0.55$. The crystal structure is chalcopyrite with lattice constants a=5.660-5.797 Å and c=11.329-11.615 Å dominated by a preferred (112) orientation. $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$-based thin film solar cells were also fabricated a using a 50-nm-thick CdS buffer layer deposited by the chemical bath deposition technique. A 500 nm-thick transparent conducting ZnO(Al) film was then subsequently deposited by RF-sputtering. After evaporation of electrical grid Al(Ni), the current-voltage characteristics of these solar cells of Al(Ni)/ZnO(Al)/CdS/$Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$/Mo/SLG was measured under standard AM1.5 illumination with an intensity of 100 mW/cm^2 . The best cell of total area 0.49 cm^2 had a conversion efficiency of 8.9 % with an open-circuit voltage of 0.6 V,a short-circuit current of 27.2 mA/cm^2 and a fill factor of 54.7 %.

Department	Physics
Field of study	Physics
Academic year	2000

Student's signature Sakthavorn Phongwanitchaya

Advisor's signature .....

Co-advisor's signature Somphong Chatraporn

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี ผศ.สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ อ.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ และ อ.พงษ์ ทรงพงษ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณ คุณ คมกฤษ ปุ่นอุดม ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการสปัตเตอร์ซิงค์ออกไซด์

ขอขอบคุณ คุณ บุญเหลือ เงาถาวรชัย เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

ขอขอบคุณ คุณ จิระประภา เนียมปาน ภาควิชาธรณีวิทยา สำหรับการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเครื่อง Diffractometer

ขอขอบคุณ คุณ วรรลบ แดงงาม เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ที่ให้ความช่วยเหลืองานด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณ ไปรมา ดิษฐสมบูรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการเคลือบฟิล์มบางแคด-เมียมซัลไฟด์

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ มารดา และพี่ทุกคน ที่ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฑ

บทที่

1 บทนำ 1

2 สารกึ่งตัวนำ 4

2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ 5

1. สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยว 5

2. สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยวสองชนิด 5

3. สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยวสามชนิด 6

4. โลหะผสมกึ่งตัวนำ 6

2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ 7

1. โครงสร้างผลึกแบบเพชร 7

2. โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ 7

3. โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรต์ 8

2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำ I-III-VI_2 10

3 ทฤษฎีการระเหย 15

3.1 บทนำ 15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การกระจายตัวของไอ 16

3.3 ทฤษฎีการระเหยร่วม 28

3.3.1 กระบวนการเกิดฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ 29

4 วิธีการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำ 34

4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 34

4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน 39

4.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน 39

1. การชนแบบยืดหยุ่น 39

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น 41

4.2.2 Energy-Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS) 43

4.3 การวัดด้วยวิธีขั้วความร้อน 43

4.4 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ 44

4.4.1 สปัตเตอริง (Sputtering)..... 45

4.4.2 การเคลือบแบบอาบสารเคมี (Chemical bath deposition)..... 47

4.4.3 การระเหย (Evaporation)..... 48

4.4.4 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเชิงอุดมคติ (Ideal conversion efficiency)..... 49

5 การทดลองและผลการทดลอง 54

5.1 การสร้างชุดแหล่งระเหยและฮีทเตอร์..... 56

5.1.1 การหาอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแอ่น 58

5.2 การปรับเทียบ (Calibrate) อุณหภูมิของแหล่งระเหย 61

5.2.1 การคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS 68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 การเตรียมกระจกโซดาไลม์ 73

5.4 ผลการทดลองจากการวัดสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่คำนวณจากความหนาที่วัดโดยใช้วิธีโทลันสกี 73

5.4.1 ลักษณะผิวหน้าและสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS 74

5.4.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS 85

5.4.3 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS 87

5.4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 87

5.5 ผลการทดลองจากการวัดสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่คำนวณจากความหนาที่วัดโดยใช้วิธีโทลันสกีด้วยแหล่งระเหยที่ใช้ขดลวดแทนทาลัมขดใหม่ 98

5.5.1 ลักษณะผิวหน้าและสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS 98

5.5.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS 106

5.5.3 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS 109

5.5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 110

5.6 ผลการทดลองจากการวัดสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่คำนวณจากความหนาที่วัดโดยใช้ผลึกวัดความหนาด้วยแหล่งระเหยที่ใช้ขดลวดแทนทาลัมขดใหม่ 117

5.6.1 ลักษณะผิวหน้าและสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS 117

5.6.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS 124

5.6.3 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS 127

5.6.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 128

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 132

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 137

ข้อเสนอแนะ 138

รายการอ้างอิง 139

ภาคผนวก 143

ภาคผนวก ก 143

ภาคผนวก ข 146

ภาคผนวก ค 147

ประวัติผู้วิจัย 149

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 แสดงวิธีต่างๆ ในการเตรียมฟิล์มบางแต่ละชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์ 45

5.1 แสดงสมบัติของธาตุที่นำมาใช้ในระบบเตรียมฟิล์มบาง 56

5.2 แสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยต่างๆ 66

5.3 แสดงข้อมูล ln(R) และ 1/T สำหรับคำนวณหาค่า S และ b ของแหล่งระเหย Cu 66

5.4 แสดงข้อมูลอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ ของแหล่งระเหย In,Ga และ Se 67

5.5 แสดงค่า S และ b ของแหล่งระเหย Cu,In,Ga และ Se 68

5.6 แสดงความหนาของฟิล์มบางที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหย 69

5.7 แสดงค่า R และ ln(R) ของฟิล์มบาง Cu,In และ Ga 70

5.8 แสดงอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ได้จากการคำนวณสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS..... 70

5.9 แสดงพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอด Cu,In,Ga และ Se จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของ
ผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 1,2 และ 3 78

5.10 แสดงพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอด Cu,In,Ga และ Se จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์บน
ผิวหน้าฟิล์มบาง CIGS2 79

5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 81

5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS2 82

5.13 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS3 82

5.14 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS4 82

5.15 แสดงค่าคงตัวแลตติซ a และ c ของฟิล์มบาง CIGS2,CIGS3 และ CIGS4 85

5.16 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS2,CIGS3 และ CIGS4 87

5.17 แสดงข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์
ของฟิล์มบาง CIGS2 และ CIGS3 94

5.18 แสดงค่า S และ b ใหม่ของแหล่งระเหย Cu,In และ Ga 96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

5.19 แสดงอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS ของแหล่งระเหยใหม่..... 97

5.20 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS35 หนาประมาณ 1.70 ไมครอน 99

5.21 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS36 หนาประมาณ 2.60 ไมครอน 99

5.22 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS37 หนาประมาณ 2.20 ไมครอน 99

5.23 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS38 หนาประมาณ 2.00 ไมครอน 100

5.24 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS39 หนาประมาณ 2.00 ไมครอน 100

5.25 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS42 หนาประมาณ 2.20 ไมครอน 100

5.26 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS46 หนาประมาณ 2.00 ไมครอน 101

5.27 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS48 หนาประมาณ 2.00 ไมครอน 101

5.28 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS50 หนาประมาณ 1.60 ไมครอน 101

5.29 แสดงค่าคงตัวแลตติซ a และ c ของฟิล์มบาง CIGS 106

5.30 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS 110

5.31 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ 111

5.32 แสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยต่างๆ ของ
แหล่งระเหย Cu,In และ Ga 114

5.33 แสดงค่า S และ b ของแหล่งระเหย Cu,In และ Ga ชุดใหม่ซึ่งวัดความหนาด้วย
ผลึกวัดความหนา 115

5.34 แสดงอุณหภูมิของแหล่งระเหย Cu,In และ Ga ชุดใหม่
สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS 116

5.35 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS25 หนาประมาณ 1.70 ไมครอน 118

5.36 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS26 หนาประมาณ 1.65 ไมครอน 118

5.37 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS29 หนาประมาณ 3.30 ไมครอน 118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

5.38 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS30 หนาประมาณ 2.60 ไมครอน 119

5.39 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS31 หนาประมาณ 3.30 ไมครอน 119

5.40 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS32 หนาประมาณ 3.05 ไมครอน 119

5.41 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS33 หนาประมาณ 5.65 ไมครอน 120

5.42 แสดงค่าคงตัวแลตติซ a และ c ของฟิล์มบาง CIGS 124

5.43 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS 127

5.44 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 128

6.1 แสดงอัตราส่วน Cu/(In+Ga) และ Ga/(In+Ga) ของฟิล์มบาง CIGS2,CIGS3 และ CIGS4 ... 132

6.2 แสดงข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ
ฟิล์มบาง CIGS 133

6.3 แสดงอัตราส่วน Cu/(In+Ga) และ Ga/(In+Ga) ของฟิล์มบาง CIGS ที่วัดโฟตอนรังสีเอกซ์
คนละตำแหน่งบนแผ่นวัสดุรองรับเดียวกัน 134

6.4 แสดงข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ
ฟิล์มบาง CIGS 134

6.5 แสดงอัตราส่วน Cu/(In+Ga) และ Ga/(In+Ga) ของฟิล์มบาง 135

6.6 แสดงข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของ
ฟิล์มบาง CIGS 136

ก.1 แสดงข้อมูลของแต่ละแหล่งระเหยซึ่งใช้คำนวณในสมการ ก.3 143

ค.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 1
มีความคลาดเคลื่อน 3.81 % 147

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 2 มีความคลาดเคลื่อน 3.96 % 147

ค.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 3 มีความคลาดเคลื่อน 3.91 % 148

ค.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์บนผิวหน้าฟิล์มบาง CIGS2 มีความคลาดเคลื่อน 3.15 % 148

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 1

2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบกึ่งตัวนำที่ได้จากการแทนที่อะตอมลงใน
สารกึ่งตัวนำในหมู่ IV 7

2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร (Diamond structure) 9

2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zincblende structure) 9

2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite structure) 10

2.5 แสดงบริลลันโซนแรก (First Brillouin zone) ของโครงสร้างผลึกแบบ
Face Center Cubic (FCC) 11

2.6 แสดงบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกแบบชาลโคไพไรต์ (เส้นทึบ) เทียบกับบริลลันโซน
ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (เส้นประ) เมื่อกำหนดค่า c/a = 2 12

2.7 แสดงการแยกของแถบเวเลนซ์ในผลึกแบบชาลโคไพไรต์ 13

2.8 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ $CuInSe_2$ และ $CuGaSe_2$ ที่มีโครงสร้างผลึก
แบบชาลโคไพไรต์..... 14

3.1 แสดงการกระจายตัวของฟลักซ์ไอที่มีทิศทางของแหล่งกำเนิดตั้งฉากกับผิวของแผ่นวัสดุรองรับ
(a) แบบโคไซล์เดี่ยว (Single Cosine) จากแหล่งกำเนิดที่เป็นแบบจุด (Point source)
(b) ผลรวมของทุกๆ Cosine ที่อยู่เหนือแหล่งกำเนิด 17

3.2 ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของ
(a) แหล่งกำเนิดที่แผ่ฟลักซ์ไอ
(b) แหล่งกำเนิดที่แผ่ฟลักซ์ไอจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบ
(c) ฟลักซ์ไอที่ตกลงบนแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบ ซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมที่จุด A
และมีลักษณะเป็นวงรีที่จุด B 18

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.3 การกระจายตัวของไอจากแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะแตกต่างกัน

(a) dimple boat ขนาด 40x10 มม^2

(b) dimple boat ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มม. และลึก 3 มม.

(c) ลวดยาว 40 มม. พันเป็นขดยาว 6,10 มม.

(d) ครูซิเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 10 มม. และสูง 12 มม. 22

3.4 สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficients) ใช้วัดหาค่าฟลักซ์ไอ

สำหรับอะลูมินัมที่ได้รับความร้อนจาก Electron bem heated source 23

3.5 การกระจายตัวที่ไม่เสถียร ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดความหนาสำหรับไออะลูมินัม

ที่ได้รับความร้อนจาก Electron beam heated source 24

3.6 แสดงการกระจายตัวของฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งระเหย 25

3.7 แสดงระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีระเหยร่วม 29

3.8 แสดงโครงสร้างภายในของแหล่งระเหย 30

3.9 แสดงแผนผังการควบคุมอุณหภูมิของแหล่งระเหยและฮีทเตอร์ 30

3.10 กระบวนการเกิดของฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$

(a) การเกิดปฏิกิริยาขั้นเริ่มต้น

(b) เกิด $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ และ Cu_zSe

(c) เกิดชั้นของ $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ ในทิศตั้งฉากกับระนาบของแผ่นวัสดุรองรับ

(d) การเปลี่ยนรูปของ Cu_zSe และเกิดเป็นฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ ในแนวระนาบ 32

4.1 แสดงการเลี้ยวเบนและทางเดินของรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขของแบรกก์ 35

4.2 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ 38

4.3 แสดงเครื่อง Diffractometer ที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS

(จากภาควิชา ธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.4 แสดงโครงสร้างของกล้อง SEM (Scanning Electron Microscopy) 40

4.5 แสดงผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของตัวอย่าง 40

4.6 แสดงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับ
อะตอมของตัวอย่าง 41

4.7 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ 42

4.8 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีขั้วความร้อน 44

4.9 แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นเอง 45

4.10 แสดงระบบและกระบวนการสปัตเตอริงอย่างง่าย 46

4.11 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มบางแบบวิธีการระเหย 48

4.12 (a) ไดอะแกรมแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นภายใต้การแผ่รังสี
จากดวงอาทิตย์
(b) วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ 49

4.13 (a) ความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้
สภาพการฉายแสง
(b) ส่วนกลับ (Inverse) ของกราฟ (a) 51

4.14 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์
รวมทั้งความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชันต์ 52

5.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงาน 55

5.2 แสดงแหล่งระเหยที่สร้างขึ้นมา 57

5.3 แสดงชุดระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS 57

5.4 แสดงโครงสร้างของฮีทเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับ
และแผนภาพการควบคุมอุณหภูมิของฮีทเตอร์ 59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.5 กราฟแสดงอุณหภูมิ TC1,TC2 และ TC3 59

5.6 แสดงวิธีการหาอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแอ่น 60

5.7 กราฟแสดงอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแอ่น 61

5.8 แสดงฟิล์มบาง Cu ทั้งหมด 14 แถบ ที่เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ 62

5.9 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) ของฟิล์มบาง Cu 63

5.10 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิ 1,001 C. 63

5.11 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งยังไม่ได้ปรับตำแหน่ง
เข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหย 64

5.12 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งปรับตำแหน่งเข้าสู่
ศูนย์กลางของการระเหยแล้ว 64

5.13 กราฟแสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ
ซึ่งปรับตำแหน่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหยแล้ว 65

5.14 กราฟแสดงความสมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ของแหล่งระเหย Cu 67

5.15 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิของการเตรียมฟิล์มบาง CIGS 72

5.16 กราฟโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS ที่วัดได้

(ก) จุดที่ 1 ของผลึกมาตรฐาน CIGS

(ข) จุดที่ 2 ของผลึกมาตรฐาน CIGS

(ค) จุดที่ 3 ของผลึกมาตรฐาน CIGS 75

5.17 กราฟโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS ที่ตัดพื้นที่ของพื้นหลังออกไปแล้ว..... 77

5.18 กราฟโฟตอนรังสีเอกซ์วัดที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.19 แสดงตำแหน่งที่วัดสโฟตอนรังสีเอกซ์ตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS 81

5.20 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS2 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 83

5.21 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS3 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 83

5.22 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS4 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 84

5.23 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CIGS2

$\frac{Cu}{In+Ga} = 0.56$ และ $\frac{Ga}{In+Ga} = 0.27$ 85

5.24 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CIGS3

$\frac{Cu}{In+Ga} = 0.56$ และ $\frac{Ga}{In+Ga} = 0.18$ 86

5.25 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CIGS4

$\frac{Cu}{In+Ga} = 0.56$ และ $\frac{Ga}{In+Ga} = 0.25$ 86

5.26 แสดงวิธีการตรวจสอบหาด้านที่ไม่มีดีบุกเคลือบของกระจกโซดาไลม์ 88

5.27 ลักษณะการวางแผ่นวัสดุรองรับแบบวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (BALZER BAE 250) 89

5.28 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยกระบวนการเคลือบแบบอาบสารเคมี 90

5.29 แสดงการส่งผ่านแสง (Transmission,%) ของฟิล์มบาง ZnO/ZnO(Al) ที่เคลือบบนกระจก 91

5.30 ลักษณะการวางแผ่นวัสดุรองรับแบบวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (BALZER BAE 250) ... 92

5.31 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ชนิดฟิล์มบาง CIGS2 93

5.32 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ชนิดฟิล์มบาง CIGS4 93

5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ เพื่อหาค่า b ใหม่ของแหล่งระเหย Cu..... 96

5.34 แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการเตรียมฟิล์มบาง CIGS35,CIGS42,CIGS46 และ CIGS50 98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.35 กราฟแสดงอัตราส่วน $\frac{Cu}{In+Ga}$ และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS 102

5.36 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS35 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 102

5.37 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS36 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 103

5.38 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS37 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 103

5.39 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS38 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 103

5.40 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS39 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 104

5.41 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS42 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 104

5.42 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS46 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 104

5.43 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS48 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 105

5.44 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS50 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 105

5.45 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS35 .. 106

5.46 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS36 .. 107

5.47 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS37 .. 107

5.48 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS38 .. 107

5.49 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS39 .. 108

5.50 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS42 .. 108

5.51 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS46 .. 108

5.52 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS48 .. 109

5.53 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS50 .. 109

5.54 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดฟิล์มบาง CIGS35,36,37,38,39,42,46,48 และ 50 112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ 115

5.56 แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการเตรียมฟิล์มบาง CIGS25,26,29,30,31,32 และ 33 117

5.57 กราฟแสดงอัตราส่วน $\frac{Cu}{In+Ga}$ และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS 120

5.58 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS25 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 121

5.59 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS26 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 121

5.60 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS29 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 121

5.61 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS30 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 122

5.62 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS31 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 122

5.63 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS32 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 123

5.64 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS33 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM 123

5.65 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS25 124

5.66 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS26 125

5.67 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS29 125

5.68 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS30 126

5.69 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS31 126

5.70 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS32 126

5.71 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS33 127

5.72 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS25,26,29,30,31,32 และ 33 129

5.73 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน $\frac{Cu}{In+Ga}$ กับ η และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ กับ η ของฟิล์มบาง CIGS ที่นำมาเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ 130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ก.1 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ n=1 ของแหล่งระเหย Cu 144

ก.2 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ n=2 ของแหล่งระเหย In 144

ก.3 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ n=1 ของแหล่งระเหย Ga 145

ก.4 กราฟแสดงข้อมูลดิบของอัตราการเคลือบฟิล์มบางกับข้อมูลที่คำนวณจากสมการ (ก.3) ได้ n=1 ของแหล่งระเหย Se 145

ข.1 แสดงการเกิดการแทรกสอดบนฟิล์มบางจากแสงโซเดียมด้วยวิธีโทลันสกี 146