

การปลูกผลึกและการศึกษาลักษณะเฉพาะ
ของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมแมกนีเซียมไดซีลีไนต์

เรือโท ทวี ดีจะมาลา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

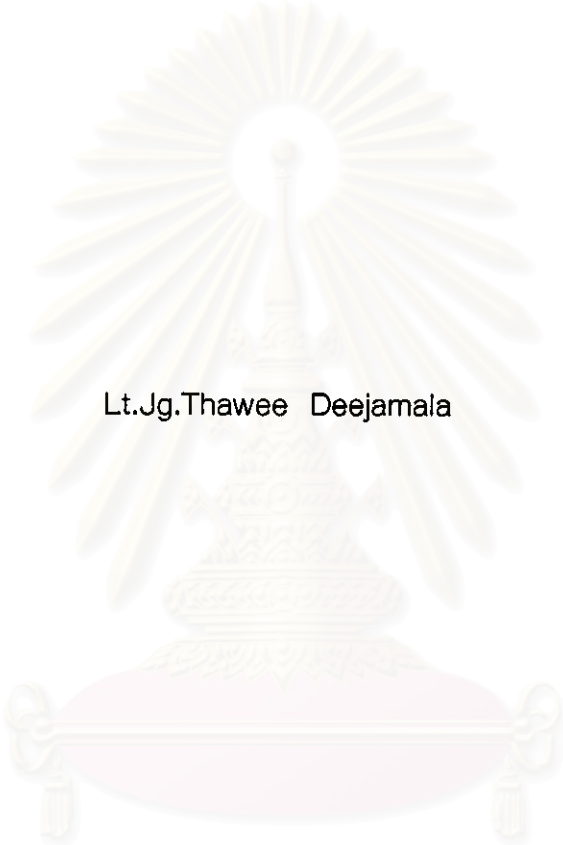
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-739-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CRYSTAL GROWTH AND CHARACTERIZATION
OF COPPER INDIUM GALLIUM DISELENIDE SEMICONDUCTOR



Lt.Jg.Thawee Deejamala

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics
Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-332-739-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูกผลึกและการศึกษาลักษณะเฉพาะ

ของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมแมกนีเซียมไดซัลไฟด์

โดย

เรือโท ทวี ดิจะมาลา

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภากรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี

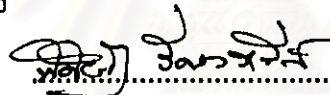
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์

ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

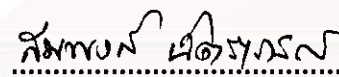

.....รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนันต์ชัย คงจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ

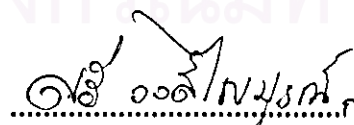
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิศิษฐ์ รัตนวารักษ์)


.....กรรมการ

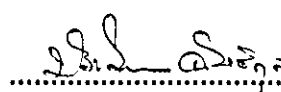
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภากรณ์)


.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)


.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิ วงศ์ไชยบูรณ์)


.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ ฉันทิกุล)

ทวี ดิจะมาลา : การปลูกผลึกและการศึกษาลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดเซลิไนด์ (CRYSTAL GROWTH AND CHARACTERIZATION OF COPPER INDIUM GALLIUM DISELENIDE SEMICONDUCTOR)

อ.ที่ปรึกษา : ผศ.สมพงศ์ ฉัตรภรณ์ , อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.ชจรยศ อยู่ดี,
146 หน้า. ISBN 974-332-739-8.

ผลึกสารกึ่งตัวนำ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ x ประมาณ 0.1 และ 0.2 ปลูกจากสภาวะหลอมเหลวโดยวิธีไคเรกซ์นัลพริซซิง ของบริดจ์แมนแบบแนวนอน ระบายที่แสดงบริเวณผิวหน้าเปิดเป็นระนาบ (112) จากการวิเคราะห์ EDS พบว่าค่าปริมาณ Ga มีแนวโน้มลดลง และปริมาณ Cu มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปลายจุดที่เย็นก่อนไปยังปลายจุดที่เย็นหลัง ค่าคงที่โครงผลึก a และ c เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Ga ลดลง จากการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องพบว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1.04 eV ที่ x ประมาณ 0.1

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องโดยวิธี แวนเดอเพอร์ พบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 0.29 ถึง 13.1 Ohm-cm สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์วัดที่อุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 6.8 ถึง 51.7 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ผลึกที่ได้ให้ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดที่ทั้งหมดด้วยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของผลึกตัวอย่างหนึ่งที่ x ประมาณ 0.1 วัดที่อุณหภูมิจาก 100K ถึง 327K ทราบว่า ทั้งสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นของพาหะเปลี่ยนแปลงไปกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะกับอุณหภูมิตสอดคล้องกับการกำหนดให้มีสถานะผู้รับที่มีระดับพลังงานไอออนไนซ์ขนาด 72.3 meV เหนือขอบแถบเวเลนซ์ และการเปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เกิดจากกลไกการกระเจิงของพาหะโดยแอคคูสติคโฟนอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมพงศ์ ฉัตรภรณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชจรยศ อยู่ดี

3970608823 : MAJOR PHYSICS
KEY WORD:

CRYSTAL GROWTH / CHARACTERIZATION

THAWEE DEEJAMALA ,Lt.Jg : CRYSTAL GROWTH AND CHARACTERIZATION
OF COPPER INDIUM GALLIUM DISELENIDE SEMICONDUCTOR. THESIS

ADVISOR : ASSIST. PROF. SOMPHONG CHATRAPHORN. THESIS

CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. KAJORN YOD YOODEE, Ph.D.

146 pp. ISBN 974-332-739-8.

Single crystals of the $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ semiconducting compound were grown from the melt by directional freezing method, using the horizontal Bridgman technique, where x is approximately 0.1 and 0.2. The top free surfaces of all obtained crystals are normally the (112) plane. From EDS analysis of CIGS samples from various parts of the crystal the Ga content tends to decrease from the first to freeze end towards the last to freeze end and the Cu content tends to increase from the first to freeze end towards the last to freeze end. The lattice constants a and c increase while Ga content tends to decrease. The energy gap of about 1.04 eV, where x is approximately 0.1, was obtained from optical absorption measurement

From resistivity measurement at room temperature by Van der Pauw method, we found that the resistivity of crystals grown is in the range from 0.29 to 13.1 Ohm-cm. The Hall effect measurement at room temperature indicated that the Hall mobility of as-grown crystals are in the range from 6.8 to 51.7 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ with p type conductivity. On one sample, Hall effect were measured from 100K to 327K, variation of resistivities, where x is approximately 0.1., Hall mobilities and their carrier concentrations with temperatures were obtained. The relation between the carrier concentration and temperature agreed with an acceptor level of 72.3 meV ionization above the valence band edge. The change of Hall mobilities with temperature was brought about by scattering mechanism, namely, acoustic phonon scattering.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... Physics.....

สาขาวิชา..... Physics.....

ปีการศึกษา..... 1999.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศ.ดร. สอภพงษ์ ชัยทรงภรณ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ศ.ดร. ยอเดอ โยเดอ



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชจรยศ อยุธยา ที่ได้ให้คำแนะนำ ติดตามและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ พงษ์ ทรงพงษ์ และอาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ที่ได้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ และให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาทำการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณกองทัพอากาศที่ให้โอกาสผู้เขียนได้ศึกษา และทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ เขียวพิมพา เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาธรณีวิทยาที่ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์เป็นอย่างดี

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องที่ให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. โครงสร้างผลึก และโครงสร้างแถบพลังงาน.....	5
โครงสร้างผลึกของ CIGS.....	6
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากระนาบผลึก.....	7
ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่แลตทิส.....	8
ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นสะท้อนของระนาบต่างๆ ในโครงผลึก....	9
การคำนวณค่าคงที่แลตทิส.....	11
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด และ EDS	14
โครงสร้างแถบพลังงานของ CIGS.....	20
3. สมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	22
สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	22
ทฤษฎีการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	22
กฎการเลือกในการดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน.....	25
การดูดกลืนแสงแบบตรง.....	26
หลักการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	28

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4. สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	29
การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กทรินสิก.....	29
ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน.....	30
สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก.....	32
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินสิก.....	34
สภาพเคลื่อนที่ได้.....	41
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	44
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพอร์.....	47
ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	48
5. การทดลอง.....	52
การปลูกผลึกของ CuInSe_2 (CIS) และ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS)..	53
ศึกษาเฟสไดอะแกรม.....	54
เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	55
การทำโปรไฟล์เดาเทอโมสสารปลูกผลึก CIGS.....	57
วัสดุที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	58
การเตรียมการบรรจุสาร และทำสุญญากาศหลอดบรรจุสาร.....	60
โปรแกรมอุณหภูมิการปลูกผลึก CIGS.....	62
การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ CIGS	65

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
การเตรียมผลึกเพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะ.....	68
การเตรียมผลึกเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้าง.....	69
การเตรียมผลึกเพื่อศึกษาหาส่วนประกอบ.....	69
การเตรียมผลึกเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	71
การเตรียมผลึกเพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง.....	72
การศึกษาสมบัติเฉพาะของ CIGS.....	73
การศึกษาโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	73
การศึกษาหาส่วนประกอบของ CIGS.....	74
การศึกษาสมบัติเชิงแสงของ CIGS.....	75
การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของ CIGS.....	76
6. ผลการทดลอง.....	78
ผลการศึกษาหาส่วนประกอบของ CIGS.....	78
ผลการศึกษาหาโครงสร้างผลึก CIGS.....	97
ผลการศึกษาสมบัติเชิงแสงของ CIGS.....	109
ผลการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของ CIGS.....	117
7. สรุปผลการทดลอง.....	124
รายการอ้างอิง.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	130

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึก คล้ายเพชร	5
2.2 รูปเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ กลุ่ม II-VI กับโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ กลุ่ม I-III-VI ₂	6
2.3 รูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไข ของแบรกก์	7
2.4 ตารางความสัมพันธ์ของระนาบในโครงผลึกของซิงค์เบลนด์กับ ซาลโคไฟไรท์.....	10
2.5 เพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของCuIn _{1-x} Ga _x Se ₂ ที่x = 0.44 .	13
2.6 กราฟค่า Lattice constant , a กับปริมาณ Ga/(Ga+In).....	13
2.7 กราฟค่า Lattice constant , c กับปริมาณ Ga/(Ga+In).....	14
2.8 ภาพสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากอันตรกิริยาบนผิวขึ้นตัวอย่าง.....	16
2.9 ภาพการเกิดรังสีเอกซ์เรืองแสง.....	17
2.10 ภาพเส้นหลัก K,L,M และ N ของธาตุต่างๆ.....	18
2.11 ภาพการแยกของแถบวาเลนซ์ของผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ที่จุด Γ ..	20
2.12 ภาพโครงสร้างแถบพลังงานของ CuGaSe ₂ และ CuInSe ₂	21
3.1 ภาพการดูดกลืนแสงแบบตรง.....	27
3.2 ภาพแสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	28
4.1 ภาพแสดงสารเจืออินเดียมในเยอรมาเนียม.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ไตอะแกรมแถบพลังงาน ความหนาแน่นของสถานะ	
ฟังก์ชันเฟอร์มี-ไดแรก และความหนาแน่นพาหะอิสระ ตามลำดับ.....	31
ก. สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	
ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี	
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับ	
ส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	40
4.4 ภาพกลไกย่อยและกลไกรวมที่เกิดขึ้นภายใน GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ..	44
4.5 ภาพตำแหน่งของข้อสัมผัสวีวีดีปลายแหลมสี่ขั้วแนวเส้นตรง.....	45
4.6 ก. ภาพแสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวอย่าง.....	47
ข. ภาพแสดงการเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป	
4.7 ภาพปรากฏการณ์ฮอลล์.....	49
5.1 ภาพแผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	52
5.2 ภาพเฟสเชิงคู่เทียบ.....	54
5.3 ภาพเดาหลอมสารในการปลูกผลึก.....	55
5.4 ภาพระบบควบคุมการทำงานของเตา.....	57
5.5 กราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตา.....	58
5.6 ภาพระบบการทำสุญญากาศหลอดบรรจุสาร	61
5.7 กราฟโปรแกรมอุณหภูมิการปลูกผลึก CIGS3.....	62
5.8 โปรแกรมอุณหภูมิการปลูกผลึก CIGS10	63

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 กราฟโปรแกรมนอกหมึกการปลูกผลึก CIGS11	63
5.10 กราฟโปรแกรมนอกหมึกการปลูกผลึก CIGS12.....	64
5.11 กราฟโปรแกรมนอกหมึกการปลูกผลึก CIGS13	64
5.12 แผนภาพแสดงช่วงเวลาในการเย็นตัวของผลึกสารกึ่งตัวนำCIGS ...	67
5.13 ภาพแผ่นผลึกที่ตัดด้วยเครื่องตัดงอ หนาประมาณ 1 มม. และ พื้นที่ประมาณ 1 cm ²	68
5.14 ภาพ बैสสารที่ใช้ศึกษาโครงสร้าง.....	69
5.15 ภาพตัวอย่างที่จะนำไปศึกษาหาปริมาณสาร.....	70
5.16 ภาพฐานรองชั้นผลึก สำหรับศึกษาสมบัติไฟฟ้า.....	71
5.17 ภาพแสดงโครงสร้างระบบ EDS	74
5.18 ภาพระบบเครื่องวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	75
5.19 ภาพแสดงการตรวจวัดชนิดการนำไฟฟ้าด้วยขั้วความร้อน.....	76
5.20 ภาพระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	77
6.1 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/1.....	78
6.2 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/2.....	79
6.3 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/4.....	79
6.4 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/5	80
6.5 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/6.....	80
6.6 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/7.....	81
6.7 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/8.....	81

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/9.....	82
6.9 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/10.....	82
6.10 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/11.....	83
6.11 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS10/F.....	83
6.12 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS10/L.....	84
6.13 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS11/F.....	84
6.14 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS11/M.....	85
6.15 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS11/L.....	85
6.16 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS12/F.....	86
6.17 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS12/M.....	86
6.18 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS12/L.....	87
6.19 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/1.....	87
6.20 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/2.....	88
6.21 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/3.....	88
6.22 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/4.....	89
6.23 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/5.....	89
6.24 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/6.....	90
6.25 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/7.....	90
6.26 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Cu/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS3	92

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.27 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Ga/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS3.....	92
6.28 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Cu/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS10.....	93
6.29 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Ga/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS10.....	93
6.30 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Cu/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS11.....	94
6.31 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Ga/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS11.....	94
6.32 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Cu/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS12.....	95
6.33 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Ga/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS12.....	95
6.34 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Cu/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS13.....	96
6.35 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Ga/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเย็บตัวของผลึก CIGS13.....	96
6.36 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS3/1.....	98
6.37 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS3/4.....	98

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.38 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS3/5.....	99
6.39 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS3/6.....	99
6.40 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS3/10.....	100
6.41 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS3/11.....	100
6.42 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS10/F.....	101
6.43 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS10/L.....	101
6.44 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS12/F.....	102
6.45 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS12/M.....	102
6.46 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS12/L.....	103
6.47 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS13/1.....	103
6.48 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS13/4.....	104
6.49 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS13/7.....	104
6.50 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับ ตำแหน่งการเยื้องตัวของผลึกของ CIGS3.....	106
6.51 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับ ตำแหน่งการเยื้องตัวของผลึกของ CIGS10.....	106
6.52 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับ ตำแหน่งการเยื้องตัวของผลึกของ CIGS12.....	107
6.53 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับ ตำแหน่งการเยื้องตัวของผลึกของ CIGS13.....	107

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.54 กราฟสัญญาณแสงตกกระทบผลึก (I_o)	109
6.55 กราฟสัญญาณแสงที่ผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/1 ที่อุณหภูมิห้อง.....	110
6.56 กราฟสัญญาณแสงที่ผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	110
6.57 กราฟสัญญาณแสงที่ผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/8 ที่อุณหภูมิห้อง.....	111
6.58 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS3/1 ที่อุณหภูมิห้อง.....	111
6.59 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS3/7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	112
6.60 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS3/8 ที่อุณหภูมิห้อง.....	112
6.61 กราฟสัญญาณแสงที่ผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/1 ที่อุณหภูมิ 12K.....	113
6.62 กราฟสัญญาณแสงที่ผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/7 ที่อุณหภูมิ 12K.....	113
6.63 กราฟสัญญาณแสงที่ผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/8 ที่อุณหภูมิ 12K.....	114
6.64 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS3/1 ที่อุณหภูมิ 12K.....	114
6.65 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS3/7 ที่อุณหภูมิ 12K.....	115
6.66 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS3/8 ที่อุณหภูมิ 12K.....	115
6.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะกับอุณหภูมิ..	121
6.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเคลื่อนที่ได้กับ $T^{-1/2}$	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าเวลาอิสระเฉลี่ยและสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะที่ได้จากการกระเจิง	43
5.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการปลูกผลึกในแต่ละหลอด.....	60
6.1 แสดงปริมาณสารที่เป็นส่วนประกอบของผลึก CIGS.....	91
6.2 แสดงค่า Lattice constant.....	105
6.3 ผลเปรียบเทียบค่า $Ga/(Ga+In)$ ที่ได้จาก การวัดด้วย EDS กับ ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 2.17	108
6.4 แสดงผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีชี้ความร้อน.....	117
6.5 แสดงค่าของ ρ , μ_H และ p ของผลึก CIGS วัดที่อุณหภูมิห้อง.....	118
6.6 แสดงค่าของ ρ , μ_H และ p ของผลึก CIGS วัดที่อุณหภูมิต่างๆ.....	120

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย