

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ
คอปเปอร์อินเดียมไคซีไลนด์ (CuInSe₂)



นายฐิตินัย

แก้วแดง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ศูนย์วิทยุโทรทัศน์
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2530

ISBN 974-567-490-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

012794

I 1029AA18

Preparation and Study of Some Properties
of CuInSe_2 Semiconductor

Mr. Thitinai Gaewdang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1987

ISBN 974-567-490-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์
อินเดียมไคซีไนด์ (CuInSe₂)

โดย นายฐิตินัย แก้วแดง

ภาควิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตร ภาณ
อาจารย์ คร.ชจรยศ อัยคี่



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรานัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร เส็งทะทันต์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒน ภาชนะนันท์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตร ภาณ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ คร.ชจรยศ อัยคี่)

Thesis Title Preparation and Study of Some Properties of
CuInSe₂ Semiconductor
Name Mr. Thitinai Gaewdang
Thesis Advisor Assistant Professor Somphong Chatraphorn
Dr. Kajornyod Yoodee
Department Physics
Academic Year 1986

ABSTRACT

The crystalline bulk of the semiconducting compound CuInSe₂ were prepared from the melt by directional freezing method using both horizontal Bridgman-Stockbarger travelling furnace and temperature gradient freezing 45 degree tilt-furnace techniques. The as-grown ingots of the compound contained single crystal grains up to 10 x 5 x 3 mm³. The conductivity types are either p-type or n-type with low resistivity values in the range 0.1-10 Ω-cm. The crystal structure was found to be tetragonal chalcopyrite structure with lattice parameters $a = 5.794 \text{ \AA}$, $c = 11.588 \text{ \AA}$, and $c/a = 2.00$. The optical absorption spectrum of CuInSe₂ at room temperature showed the fundamental energy gap to be direct at 1.03 eV. The contact of In-Sn-Cd alloy (44 : 42 : 14) on both types of CuInSe₂ gave good ohmic contact conditions after annealing at 500°C for 20 minutes in H₂ atmosphere. I-V characteristic using pulsed current method showed

no sign of blocking at current density of approximately 50 A/cm^2 .
as at room temperature down to liquid nitrogen temperature.
From electrical conductivity measurement the ionization energy of
intrinsic impurity levels of 20 meV, 100 meV, 414 meV in p-type
samples and 6 meV, 52 meV, 410 meV in n-type samples were
obtained.



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรธาณัม และอาจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนช่วย แก้ไขปัญหาและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่ง จาก ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต รองศาสตราจารย์ จงอร พิธานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล และคณะผู้วิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหา วิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ และอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณนพพล สุทธิศิริ และคุณวิทยา อมรกิจบำรุง นิสิตโปรแกรม ปรินญาคุณภูมิบัณฑิตที่ช่วยแนะนำวิธีการใช้ เครื่องมือและออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย รวมทั้ง คุณโอฬาร บัวผ่อง และคุณคุณภูมิ แสงผัด เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ หน่วยวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ช่วยสร้างเตาหลอมสารที่ใช้อุณหภูมิสูง เพื่อการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนนิสิตโปรแกรมปรินญาคุณภูมิบัณฑิต อันได้แก่ คุณพงษ์ ทรงพงษ์ คุณธนา สุทธิโอกาส คุณวิชิต ศิริโชติ คุณงามนิตย์ วงษ์เจริญ คุณกัลยา เอี่ยมประเสริฐศักดิ์ ซึ่งทุกท่านมีส่วนช่วยให้เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์ และบริษัท เยนเนอร์ลีโอเล็คทริก ที่ได้ มอบอุปกรณ์การทดลองจำนวนหนึ่งรวมทั้ง เครื่องกำเนิดสัญญาณเป็นพัลส์สำหรับใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยภายใต้โครงการพัฒนาหน่วยวิจัย (Unit Cell) จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ท้ายสุดขอขอบคุณต่อทบวงมหาวิทยาลัย ๔ ซึ่งได้พิจารณาให้ทุนในโครงการผลิต และพัฒนาอาจารย์แก่ผู้เขียนในการศึกษาระดับปรินญาคุณภูมิบัณฑิตครั้งนี้



สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 สารกึ่งตัวนำ.....	4
2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ.....	5
2.1.1 ผลึกกึ่งตัวนำของธาตุเดี่ยว.....	5
2.1.2 ผลึกกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่.....	6
2.1.3 ผลึกกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงสาม.....	6
2.1.4 โลหะผสมกึ่งตัวนำ.....	7
2.2 โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ.....	8
2.2.1 โครงสร้างแบบเพชร.....	9
2.2.2 โครงสร้างแบบสฟาลเลอร์ไรต์หรือซิงค์เบลนด์....	10
2.2.3 โครงสร้างแบบซาลโคไฟไรต์.....	11
บทที่ 3 สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์.....	13
3.1 เฟสไดอะแกรม.....	13
3.2 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ.....	15
3.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการนำไฟฟ้า.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึก.....	21
3.5 การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	22
บทที่ 4 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำจากสภาวะหลอมเหลว.....	25
4.1 หลักในการพิจารณาโดยทั่ว ๆ ไป.....	26
4.2 วิธีไตเรกซ์นัลฟริชชิง.....	27
4.2.1 วิธีของบริคจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์.....	28
4.2.2 วิธีลคองทงูมิ.....	31
บทที่ 5 การศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	32
5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากผลึก.....	32
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของ โครงผลึก.....	34
5.3 ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนของระนาบต่าง ๆ ในผลึก.....	34
บทที่ 6 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	36
6.1 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง.....	36
6.2 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	40
บทที่ 7 สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	42
7.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน..	43
7.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิค.....	45
7.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิค.....	46
7.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	50
7.3.1 วิธีวัดโดยตรง.....	50
7.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว.....	51
7.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง.....	52
7.3.4 วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน.....	54
7.3.4.1 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	54
7.3.4.2 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู.....	54
7.3.4.3 ขั้วสัมผัสอยู่คานบน-คานล่าง.....	54
7.3.4.4 วิธีแวนเคอเพาว์.....	55
7.3.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเคอเพาว์... ..	56
บทที่ 8 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	58
8.1 แบบจำลองของข้อต่อคก.....	58
8.2 ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน.....	60
8.3 ผลของข้อต่อคก.....	66
8.4 กระแสที่เกิดจากการลอดผ่านกำแพงศักย์.....	68
8.5 รอยต่อแบบโอห์มมิก.....	70
8.6 การหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	73
บทที่ 9 วิธีการทดลองและผลการทดลอง.....	79
9.1 การเตรียมผลึก.....	79
9.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผลึก.....	79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.1.1.1	ส่วนประกอบของระบบเตาเลื่อน..... 82
9.1.1.2	ส่วนประกอบของระบบเตาในแนวเฉียง 45 องศา..... 83
9.1.2	การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร..... 84
9.1.2.1	การทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์ ก่อนบรรจุธาตุ..... 85
9.1.3	การขึ้นและบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วควอทซ์..... 86
9.1.3.1	การหลอมปิดแก้วควอทซ์..... 87
9.1.4	ขั้นตอนและรายละเอียดในการเตรียมผลึก..... 888
9.1.4.1	การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ด้วยวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์... 88
9.1.4.2	การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 45 องศา..... 90
9.1.5	ลักษณะของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์..... 91
9.1.6	ลักษณะของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 45 องศา.... 92
9.1.7	การตัดผลึกด้วยเครื่องสตัดริงชอ..... 93
9.1.8	การขัดชิ้นผลึก..... 95
9.1.9	การกัดผิวหน้าของชิ้นผลึกด้วยสารละลายเคมี..... 97
9.2	ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก..... 99
9.2.1	การเตรียมผลึกผง..... 99
9.2.2	การคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก..... 100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.3 ขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน.....	101
9.3.1 การเตรียมชั้นสารและกวาดติดตั้งเพื่อวัดสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสง.....	102
9.3.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	104
9.3.3 การหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน.....	105
9.4 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	108
9.4.1 การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชี้ ความร่อน.....	108
9.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์	109
9.5 การศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโฮมมิก.....	112
9.5.1 การเตรียมแผ่นรองชั้นสาร.....	113
9.5.2 รายละเอียดในการทดลองและผลการทดลอง....	116
 บทที่ 10 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	 134
เอกสารอ้างอิง.....	138
ภาคผนวก.....	148
 ประวัติผู้เขียน.....	 157

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของ $CuInSe_2$ ที่เกิดจากชนิดของขอบ บกพร่องของผลึกซึ่งเป็นกรณีที่ Δx น้อยกว่าศูนย์.....	19
3.2	แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดขอบบกพร่องชนิดต่าง ๆ ของผลึก $CuInSe_2$	20
3.3	แสดงค่าของระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับของ $CuInSe_2$ ซึ่ง เกิดจากขอบบกพร่องของผลึกแบบต่าง ๆ.....	21
3.4	แสดงชนิดของสารละลายเคมีและวิธีปฏิบัติเพื่อทำความเข้าใจ หน้าแผนผลึก $CuInSe_2$	22
3.5	แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิก	23
7.1	แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัส ที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน.....	55
9.1	แสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้ และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ของการหลอมสาร $CuInSe_2$	86
9.2	แสดงชนิดและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้จากวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ ยกเว้น สารหมายเลข S6 ซึ่งเตรียมขึ้นจากวิธีลควอนทุมิ คาโนแนวเฉียง 45 องศา.....	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
9.3	แสดงผลของการศึกษารอยต่อแบบโอทัมมิระหว่างโลหะผสม ของอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$	121
9.4	แสดงคาพลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเอง เนื่องจากความบกพร่องของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$	122

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบสำหรับสาร	
ก) $AgIn_{(1-y)}Ga_yTe_{2(1-z)}Se_{2z}$	
ข) $(Cu_{1-x}Ag_x)(Ga_{1-y}In_y)(Se_{1-z}Te_z)$	7
2.2 แสดงพันธะสี่หน้า.....	8
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	9
2.4 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์.....	10
2.5 แสดงโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์.....	12
3.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se.....	14
4.1 แสดงลักษณะของภาชนะที่ใช้ในการเตรียมผลึกจากสภาวะหลอมเหลว	27
4.2 ก) แสดงเตาส่องโซลินในแนวตั้งเพื่อใช้เตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำ	
ข) แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ.....	29
4.3 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิในเตาโซลินเดี่ยว.....	30
5.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไขแบรกก์	33
6.1 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	40
7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิของ Si ที่มีความหนาแน่นของสิ่งเจือปน ชนิดผู้ให้เท่ากับ 10^{15} cm^{-3}	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.2 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสองขั้ว...	51
7.3 กราฟแสดงการเบี่ยงเบนเนื่องจากสาเหตุของรอยต่อกับระยะทางระหว่างขั้วสัมผัส.....	52
7.4 แสดงตำแหน่งของขั้วสัมผัสตามวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรง.....	54
7.5 ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง..... ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด.....	56
7.6 แสดงแพ็คเกจราคาแกของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพาว์.....	57
8.1 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	59
8.2 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	60
8.3 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก. ขณะไม่มีการไบอัส ข. ขณะไบอัสตรง ค. ขณะไบอัสกลับทาง.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.4 แสดงการลดลงของกำลังที่จ่ายเนื่องจากสนามไฟฟ้า.....	67
8.5 แสดงการลดลงของกำลังที่จ่ายอันเนื่องมาจากผลของข้อตัก และทิศทางการไหลของกระแสผ่านกำลังจ่ายขณะไบอัสตรง...	69
8.6 แผนภาพแสดงกลไกการเกิดรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	72
8.7 ก. ภาพแสดงสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น- โลหะ ข. แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่สอดคล้องกับสิ่งประดิษฐ์ ในรูป ก.	73
8.8 แสดงทิศทางและขนาดของกระแสรีชาร์ดสันที่ไหลข้ามกำลังจ่าย ϕ_{B1} และ ϕ_{B2} ตามลำดับ ในขณะที่ไม่มีการให้ความต่างศักย์ แก่สิ่งประดิษฐ์.....	75
8.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ ดังรูปที่ 8.7 ก. ซึ่งทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) กับอุณหภูมิที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ.....	76
8.10 แสดงอุณหภูมิ T_s และ T_b ที่กระแสค่าคงที่ต่าง ๆ	77
8.11 แสดงการหาค่าความสูงของกำลังจ่ายจากกระแสรีชาร์ดสัน กับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.1	81
9.2	81
9.3	82
9.4	83
9.5	84
9.6	88
9.7	91
9.8	92
9.9	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.10 แสดงขึ้นผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ซึ่งเตรียมได้จากวิธีของ บริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ที่ตัดเป็นชิ้นบาง ๆ และบางชิ้นขัดด้วย กระดาษทรายละเอียด.....	94
9.11 แสดงขึ้นผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ซึ่งเตรียมขึ้นจากวิธีลด อุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 45 องศา และขัดผิวหน้าด้วย กระดาษทรายละเอียด สามารถมองเห็นขอบของเกรนได้ อย่างชัดเจน.....	94
9.12 แสดงผิวหน้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ซึ่งเตรียมได้จาก วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ (บน) และวิธีลดอุณหภูมิเตา ในแนวเฉียง 45 องศา (ล่าง) ที่ขัดเรียบร้อยแล้ว	96
9.13 แสดงผิวหน้าขึ้นผลึกของ $CuInSe_2$ กอนกัก (บน) และ หลังกักด้วยสารละลายเคมี (ล่าง).....	98
9.14 แสดงเส้นเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากผลึกผง $CuInSe_2$	100
9.15 แสดงแผนผังสำหรับการวัดการดูดกลืนแสงและระบบการตรวจวัด ด้วยเครื่องเปอร์กิน-เอลเมอร์ สเปกโตรมิเตอร์โมเดล 112..	104
9.16 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขนาดของช่องว่างแถบ พลังงานเมื่ออิเล็กตรอนมีการย้ายสถานะพลังงานเป็นแบบตรง..	107
9.17 แสดงการตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชี้ความร้อน...	108
9.18 กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของสารตัวอย่าง S8	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.19 ก. แสดงการเชื่อมต่อดจุดของ In บนชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe ₂	
ข. ภาพถ่ายแสดงของจริงที่ใช้ในการทดลอง.....	114
9.20 แสดงชั้นสารที่วางอยู่บนแผ่นรองและมีการเชื่อมต่อบริเวณ ของอินเดียม.....	114
9.21 แสดงวงจรรีโอมิเตอร์-ความต่างศักย์ของสิ่งประดิษฐ์ ในรูปที่ 9.19.....	115
9.22 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I ₀₁) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จาก กราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In กับ p-CuInSe ₂	123
9.23 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิที่กระแสคงที่ ค่าต่าง ๆ ของรอยต่อระหว่าง In กับ p-CuInSe ₂	124
9.24 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์จากกระแสรีชาร์ดสัน กับส่วนกลับของอุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง In กับ p-CuInSe ₂	125
9.25 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่ง เจือปนของ p-CuInSe ₂ จากกราฟระหว่างส่วนกลับ ของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	126

สารนิพนธ์ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
9.26	แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_{01}) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In กับ $n\text{-CuInSe}_2$	127
9.27	แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ ของรอยต่อระหว่าง In กับ $n\text{-CuInSe}_2$	128
9.28	แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์จากกระแสรีชาร์ดสันกับส่วนกลับของอุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง In กับ $n\text{-CuInSe}_2$	129
9.29	แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ $n\text{-CuInSe}_2$ จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชิ้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	130
9.30	แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd กับ $p\text{-CuInSe}_2$ ที่อุณหภูมิ 298 K และ 77 K.....	131
9.31	แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd กับ $n\text{-CuInSe}_2$ ที่อุณหภูมิ 298 K และ 77 K.....	132
9.32	แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ $p\text{-CuInSe}_2$ (บน) และ $n\text{-CuInSe}_2$ (ล่าง) จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชิ้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	133