

การปลูกผลึกและไฟโตรีเฟลกเทนซ์
ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

นาย คำเผย ชัยวงศ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974 - 633 - 072 - 1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Crystal Growth and Photoreflectance
of Copper Indium Diselenide

Mr. Khampheuy Sayavong

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

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974 - 633 - 072 - 1

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

คำเผย ชัยวงศ์ : การปลูกผลึกและโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (CRYSTAL GROWTH AND PHOTOREFLECTANCE OF COPPER INDIUM DISELENIDE) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.สมพงษ์ ฉัตรารณณ์, 163 หน้า. ISBN 974-633-072-1

การปลูกผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จากสถานะหลอมเหลวโดยวิธีโตเรกซ์ชั้นนำฟริชซิงของ ปริตจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์แบบแนวนอน ให้ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี ตามต้องการด้วยการ เติมหือลดปริมาณธาตุที่เป็นส่วนประกอบคือ Cu, In และ Se รวมทั้งการโคปด้วยสารประกอบ GaAs ในปริมาณ 0.3 at.% ของสารตั้งต้น CuInSe_2 การปลูกผลึกด้วยการเติมธาตุ Se หรือการโคป GaAs ลงในสารตั้งต้นได้ผลึกกึ่งตัวนำที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี ทำการปลูกผลึกจำนวน 10 ชุด ได้ผลึกกึ่ง ตัวนำที่มีสมบัติของความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากเพียง 1 ชุดคือ CISA3 ซึ่งปลูกจากการเติมด้วยธาตุ Se ได้ผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่พอสมควร (ประมาณ $22 \times 9 \times 5 \text{ mm}^3$) ระบายที่แสดงบริเวณผิวหน้าเปิดเป็น ระบาย (112) ส่วนผลึกที่เหลือที่เตรียมได้เป็นผลึกพหุพันธ์เกรนใหญ่

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึก พบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกค่อนข้างต่ำ คือ ใน ช่วง 4.7 ถึง $7.9 \Omega - \text{cm}$ ด้วยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของผลึก CISA3 ทราบว่า ทั้งสภาพ ต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นของพาหะเปลี่ยนแปลง กับการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะกับอุณหภูมิสอดคล้องกับการกำหนดให้มีสถานะผู้รับ ที่มีระดับพลังงานไอออนไนซ์ขนาด 58.5 meV เหนือขอบแถบเวเลนซ์และเป็นการโคปแบบชดเชยบางส่วน การ เปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เกิดจากกลไกการกระเจิงของพาหะโดยแอกคูสติกโฟนอน

การวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์จากสภาพพื้นผิวหน้าของชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ความหนา 1 mm และพื้นที่กว้างประมาณ 1 cm^2 และพื้นที่กว้างประมาณ 1 cm^2 ซึ่งได้ผ่านกระบวนการขัดเงา ได้ ยอดแหลมของสเปกตรัมซึ่งแสดงถึงการย้ายสถานะพลังงานของพาหะที่ระดับพลังงานสองช่วง ช่วงแรก ลักษณะสเปกตรัมสอดคล้องกับการย้ายสถานะจากระดับพลังงานสองระดับที่ใกล้กันมาตรงขอบของแถบ เวเลนซ์ซึ่งเกิดจากการแยกเนื่องจากสนามผลึกไปยังแถบการนำ การย้ายสถานะดังกล่าวนี้มีขนาด 1.015 eV และ 1.032 eV ที่อุณหภูมิห้อง และมีขนาด 1.033 eV และ 1.038 eV ที่อุณหภูมิ 12 K ในช่วงที่สองการย้ายสถานะเกิดขึ้นระหว่างแถบการนำกับระดับพลังงานที่เกิดจากการแยกของอันตรกิริยา สปิน-กับออร์บิต การย้ายสถานะที่มีขนาดพลังงาน 1.273 eV ที่ 30 K และ 1.280 eV ที่ 80 K

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2538

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C627252 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: CRYSTAL GROWTH/COPPER INDIUMDISELENIDE/PHOTOREFLECTANCE

KHAMPHEUY SAYAVONG : CRYSTAL GROWTH AND PHOTOREFLECTANCE OF COPPER INDIUM DISELENIDE. THESIS ADVISOR : ASSIS. PROF. SOMPHONG CHATRAPHORN. 163 pp. ISBN 974-633-072-1

The bulk crystalline of the CuInSe_2 semiconducting compound were grown from melt by directional freezing method, using the horizontal Bridgman-Stockbarger technique. The n or p type of conductivity of as-grown crystals can be controlled by introducing a slight excess or deficiency 0.3 at. % of CuInSe_2 in the melt. The p-type of the crystal grown from the melt by slight excess Se or doping with GaAs were obtained. Ten crystal growths were performed in this research work. One of those is the most perfect single crystal (CISA3). The single crystal as large as $22 \times 9 \times 5 \text{ mm}^3$ of dimension were obtained. Their top free surfaces are normally the (112) planes. The rest are large grain polycrystals.

By Van der Pauw method, we found that the resistivity of excess Se p-type as grown crystal are in the range from 4.7 to $7.9 \Omega\text{-cm}$. By Hall effect measurement of CISA3 sample, variation of resistivities, Hall mobilities and their carrier concentrations with temperatures were obtained. Carrier concentration and temperature relation agreed with an acceptor level of 58.5 meV ionization above the valence band edge and the doping is partially compensated. The change of Hall mobilities (crystal temperature dependence) caused from scattering mechanism, namely, acoustic phonon scattering.

Photoreflectance (PR) measurement of polished 1 cm^2 and 1 mm thick crystal cut from CISA3 sample, revealed two regions of PR spectra. The first region consistant with two transitions from two very closed levels at the top of the valence band, caused by crystal field splitting. These two transition energies are 1.015 eV and 1.032 eV at room temperature and 1.033 eV and 1.038 eV at 12 K . Another region, transition involves conduction band and the level caused by spin-orbit interaction. Energy of this transition is 1.273 eV at 30 K and 1.280 eV at 80 K .

ภาควิชา..... ฟิสิกส์

สาขาวิชา..... ฟิสิกส์

ปีการศึกษา..... 2538

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... สัมพงษ์ ฉัตรพรานนท์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี ที่ได้ให้คำแนะนำ ติดตามและควบคุม การวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ และอาจารย์ พงษ์ ทรงพงษ์ ที่ได้คำแนะนำ ต่างๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์ สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ ที่ช่วยเขียนโปรแกรมและประดิษฐ์อุปกรณ์ ควบคุมการทดลองบางอย่างพร้อมทั้งช่วยแนะนำการวัดฮอลล์อย่างใกล้ชิด อาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยุทธการ อาจารย์ ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน ที่ได้คำแนะนำในการเรียนรู้งานย่อยซึ่งเกี่ยวข้อง กับการทดลอง คุณณรงค์ แสงแก้ว ในความช่วยเหลือด้านการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ พร้อมทั้ง คณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาทำการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ ผู้เขียนได้รับการอนุเคราะห์ทุนการศึกษาจาก โครงการร่วมมือระหว่างประเทศ (Swiss - World Bank - Lao Cooperation) จึงใคร่ขอขอบพระ คุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณสถาบันโปลีเทคนิคเวียงจันทน์ (ส.ป.ป.ล) ที่ให้โอกาสผู้เขียนได้ศึกษาและ ทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ เขียวพิมพา เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาธรณีวิทยาที่ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสุนทร บัวเนตร์ และ เจ้าหน้าที่โรงช่าง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มีส่วนช่วยซ่อมอุปกรณ์การทดลอง

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ใน โครงการการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ ภรรยา และญาติพี่น้องที่คอยให้กำลังใจตลอด เวลาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์.....	5
สารกึ่งตัวนำ.....	5
1. ชนิดของสารกึ่งตัวนำ	6
2. โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ.....	8
3. โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	11
4. อิเล็กตรอนอิสระและโฮล.....	14
5. การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	15
6. แผนภาพเฟส.....	17
7. การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ.....	18
8. การเปลี่ยนแปลงสมบัติการนำไฟฟ้า.....	20
การทดลองและผลการทดลอง.....	22
1. การปลูกผลึก.....	22
อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	22
1. เตาหลอมสาร.....	22
2. ระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมสาร.....	24
การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร.....	26
การซังและบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วควอทซ์.....	28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2. (ต่อ)	
1. การหลอมปิดหลอดแก้วควอทซ์.....	29
การปลูกผลึกกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์	
ด้วยวิธีของบริดจ์แมน - สโตคบาร์เกอร์.....	30
การตัดผลึกด้วยเครื่องสตริงซอ.....	32
2. การตรวจสอบระนาบที่เกิดบริเวณผิวหน้าเปิด.....	33
การศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบน	
ของรังสีเอกซ์.....	33
1. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากผลึก.....	34
2. ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบ	
กับค่าคงที่แลตทิซ.....	35
3. ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน	
ของระนาบต่างๆในผลึก.....	36
การตรวจสอบโครงผลึกและการวิเคราะห์ผลการเลี้ยวเบน	
ของรังสีเอกซ์.....	38
3. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ CuInSe_2 ด้วยการทำให้ SEM.....	41
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
3. สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	54
ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน.....	54
1. สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก.....	56
2. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก.....	58
กรณีที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีค่าน้อย	
หรือที่อุณหภูมิสูง.....	64
กรณีที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีค่ามาก	
หรือที่อุณหภูมิต่ำ.....	65
สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล.....	69
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	73

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. (ต่อ) 1. วิธีวัดโดยตรง.....	73
2. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว.....	73
3. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง.....	74
4. วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน.....	75
5. การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพอร์.....	77
ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	79
วิธีทดลองและผลการทดลอง.....	81
1. การตรวจสอบลักษณะทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	81
การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีขั้วความร้อน.....	81
การเตรียมแผ่นรองขึ้นสาร.....	82
การทำรอยต่อโอห์มมิก.....	83
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพอร์.....	83
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จากระบบฮอลล์.....	86
2. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	95
4. สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของสารกึ่งตัวนำ.....	97
ทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตรีเฟลกแทนซ์.....	97
1. สเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ที่มอดูเลตและฟังก์ชันไดโอดิเล็กทริก.....	97
2. การแสดงความหมายโดยทั่วไปของฟังก์ชันไดโอดิเล็กทริก.....	99
3. การขยายเฉพาะที่ล้อมรอบจุดวิกฤตอยู่ในแบบจำลอง พาราโบลาเชิงเดี่ยว.....	100
4. ฟังก์ชันไดโอดิเล็กทริกที่มอดูเลต.....	103
5. ฟังก์ชันรูปทรงเส้นของสเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ ที่ไดโอดิเล็กทริกมอดูเลต.....	106

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. (ต่อ) การทดลองและผลการทดลอง.....	107
1. การเตรียมพื้นผิวของชิ้นผลึก.....	107
การขัดผิวหน้าของชิ้นผลึก.....	107
การเปิดผิวหน้าของชิ้นผลึกสารกึ่งตัวนำ.....	109
2. ระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์.....	109
3. การวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์.....	111
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	133
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	140
รายการอ้างอิง.....	143
ภาคผนวก.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	149

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงน้ำหนักของธาตุต่างๆที่คำนวณได้และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหลอมสาร CuInSe_2 28
2.2	แสดงน้ำหนักของธาตุและสารประกอบที่ใช้เติมและโด๊ป..... 29
2.3	แสดงความสัมพันธ์ของระนาบในโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์กับโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์..... 37
2.4	แสดงค่าคงที่แลตทิซของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่ปลูกได้ตามหมายเลข CISA1, CISA2, CISA3, CISA4, CISA5, CISA6 ปลูกจากการเติม Se CISB1, CISB2 ปลูกจากการโด๊ปสารประกอบ GaAs 40
3.1	ค่าเวลาอิสระเฉลี่ยและสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะที่ได้จากกลไกการกระเจิงชนิดต่างๆ..... 71
3.2	แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน..... 76
3.3	แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ CuInSe_2 84
3.4	แสดงชนิดและสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกกึ่งตัวนำที่ปลูกได้..... 85
3.5	แสดงข้อมูล ρ , μ_h และ n ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่วัดได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง..... 87
3.6	แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดฮอลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 89
4.1	แสดงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูลของยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 127
4.2	แสดงค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูลของยอดแหลมที่สามของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิต่างๆ 30, 40, 60 และ 80 K..... 133

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างสารกึ่งตัวนำโครงสร้างคล้ายเพชรในกลุ่มต่างๆ.....	8
2.2	โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	9
2.3	โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ ZnS.....	10
2.4	เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์กลุ่ม II-VI กับโครงสร้างผลึกแบบ ซาลโคไฟไรท์กลุ่ม I-III-VI ₂	11
2.5	แสดง 1-st Brillouin Zone ของโครงสร้างผลึกแบบเพชรและแบบซิงค์ซัลไฟด์.....	12
2.6	โครงสร้างแถบพลังงานของ Ge,Si และ GaAs ในรีดิวซีโชน.....	13
2.7	แสดงการแยกของแถบเวเลนซ์ของผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ที่จุด Γ	14
2.8	การเกิดคู่ของอิเล็กตรอนอิสระและโฮล ก) โดยอาศัยโครงสร้างพันธะ ข) โดยอาศัยโครงสร้างแถบพลังงาน.....	15
2.9	ก) โครงสร้างผลึก Ge มีอะตอมของสิ่งเจือปนกลุ่ม V แทรก ข) ระดับพลังงาน ของสิ่งเจือปนผู้ให้.....	16
2.10	ก) โครงสร้างผลึก Ge มีอะตอมของสิ่งเจือปนกลุ่ม III แทรก ข) ระดับพลังงาน ของสิ่งเจือปนผู้รับ.....	17
2.11	แสดงแผนภาพเฟสเชิงคู่เทียมของสารประกอบ CuInSe ₂	18
2.12	ภาพถ่ายเตาหลอมซึ่งประกอบด้วยกลไกที่ทำให้เตาสามารถเอียงตัวขึ้นลงได้ โดยอาศัยมอเตอร์เป็นเครื่องขับเคลื่อน.....	23
2.13	แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาหลอมโดยตั้งอุณหภูมิในกลางเตาให้เป็น 1200°C, 110°C, 1000°C และ 900°C.....	24
2.14	แสดงระบบที่ใช้ในการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe ₂	26
2.15	ภาพถ่ายแสดงแอมโพล์หลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุธาตุอยู่ข้างใน พร้อมที่จะนำไปหลอมได้.....	30
2.16	แผนกราฟแสดงการโปรแกรมอุณหภูมิเตาหลอมสำหรับการปลูกผลึก CuInSe ₂	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.17	ภาพถ่ายแสดงชั้นสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่ตัดเป็นชิ้นบางๆ ความหนาประมาณ 1 mm และเนื้อที่ประมาณ 1 cm^2	33
2.18	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไขของแบร็กก์.....	35
2.19	สดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3.....	44
2.20	แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกกึ่งตัวนำ CISA4.....	44
2.21	แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกกึ่งตัวนำ CISA5.....	45
2.22	แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกกึ่งตัวนำ CISA6.....	45
2.23	แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกกึ่งตัวนำ CISB1.....	46
2.24	แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกกึ่งตัวนำ CISB2.....	46
2.25	ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISA2 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ และเกิดมีหลุมเล็กๆในเนื้อสาร ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	47
2.26	ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	47
2.27	ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISA4 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	48
2.28	ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISA5 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	48
2.29	ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISA6 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	49
2.30	ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISB1 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ เนื้อสารค่อนข้างปลอดภัย ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 ภาพสภาพผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำ CISB2 ที่มีการซ้อนกันของระนาบเล็กๆ และเขตแบ่งชุดระนาบ ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	50
2.32 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISA2	50
2.33 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISA3	51
2.34 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISA4	51
2.35 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISA5	52
2.36 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISA6	52
2.37 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISB1	53
2.38 แผ่นกราฟสเปกตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับผลึกกึ่งตัวนำ CISB2	53
3.1 แสดงแผนภาพแถบพลังงาน ความหนาแน่นของสถานะ การกระจายของฟังก์ชันเฟอร์มี-ไดแรกและความหนาแน่นพาหะอิสระตามลำดับ ก) สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก ข) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค) สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	55
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะอิสระกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	63
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	68
3.4 แสดงกลไกย่อยและกลไกรวมที่เกิดขึ้นภายใน GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	72
3.5 แสดงตำแหน่งของข้อสัมผัสตามวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรง.....	75
3.6 ก) แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง ข) การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป.....	77
3.7 แสดงแพคเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพอร์.....	78
3.8 แสดงการวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์.....	79
3.9 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน.....	82
3.10 ภาพถ่ายแสดงฐานรองขึ้นผลึกกึ่งตัวนำสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นพาหะ.....	83
3.11 แสดงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	กราฟแสดงข้อมูลการวัดความหนาแน่นพาหะด้วยระบบฮอลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ...	90
3.13	กราฟแสดงการฟิตข้อมูลความหนาแน่นของพาหะที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง เพื่อหาความชันของส่วนโค้ง.....	91
3.14	กราฟแสดงการฟิตข้อมูลความหนาแน่นของพาหะที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ เพื่อหาความชันของส่วนโค้ง.....	92
3.15	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ตามอุณหภูมิ และความสัมพันธ์ระหว่าง μ_H กับ T^A	94
4.1	แสดงแทรนซิชั่นของพาหะ ณ ที่จุดวิกฤต.....	101
4.2	แสดงระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์.....	110
4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ ΔR กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30 K.....	115
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ ΔR กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K.....	116
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R และ ΔR กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 200 K.....	117
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30 K.....	118
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K.....	119
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta R/R$ กับพลังงานของโฟตอนจากการวัด โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 200 K.....	120
4.9	แสดงการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 50 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิ๊งกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	121
4.10	แสดงการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิ๊งกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	122
4.11	แสดงการฟิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยโปรแกรมฟิตดิ๊งกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงการพิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 50 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 2 แทรนซิชั่น.....	124
4.13 แสดงการพิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 100 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 2 แทรนซิชั่น.....	125
4.14 แสดงการพิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 2 แทรนซิชั่น.....	126
4.15(ก) สรุภาพผลของโฟโตรีเฟลกแทนซ์ตั้งแต่ 12 K จนถึง 80 K.....	128
4.15(ข) สรุภาพผลของโฟโตรีเฟลกแทนซ์ตั้งแต่ 80 K จนถึง 300 K.....	129
4.16 แสดงค่าเบี่ยงเบนของ Eg จากการพิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ.....	130
4.17 แสดงค่าเบี่ยงเบนของ Γ จากการพิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ.....	131
4.18 แสดงค่าเบี่ยงเบนของ θ จากการพิตยอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ.....	132
4.19 แสดงการพิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 30 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	136
4.20 แสดงการพิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 40 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	137
4.21 แสดงการพิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 60 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	138
4.22 แสดงการพิตยอดแหลมที่สามของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 ที่อุณหภูมิ 80 K ด้วยโปรแกรมพิตติงกรณี 1 แทรนซิชั่น.....	139
4.23 แสดงแผนภาพการแยกของแถบเวเลนซ์ในสารประกอบกึ่งตัวนำ ซาลโคไฟไรท์สำหรับพอสซิทีฟ Δ_{σ} และ $\Delta_{\sigma\sigma}$	134