

โครงสร้างผลึกและค่าช่องว่างแถบพลังงานของ
สารประกอบกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$

นายเกรียงไกร วันทอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0270-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CRYSTAL STRUCTURE AND ENERGY GAP VALUE OF THE $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$
SEMICONDUCTOR COMPOUND



Mr. Kriangkrai Wantong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Academic Year 2001

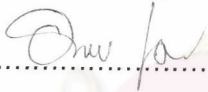
ISBN 974-17-0270-1

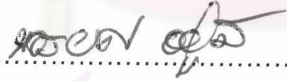
หัวข้อวิทยานิพนธ์ โครงสร้างผลึกและค่าช่องว่างแถบพลังงานของ
สารประกอบกึ่งตัวนำ $Cu_2In_4Se_7$
โดย นาย เกรียงไกร วันทอง
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... รองคณบดีฝ่ายบริหาร
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ การเที่ยง) รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช)


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

เกรียงไกร วันทอง : โครงสร้างผลึกและค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$. (CRYSTAL STRUCTURE AND ENERGY GAP VALUE OF THE $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ SEMICONDUCTOR COMPOUND) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. สมพงศ์ ฉัตรภรณ์, 129 หน้า. ISBN 974-17-0270-1.

การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ จากสถานะหลอมเหลวโดยวิธีทำให้เย็นตัวโดยตรงตามวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ตามแนวนอน เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบตามแนวยาวของผลึกสารตัวอย่างโดยใช้วิธีเอ็ดเฮล พบว่าการปลูกผลึกแบบนี้มีเกรเดียนต์ของสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบ ตรงกันข้ามกับผลึกของสารประกอบ CuInSe_2 ซึ่งจะไม่มีเกรเดียนต์ของสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบ

จากการทดลองการดูดกลืนแสง พบว่าค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ น้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ CuInSe_2 และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงตามอุณหภูมิไม่สอดคล้องกับลักษณะของช่องว่างแถบพลังงาน แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงนี้ไม่ใช่ช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ แต่เป็นเพียงค่าเฉลี่ยของสถานะบางอย่างหรือความปรวนแปรในช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ โดยใช้การทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าไม่สามารถสรุปชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ชัดเจนได้ จากผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าชั้นสารตัวอย่างที่มีสัดส่วนธาตุองค์ประกอบที่แตกต่างกันกลุ่มหนึ่งมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เหมือนกัน แสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนธาตุองค์ประกอบของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ได้กว้างโดยที่โครงสร้างของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสมของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ โดยการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์โดยใช้โครงสร้างแบบสองเฟส พบว่าผลที่ได้ไม่ได้น่าเชื่อถือมากกว่าโครงสร้างแบบเฟสเดียว ส่วนโครงสร้างแบบเฟสเดียวที่น่าเชื่อถือยังคงเป็นพิซาลโคไฟไรท์

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....เกรียงไกร วันทอง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....สมพงศ์ ฉัตรภรณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....สมพงศ์ ฉัตรภรณ์

4172225023 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ / CRYSTAL GROWTH / RIETVELD REFINEMENT / TEMPERATURE GRADIENT

KRIANGKRAI WANTONG: CRYSTAL STRUCTURE AND ENERGY GAP VALUE OF THE $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ SEMICONDUCTOR COMPOUND. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KAJORN YOD YOODEE Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. SOMPHONG CHATRAPHORN, 129 pp. ISBN 974-17-0270-1.

The crystalline bulk of the $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ was grown from melting compound using the horizontal Bridgeman-Stokbargee directional freezing method. From the EDS analysis of composition along the crystal ingot, the composition gradient caused by this growth method is found. In contrast, this growth method has no effect on the composition of CuInSe_2 .

The absorption edge energies of $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$, obtained from optical-absorption results, are less than that of CuInSe_2 and the characteristics of the absorption edge energy variation of $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ due to temperature variation do not correspond to the characteristic of the energy gap variation. Hence, these absorption edge energies are not the energy gap of $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$, but only the average values of some states or fluctuation in the band gap. Hall experimental results do not clearly reveal the semiconductor type of $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$. From x-ray diffraction experiment, a number of samples, whose compositions are different, have the same x-ray diffraction patterns. That means the compositions of $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ can be varied widely while its structure remains unchanged. From Rietveld refinement, the refinement result of a two-phase structure is not more reliable than the results of a single-phase structure. The reliable structure remains P-chalcopyrite.

Department Physics

Field of study Physics

Academic year 2001

Student's signature..... Kriangkrai Wantong

Advisor's signature..... Kajornyod Yoodee

Co-advisor's signature..... Somphong Chatraphorn

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี รวมทั้งความกรุณาของอาจารย์ทั้งสองท่านในการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ อีกทั้งต้องขอขอบคุณ อาจารย์ พงษ์ ทรงพงษ์ และอาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยुทธการ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งต้องขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้โอกาสในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาทำการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และกรุณาแก้ไขในส่วนที่คลาดเคลื่อนให้ถูกต้อง

ขอขอบคุณ คุณบุญเหลือ เงามถาวรชัย เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการวิเคราะห์หาลึกลับส่วนธาตุองค์ประกอบของสารด้วยวิธีเอ็ดไอเอส และขอขอบคุณ คุณศรีไฉล ชุนทน เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน

ขอขอบคุณ คุณวรรณบ แดงงาม อดีตเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณราม ติวารี วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ซึ่งเป็นอดีตนิสิตปริญญาโทที่ทำงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่กรุณาแนะนำความรู้และเทคนิคที่ใช้งานวิจัย

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ที่ได้ให้การสนับสนุนทางการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ และน้อง ที่ได้ให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ.....	5
2.1 ผลึกและสมมาตร.....	5
2.2 ช่องว่างในแลตทิซ.....	10
2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก.....	10
2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	15
2.4.1 สารกึ่งตัวนำแบบอินทรีนสิก.....	15
2.4.2 สารกึ่งตัวนำแบบเอกซ์ทรีนสิก.....	16
2.4.2.1 กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือ อุณหภูมิสูง.....	17
2.4.2.2 กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีมากหรือ อุณหภูมิต่ำ.....	18
2.4.3 สภาพเคลื่อนที่ได้.....	19
2.4.4 ปฏิกิริยาการหนีฮอลล์.....	21
2.4.5 การวัดสภาพต้านทานโดยวิธีของแวนเดอเพาว์.....	24
2.5 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	27
2.6 หลักการวิเคราะห์สัดส่วนธาตุองค์ประกอบของสารด้วยวิธีเอ็ดเอส.....	29
3. การทดลอง.....	31
3.1 การปลูกผลึก.....	31
3.1.1 ระบบเชิงคู่เทียมของ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$	31
3.1.2 เตาเผาผลึก.....	33

สารบัญ (ต่อ)

๗

	หน้า
3.1.3 ระบบควบคุมของเตา.....	35
3.1.4 การเตรียมสารตัวอย่าง.....	35
3.1.5 การเก็บตัวอย่าง.....	38
3.2 การหาส่วนประกอบของสารตัวอย่างด้วยวิธีอีดีเอส.....	40
3.3 การทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	44
3.4 การทดลองการดูดกลืนแสง.....	49
3.4.1 การทดสอบระบบการวัดโดยใช้สารประกอบ แกเลียมอาร์เซไนด์.....	50
3.4.2 ผลการทดลอง.....	52
3.5 การทดลองวัดฮอลล์.....	55
3.5.1 ชนิดของพาหะ.....	57
3.5.2 สภาพความต้านทานของสาร.....	59
3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	61
4. การวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบเรียทเวลด์.....	64
4.1 วิธีการของเรียทเวลด์.....	64
4.2 วิธีใช้โปรแกรมเรียทิกาโดยสรุป.....	69
4.3 ทดสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซิลิกอน (Si) มาตรฐาน ด้วยวิธีการของเรียทเวลด์.....	71
4.4 การปรับแต่งพารามิเตอร์แบบเรียทเวลด์กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์แบบซาลโคไฟไรท์.....	78
4.5 การทดสอบเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมของสารประกอบใน เฟสของ $Cu_2In_4Se_7$	85
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	94
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	116

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แลตทิซของบราวเวียสทั้ง 14 ชนิด เซลล์หนึ่งหน่วยที่นิยม (conventional unit cell) และกลุ่มจุดทั้ง 32 แบบ.....	8
3.1 ค่าเฉลี่ยส่วนประกอบจากผลการวัดเอ็กซเรย์.....	41
3.2 เครื่องหมายความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการเทียบศักย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	58
3.3 ผลการเทียบศักย์ไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่ 2-2 และ 3-2 ที่อุณหภูมิต่างๆ	59
4.1 ยอดจากระนาบต่างๆ ของ Si จากการปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยค่าสัดส่วนความเข้มรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ_2 ต่อความเข้มรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ_1 เป็น 0.5	71
4.2 ค่า χ^2 จากการปรับแต่งพารามิเตอร์ตามวิธีการของเรียทเวลดต์โดยใช้ค่าสัดส่วนความเข้มรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ_2 ต่อความเข้มรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ_1 ต่างๆ	72
4.3 ยอดจากระนาบต่างๆ ของ Si จากการปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยค่าสัดส่วนความเข้มรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ_2 ต่อความเข้มรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น λ_1 เป็น 0.45	73
4.4 พารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของ Si	73
4.5 ผลการคำนวณระยะทางและมุมระหว่างอะตอมของ Si	75
4.6 ตำแหน่งอะตอมของสารประกอบ CuInSe_2 ที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์	78
4.7 พารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างที่ 5-2 ซึ่งปรับแต่งพารามิเตอร์โดยใช้สเปซกรุป $I\bar{4}2d$	79
4.8 ผลการคำนวณระยะทางและมุมระหว่างอะตอมของสารตัวอย่าง 5-2 ซึ่งปรับแต่งพารามิเตอร์โดยใช้สเปซกรุป $I\bar{4}2d$	80
4.9 พารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuInSe_2 ที่ได้จากการปรับแต่งแบบเรียทเวลดต์โดยใช้โครงสร้างที่มีสเปซกรุปเป็น $I\bar{4}2d$	82
4.10 ค่าสัดส่วนอะตอมของสารประกอบ CuInSe_2 ที่คำนวณได้เทียบกับสัดส่วนที่ได้จากการวัดเอ็กซเรย์.....	83
4.11 ตำแหน่งของอะตอมจากโครงสร้างแบบต่างๆ	85
4.12 ขนาดแลตทิซและค่า χ^2 จากการทดสอบโดยใช้โครงสร้างแบบต่างๆ.....	86
4.13 ตำแหน่งของอะตอม Se จากการวิเคราะห์โดยใช้โครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์.....	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ญ

หน้า

4.14 เศษส่วนการประจำชีพจากการวิเคราะห์โดยใช้โครงสร้างแบบพีซาลโคไฟไรท์.....	89
4.15 ค่าสัดส่วนอะตอมของสารที่มีโครงสร้างแบบพีซาลโคไฟไรท์ที่คำนวณได้เทียบกับ สัดส่วนที่ได้จากการวัดอีดีเอส.....	89
4.16 ผลการคำนวณระยะทางและมุมระหว่างอะตอมของสารตัวอย่าง 3-2 ซึ่งปรับแต่ง พารามิเตอร์โดยใช้โครงสร้างแบบพีซาลโคไฟไรท์.....	90



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แลตทิซ 7 ระบบ.....	7
2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก.....	12
2.3 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้จากการคำนวณ n) ในกรณีผลึกของซิลิกอน ข) ในกรณีผลึกของ CuInSe_2	14
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะอิสระซึ่งแปรตามส่วนกลับของ อุณหภูมิ.....	19
2.5 ปฏิกิริยาการนำพาหะอิสระสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	22
2.6 ก) ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนแผ่นสารตัวอย่าง ข) แผ่นสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เส้น รอบรูปยาวขึ้นโดยการตกแต่งที่ขอบของสารตัวอย่าง.....	24
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์ค่าแก้ f กับค่า Q	25
2.8 การย้ายสถานะแบบตรงของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำ.....	28
2.9 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ GaAs ที่ค่าพลังงานโฟตอนต่างๆ กัน.....	29
2.10 แผนภาพแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาบนผิวขึ้นสารตัวอย่าง.....	29
2.11 แผนภาพแสดงการเกิดรังสีเอกซ์เรืองแสง.....	30
3.1 แผนภาพระบบเชิงคู่เทียมของ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$	31
3.2 การโปรแกรมอุณหภูมิในการปลูกผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$	32
3.3 เตาไซนเดี่ยวที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	33
3.4 โพรไฟล์ของเตาไซนเดี่ยวที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	34
3.5 ส่วนควบคุมของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	35
3.6 หลอดรูปแอมโบลีซึ่งมี 2 ชั้น ที่บรรจุสารและพันด้วยลวดแล้ว.....	37
3.7 ผลึกจากหลอดหมายเลข 2 ที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ.....	38
3.8 โครงสร้างแบบชั้นของสารตัวอย่างที่ 1-7 เมื่อมองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM).....	39
3.9 ไฮลเดอร์สำหรับวัดอีดีเอส.....	41
3.10 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะจากการวัดสารตัวอย่างด้วยวิธีอีดีเอส ก) ในกรณีสารประกอบ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ โดย x มีค่าประมาณ 0 ข) ในกรณีสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ค) ในกรณีสารประกอบ CuInSe_2	43
3.11 สารตัวอย่างที่ติดอยู่บนกระจกสไลด์.....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ฎ

หน้า

3.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 1.....	45
3.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 2.....	45
3.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 3.....	46
3.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 4 และ 5.....	46
3.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในสารประกอบ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$	47
3.17 ก) การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลองการดูดกลืนแสง	
ข) แผ่นสารตัวอย่างที่ติดอยู่บนไฮลเดอร์สำหรับวัดการดูดกลืนแสง.....	49
3.18 การทดลองการดูดกลืนแสงของ GaAs ที่อุณหภูมิ 10 K	
ก) ผลการวัด I_t ข) ลักษณะ I_0 ของหัววัดชนิด Si ค) α ที่ตัดพื้นหลังเป็น α_0	
ง) วิเคราะห์หาช่องว่างแถบพลังงาน.....	51
3.19 การทดลองการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่ 1-2 ที่อุณหภูมิ 10 K	
ก) ผลการวัด I_t ข) ลักษณะ I_0 ของหัววัดชนิด Ge ค) α ที่ตัดพื้นหลังเป็น α_0	
ง) วิเคราะห์หาช่องว่างแถบพลังงาน.....	53
3.20 ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ของ	
ก) สารตัวอย่างที่ 1-2 ข) สารตัวอย่างที่ 2-2 ค) สารตัวอย่างที่ 3-2.....	54
3.21 ก) แผนภาพของระบบวัดฮอลล์ ข) แผ่นสารตัวอย่างบนไฮลเดอร์	56
3.22 แผ่นสารตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แสดงทิศทางของกระแสและบริเวณที่ประจุมาออก	
(ก) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า	
(ข) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสนามแม่เหล็กพุ่งออก	
(ค) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า	
(ง) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และสนามแม่เหล็กพุ่งออก.....	57
3.23 ก) ค่าสภาพความต้านทาน ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน ของ สารตัวอย่างที่ 2-2	
ข) ค่าสภาพความต้านทาน ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน ของ สารตัวอย่างที่ 3-2.....	60
3.24 ภาพแสดงแถบพลังงานที่ปรวนแปร และแสดงการย้ายสถานะแบบ ระหว่าง	
แถบพลังงานกด้วยกัน (BB) ระหว่างแถบพลังงานกับหางของแถบพลังงาน (BT)	
และ ระหว่างหางของแถบพลังงานด้วยกัน (TT) ที่เกิดขึ้นได้ในสารกึ่งตัวนำ.....	61
4.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างฮิสโทแกรมที่ได้จากการคำนวณกับฮิสโทแกรมที่ได้จาก	
การทดลองของ Si.....	77

4.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างฮิสโทแกรมที่ได้จากการคำนวณกับฮิสโทแกรมที่ได้จากการทดลองของสารตัวอย่างที่ 5-2 ซึ่งใช้โครงสร้างในการวิเคราะห์เป็นซาลโคไฟไรท์ ($I\bar{4}2d$)	84
4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างฮิสโทแกรมที่ได้จากการคำนวณกับฮิสโทแกรมที่ได้จากการทดลองของสารตัวอย่างที่ 3-2 ซึ่งใช้โครงสร้างในการวิเคราะห์เป็นพีซาลโคไฟไรท์ ($P\bar{4}2c$)	93



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย