

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

รอยต่อแบบโอห์มมิกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CuInSe_2

ผู้ดำเนินงาน

นายจตุตินัย	แก้วแดง
นางงามนิตย์	แก้วแดง
นางทิพรรัตน์	วงษ์เจริญ
นายชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ รอยต่อแบบโอห์มมิกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInSe_2

ผู้ดำเนินงาน นายฐิตินัย แก้วแดง
นางงามนิตย์ แก้วแดง
นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ
นายชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ

ปีงบประมาณ 2539

บทคัดย่อ

ได้ทำการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จากสถานะหลอมเหลวด้วยวิธีไคเรกชันนัลพรีซซิง ในเตาเผาที่สร้างขึ้นเอง ผลึกที่ปลูกได้มีสีดำมีผิวหน้ามันวาว ยาวประมาณ 3 เซนติเมตร และปราศจากรอยแยกในเนื้อผลึก ส่วนผลึกของ CdS เตรียมขึ้นจากสถานะไอ โดยการระเหิดสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ $1150\text{ }^\circ\text{C}$ ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ ซึ่งไหลอย่างช้า ๆ ผ่านเข้าไปในระบบพร้อมกับเลื่อนเตาที่ใช้ปลูกผลึกด้วยอัตราเร็ว 1.5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ผลึกที่ปลูกได้มีสีน้ำตาล โปร่งแสง มีขนาด 10 มิลลิเมตร

ฟิล์มบางของ CuInSe_2 และ CdS เตรียมขึ้นได้จากการระเหิดสารตั้งต้นด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเคลื่อนบนกระจกสไลด์ โดยควบคุมอุณหภูมิของฐานรองเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ขณะทำการระเหย จากการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเกรนของผลึกหลายรูปของ CdS มีขนาดประมาณ 0.1 ไมโครเมตร โครงสร้างผลึกของ CuInSe_2 เป็นแบบเทระโกนอล ส่วนของ CdS เป็นแบบเวอร์ทไซต์ จากการวัดการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CuInSe_2 และของ CdS เท่ากับ 1.03 และ 2.46 eV ตามลำดับ ชนิดการนำไฟฟ้าของ CuInSe_2 อาจจะเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่สำหรับ CdS จะเป็นแต่ชนิดเอ็นเสมอ

รอยต่อโอห์มมิกระหว่างโลหะผสมของ In กับ CuInSe_2 และกับ CdS ทำได้โดยการแอนนیلที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ทำให้ทราบพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนชนิดอินทรินสิคที่เกิดขึ้นใน CuInSe_2 ชนิดพี คือ 150 และ 100 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ แต่สำหรับชนิดเอ็น คือ 100 และ 15 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และส่วน CdS มีค่าเท่ากับ 68 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์

Project Title Ohmic Contact of CuInSe_2 Thin Films Solar Cell

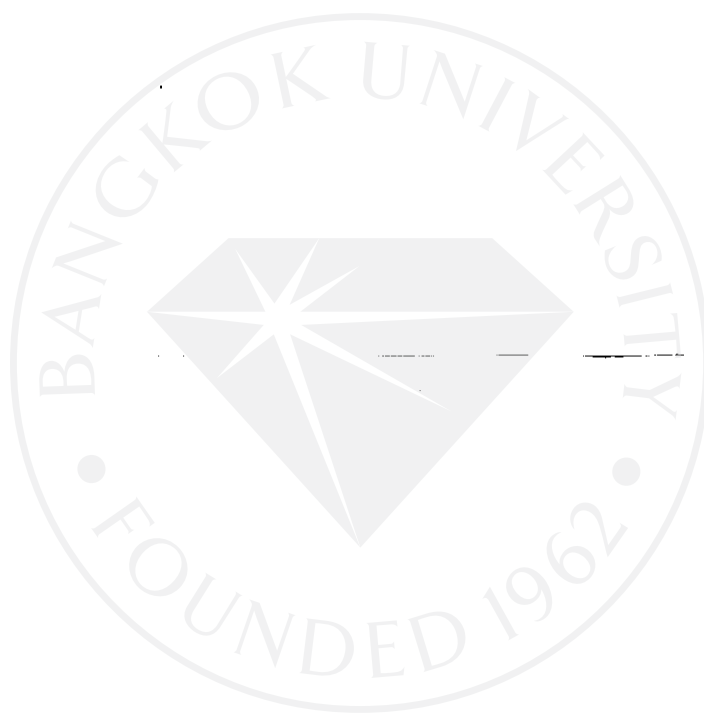
Name	Mr. Thitinai	Gaewdang
	Mrs. Ngamnit	Gaewdang
	Mrs. Tiparatana	Wongcharoen
	Mr. Chaisingh	Poo-Rakkiat

Year 1996

Abstract

The crystalline bulk of the semiconducting compound CuInSe_2 were grown from the melt by directional freezing method in a home-made tubular furnace. The as-grown ingots, with 3 cm long in black color, presented a shiny free surface without some cracks. Crystals of CdS were grown by vapor phase sublimation method at 1150°C in a stream with slowly flow of argon at one atmosphere meanwhile slowly moving the furnace with predetermined temperature profile at speed around 1.5 mm/hr. The as-grown crystals with a brown color up to 10 mm in size were obtained. Both of CuInSe_2 and CdS thin films were deposited by thermal vacuum evaporation technique on slide glass substrates kept at 150°C . From scanning electron micrographs, the grain size of polycrystalline CdS thin films about of $0.1\ \mu\text{m}$ could be obtained. The crystal structure of CuInSe_2 was found to be tetragonal chalcopyrite but CdS crystallized in the wurtzite-type structure. Energy gap of CuInSe_2 and CdS being about 1.03 and 2.46 eV were calculated from the optical transmission measurements. The conductivity type of as-grown CuInSe_2 ingots were either p-type or n-type. The most of as-grown CdS bulks were n-type.

The contact of In alloy on CuInSe_2 and on CdS gave ohmic contact conditions after annealing at $500\text{ }^\circ\text{C}$ for 20 minutes in the nitrogen atmosphere. From electrical conductivity measurements, the ionization energy of intrinsic impurity levels of 150, 100 meV in p- CuInSe_2 and of 100, 15 meV in n- CuInSe_2 . For n-CdS, the ionization energy at 68 meV was observed.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ผศ. สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ผศ.ดร. ขจรยศ อยู่ดี และ ผศ. กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณ ผศ. นพปฎล สุทธิศิริ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และอาจารย์ประเสริฐ พิมขาว ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ขอขอบคุณ ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความ อนุเคราะห์ระบบสุญญากาศความดันต่ำในการเตรียมฟิล์มบาง และอุปกรณ์ที่จำเป็นอื่น ๆ ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย ขาวประเสริฐ และคุณจรินทร์ โพธิไชยยะ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการ สร้างเตาปลูกผลึก ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนในการประมวลผลและพิมพ์งานด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ความเร็วสูง

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การปลูกผลึก	
2.1 การสร้างเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยว สำหรับปลูกผลึกเดี่ยว	15
2.2 การปลูกผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2	18
2.2.1 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสารตั้งต้น	18
2.2.2 การทำความสะอาดผิวหน้าผลึก	19
2.3 การปลูกผลึกเดี่ยวของ CdS	20
2.3.1 การสร้างระบบเพื่อใช้ปลูกผลึกจากสภาวะไอ	20
2.3.2 ขั้นตอนการปลูกผลึก CdS จากสภาวะไอ	21
2.3.3 ผลของการปลูกผลึกเดี่ยวของ CdS	22
บทที่ 3 การเตรียมฟิล์มบาง	
3.1 การเตรียมฟิล์มบางของ CdS	24
3.2 การเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2	26

	หน้า
บทที่ 4 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสารตัวอย่าง	27
4.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	27
4.1.1 สำหรับผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2	27
4.1.2 สำหรับฟิล์มบางของ CuInSe_2	30
4.1.3 สำหรับผลึกเดี่ยวของ CdS	30
4.1.4 สำหรับฟิล์มบางของ CdS	31
4.2 การตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)	32
4.2.1 ผิวหน้าผลึกของ CuInSe_2	32
4.2.2 ผิวหน้าผลึกของ CdS	33
4.3 การวัดการส่งผ่านแสง	34
4.3.1 สำหรับผลึก CuInSe_2	34
4.3.2 สำหรับฟิล์มบางของ CdS	36
4.4 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	38
4.4.1 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยใช้หัวร้อน	38
4.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	38
บทที่ 5 รอยต่อโอห์มมิก	
5.1 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโอห์มมิก	42
5.1.1 รอยต่อโอห์มมิกของ CuInSe_2	42
5.1.2 การเตรียมแผ่นรองชั้นสาร	43
5.1.3 รายละเอียดในการทดลองและผลการทดลอง	44
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	54
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เตรียมได้	39
5.1 แสดงผลการศึกษารอยต่อไอหุ้มมีกระหว่างโลหะผสมของอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการศึกษา	46
5.2 แสดงระดับพลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเองจากความบกพร่องของผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการศึกษา	47

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของระบบเตาโซนเดี่ยวพร้อมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ	16
2.2 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิเตาโซนเดี่ยวที่สร้างขึ้น	17
2.3 แสดงระบบเตาในแนวเฉียง 5 องศา ขณะกำลังหลอมสารที่อุณหภูมิ 1150 °C	17
2.4 แสดงแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุ Cu, In และ Se ก่อนนำไปหลอม	18
2.5 แสดงขนาดของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe ₂ ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา	19
2.6 แสดงวงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของเครื่องขัดผิวหน้าชิ้นผลึก	19
2.7 แสดงระบบการไหลของก๊าซอาร์กอนผ่านเข้ามาในเตาปลูกผลึกของสาร CdS	20
2.8 แสดงภาพถ่ายของระบบเตาที่ใช้ปลูกผลึก CdS	21
2.9 แสดงภาชนะท่อแก้วควอทซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก CdS	21
2.10 แสดงตำแหน่งของการเกิดผลึก	23
2.11 แสดงผลึกของ CdS ที่ปลูกได้จากสภาวะไอ	23
3.1 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางของ CdS ด้วยวิธีระเหยด้วยความร้อนจากแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว	25
3.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของ CdS ที่เตรียมได้	25
3.3 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของ CuInSe ₂ เตรียมได้จากการระเหย	26
4.1 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง (ก) ชนิด p-CuInSe ₂ (ข) ชนิด n-CuInSe ₂	29
4.2 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของสารตั้งต้น CuInSe ₂	30
4.3 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึก CdS ที่เตรียมได้จากสภาวะไอระเหย....	31

รูปที่	หน้า
4.4	แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของ CdS ที่เตรียมได้จากการ ระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 31
4.5	แสดงภาพถ่ายของผิวหน้าผลึก p- CuInSe ₂ (0.3% Cu) 32
4.6	แสดงภาพถ่ายของผิวหน้าผลึก CuInSe ₂ 33
4.7	แสดงผลึก CdS ที่เตรียมได้จากสถานะไอ 33
4.8	แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS 34
4.9	แสดงแผนภาพการวัดการส่งผ่านแสง 34
4.10	แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของ CuInSe ₂ 36
4.11	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS 37
4.12	แสดงการหาค่า E _g ของฟิล์มบางของ CdS 37
5.1	แสดงกลไกการเกิดรอยต่อโอห์มมิก (ก) รอยต่อที่กำแพงศักย์มีค่าต่ำ (ข) รอยต่อที่เกิดจากการเจือสารอย่างหนักด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (ค) รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล 41
5.2	แสดงการเชื่อมต่อจุดของโลหะผสมอินเดียมบนชั้นสารตัวอย่าง 42
5.3	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ของสิ่งประดิษฐ์ 43
5.4	แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน (I ₀₁) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe ₂ กับ In - Pb ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 47
5.5	แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน (I ₀₁) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe ₂ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 48
5.6	แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ - อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe ₂ กับ In - Pb ที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ 48
5.7	แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ - อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe ₂ กับ In - Pb ที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ 49
5.8	แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อ p-CuInSe ₂ กับ In - Pb 49
5.9	แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อ n-CuInSe ₂ กับ In - Pb 50
5.10	แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ p-CuInSe ₂ จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานกับส่วนกลับของอุณหภูมิ 50

รูปที่	หน้า
5.11 แสดงการหาค่าพลังงานไอออนไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ n-CuInSe ₂ จากกราฟส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	51
5.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ - อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง n-CdS กับ In	51
5.13 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อ n-CdS กับ In	52
5.14 แสดงการหาค่าพลังงานไอออนไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ n-CdS	52
5.15 แสดงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ คือ (ก) แสงเข้าทางด้านขั้วไฟฟ้า (ข) แสงเข้าทางด้านกระจกสไลด์	53



บทที่ 1

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม มีปริมาณมากมายไม่จำกัด และมีให้ใช้ได้อีกนานมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน ซึ่งนับวันจะเหลือน้อยลง และยิ่งก่อให้เกิดมลภาวะอีกด้วย การพัฒนาคุณภาพของสารกึ่งตัวนำ และเทคโนโลยีของการผลิต ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ก้าวไปอย่างไม่หยุดยั้ง เชื่อว่าในอนาคตอันใกล้นี้ จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูกลง สามารถที่จะติดตั้งเป็นสถานีย่อยสำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชนต่าง ๆ โดยเฉพาะกับชุมชนในชนบทที่อยู่ห่างไกลได้เป็นอย่างดี

คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ควรมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1 - 2 eV [1] และมีลักษณะของแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct band gap) ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าแบบเฉียง นอกจากนี้พายุที่เกิดขึ้นควรมีช่วงชีวิต (life time) ที่ยาว และสภาพคล่องตัวสูง (high mobility) สารกึ่งตัวนำ S₂ ที่ได้มีการศึกษากันมานาน จนกระทั่งเทคโนโลยีของ S₂ ได้พัฒนาจนเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.1 eV ซึ่งต่ำไปเล็กน้อย และมีแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง จึงทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้ลดลง ส่วน GaAs มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.42 eV และแถบพลังงานเป็นแบบตรง ทำให้ดูดกลืนแสงได้ดีแต่ราคาสูง จึงได้มีการค้นคว้าหาสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ๆ สารกึ่งตัวนำที่น่าสนใจ คือ สารประกอบซัลโคไฟไรต์ (chalcopyrite compounds) [2] ในกลุ่ม I-III - VI₂ โดยเฉพาะ CuInSe₂ มีลักษณะแถบพลังงานเป็นแบบตรง และช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1 eV ทั้งยังสามารถทำให้มีชนิดการนำไฟฟ้าได้ทั้งชนิดเอ็น และชนิดพีด้วยการแอนนัล (anneal) หรือการเจือด้วยสารอื่น

ฟิล์มบางของ CuInSe₂ สามารถเตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีระเหยในระบบสุญญากาศความดันต่ำจากแหล่งเดียว (single source evaporation) การระเหยในระบบสุญญากาศความดันต่ำจากหลายแหล่ง (multi source evaporation) สเป็ตเตอริงด้วยคลื่นวิทยุ (rf sputtering) หรือวิธีซีลีโนเซชัน (selenization) เป็นต้น [3 - 6] ส่วนฟิล์มบางของ CdS เตรียมได้จากวิธีระเหยในระบบสุญญากาศความดันต่ำ การพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) หรือวิธีการเคลือบฟิล์มบางในสารละลาย (chemical bath deposition) เป็นต้น [7 - 9] ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdS/CuInSe₂ ให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงกว่า 16% [10]

ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สิ่งสำคัญ คือ จะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ โดยที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ และโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องมีความต้านทานน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ และต้องไม่มีลักษณะในการให้กระแสไหลทางเดียวแบบรอยต่อชอตต์กี ความต้านทานที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 กับขั้วไฟฟ้า หรือระหว่าง CdS กับขั้วไฟฟ้าภายใน เซลแสงอาทิตย์จะก่อให้เกิดความต้านทานอนุกรม (series resistance) ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ลดลง [11] โลหะที่จะเป็นขั้วไฟฟ้าควรมีคุณสมบัติดังนี้ คือ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ยึดติดกับอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ได้ดี ไม่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน เชื่อมต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มิกของโลหะอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ CdS ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวจนถึง $100\text{ }^\circ\text{C}$

การดำเนินการวิจัยได้เริ่มจากการสร้างระบบการปลูกผลึกแบบไดเรกชันนัลฟรีซซิง (directional freezing) เพื่อปลูกผลึก CuInSe_2 และสร้างระบบการพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) เพื่อปลูกผลึก CdS จากนั้นจึงเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2 และ CdS โดยการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศความดันต่ำ โดยใช้ผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2 และ CdS เป็นสารตั้งต้น ระยะเวลาได้ทำการศึกษาคูสมบัติพื้นฐานของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ ทั้งที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยวและฟิล์มบาง รวมทั้งศึกษารอยต่อแบบโอห์มิกของสารตัวอย่างด้วย

ในรายงานวิจัยนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท คือ บทที่ 1 คือ บทนำ บทที่ 2 เกี่ยวกับการปลูกผลึกเดี่ยว บทที่ 3 เกี่ยวกับการเตรียมฟิล์มบาง บทที่ 4 เป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ บทที่ 5 เป็นการศึกษาการรอยต่อแบบโอห์มิกระหว่างโลหะผสมของอินเดียมกับสารตัวอย่าง บทที่ 6 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองรวมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในขั้นต่อไป

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

แบบ ว.1

แบบเสนอโครงการวิจัย
ประกอบการของบประมาณโครงการวิจัย
ประจำปีงบประมาณ 2539

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทบวงมหาวิทยาลัย

1. ชื่อโครงการ (ไทย) “รอยต่อแบบโอห์มมิกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CuInSe_2 ”
(อังกฤษ) “Ohmic contact of CuInSe_2 thin films solar cell”

2. หน่วยงานที่รับผิดชอบงานวิจัยและที่อยู่
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร. 3269982 - 4 ต่อ 285
โทรสาร 3269981

3. คณะผู้ดำเนินการวิจัย
หัวหน้าโครงการวิจัย
ชื่อ (ไทย) จูตินัย แก้วแดง
ชื่อ (อังกฤษ) Thitinai Gaewdang
สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 35%

คุณวุฒิ ปริญญาเอก (Docteur de L' Universite')
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 7
สถานที่ทำงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ : 3269982 - 4 ต่อ 285 โทรสาร : 3269981

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ไทย) งามนิตย์ แก้วแดง
ชื่อ (อังกฤษ) Ngamnit Gaewdang
 สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 25%
คุณวุฒิ M. Sc. (Solid State Physics)
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 7
สถานที่ทำงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ : 3269982 – 4 ต่อ 285 โทรสาร : 3269981
ประสบการณ์ในการทำวิจัย : Solid State Physics

2. ชื่อ (ไทย) ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ
ชื่อ (อังกฤษ) Chaisingh Poorakkiat
 สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 25%
คุณวุฒิ Ph. D. (Physics)
ตำแหน่ง อาจารย์ ระดับ 7
สถานที่ทำงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน
กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์ : 2185298
ประสบการณ์ในการทำวิจัย : Solid State Physics

3. ชื่อ (ไทย) ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ
ชื่อ (อังกฤษ) Tiparatana Wongjaroen
 สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 15%
คุณวุฒิ Ph. D. (Electronics Engineering)
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์
สถานที่ทำงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี กรุงเทพฯ 12120
โทรศัพท์ : 9020299 ต่อ 623, 625
ประสบการณ์ในการทำวิจัย : Optoelectronics

4. สาขาวิชาการที่ทำการวิจัย
วิทยาศาสตร์กายภาพ (ฟิสิกส์ประยุกต์)
5. ประเภทของงานวิจัย
การวิจัยพื้นฐานและการวิจัยประยุกต์
6. คำสำคัญของเรื่องที่ทำการวิจัย (Keywords) : Ohmic contact, CuInSe₂, Solar cell, semiconductor
7. งานวิจัยที่กำลังดำเนินงานในปัจจุบัน
 - สร้างเตาอุณหภูมิสูงเพื่อเตรียมผลึกของ In₂O₃ : Sn⁴⁺ ด้วยวิธีหลอมฟลักซ์ (flux growth)
 - สร้างเตาสองโซนเพื่อเตรียมผลึกของ In₂O₃ : Sn⁴⁺, Ge⁴⁺ ด้วยวิธีพาไอระเหยเคมี
 - ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารประกอบ In₂O₃ : M⁴⁺ (M = Si⁴⁺, Ge⁴⁺, Sn⁴⁺ ...)

8. ความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันประชากรโลกมักได้แหล่งพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นหลักใหญ่สภาวะการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงที่กำลังจะเกิดขึ้นจึงกลายเป็นปัญหาที่สำคัญต่อภาวะความเป็นอยู่ของมนุษย์เนื่องจากแหล่งพลังงานอื่น โดยเฉพาะแหล่งพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์ยังมีการพัฒนานำมาใช้ประโยชน์กันน้อยมาก ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานด้านต่าง ๆ ยังมีค่าใช้จ่ายในอัตราสูง ซึ่งเป็นการขัดแย้งกับสภาพเศรษฐกิจปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกต่างก็ให้ความสนใจที่จะนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงที่กำลังจะหมดไปจากโลกเพราะดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานบริสุทธิ์ที่ไม่ทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน โดยนักวิทยาศาสตร์ได้ตั้งเป้าหมายไว้ที่ การพยายามประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ สารประกอบกึ่งตัวนำ เช่น c-Si (Crystalline Silicon), a-Si (Amorphous Silicon), GaAs และ CdS/Cu₂S เป็นต้น ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ผลิตมาจาก a-Si, c-Si

จากการศึกษาทฤษฎีการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าสารกึ่งตัวนำดังกล่าวข้างต้นยังไม่ใช้สารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก Si มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.12 eV ซึ่งต่ำกว่าค่าที่วิเคราะห์ไว้ สารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมควรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.5 eV และมีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง ส่วน GaAs นั้นเหมาะสม แต่ข้อเสียคือต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูง สำหรับ CdS/Cu₂S นั้นจะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่า 10%

สารกึ่งตัวนำที่นักวิจัยสนใจมากและประสบความสำเร็จเบื้องต้น คือ สารประกอบซาลโคไฟไรท์ในกลุ่ม I-III-VI₂ ซึ่งมีจำนวนมากกว่า 50 ชนิด มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ กัน สามารถควบคุมให้มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ตามต้องการได้ ขณะเดียวกันยังพบว่า เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาขึ้นเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ด้วย โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำ CuInSe₂ จะได้รับความสนใจเป็นพิเศษทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง (photodetector) และเซลล์แสงอาทิตย์คุณภาพสูงได้ Wagner และผู้ร่วมงานแห่ง Bell Laboratories Holmdel, New Jersey รายงานว่า สิ่งประดิษฐ์ที่มีรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชัน (heterojunction) n-CdS/p- CuInSe₂ สามารถตรวจวัดแสงได้ในย่านความยาวคลื่น 550-1250 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่า ความสามารถของ Si ที่มีใช้อยู่แพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงเกินกว่า 12% ด้วย

จากข้อมูลที่ได้ มีการศึกษาไว้ ผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe₂ สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ดีกว่า Si และผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ นอกจากนั้นผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe₂ ยังมีแนวโน้มที่จะพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อย ๆ แต่อุปสรรคที่สำคัญต่อการพัฒนาผลึกกึ่งตัวนำนี้ คือ การขาดข้อมูลทางฟิสิกส์มากมาย ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสาร กึ่งตัวนำกลุ่มใหม่ที่มีการศึกษากันอย่างจริงจังในช่วงเวลาประมาณ 10 ปีนี้เอง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะเรียนรู้วิธีการเตรียมผลึก การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและขั้นตอนในการประดิษฐ์

9. วัตถุประสงค์ของโครงการ

9.1 ศึกษาเทคนิคและการพัฒนาการสร้างเตาอุณหภูมิสูงประมาณ 1200 °C และการสร้างเตาแอนนัล อุณหภูมิสูงประมาณ 600 °C

9.2 ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe₂, CdS โดยวิธีไคเรกชันนัลฟริชซิง และโดยขบวนการ Sublimation process ตามลำดับ

9.3 ศึกษาการสร้างฟิล์มบางของ CuInSe₂ และของ CdS ลงบนแผ่นกระจกบาง โดยเทคนิคการระเหยแบบ source เดี่ยวในระบบสุญญากาศ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CuInSe₂ และ CdS

9.4 ศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางด้วย X-rays diffraction และวิเคราะห์ microstructure ของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

9.5 สร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก จากโลหะผสมของอินเดียม โดยการระเหยฟิล์มบางของขั้วไฟฟ้าขึ้นไปเคลือบบนฟิล์มบางของ CuInSe₂ และบน CdS ตามลำดับ

9.6 ศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกชนิดทนกระแสได้สูง ๆ โดยที่รอยต่อไม่แสดงผลในเชิงกรงกระแสแบบชอตกิตไดโอด

10. เป้าหมายของโครงการที่จะได้รับเมื่อจบโครงการ

10.1 คณะผู้วิจัยสามารถทราบถึงเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ที่สนใจในโครงการนี้ เพื่อให้ได้ขนาดใหญ่อพและมีโครงสร้างใกล้เคียงกับผลึกเดี่ยว และพัฒนาข้อผิดพลาดให้เป็นข้อผิดพลาดเล็กน้อย เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด $\text{CdS}/\text{CuInSe}_2$ นี้มีค่าสูงสุด โดยไม่มีผลเนื่องจากข้อผิดพลาดในการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ รวมทั้งที่อยู่ในรูปของรอยต่อด้วย จึงสามารถนำข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากงานวิจัยมาใช้เป็นพื้นฐาน การค้นคว้า และแก้ไขปัญหาลงไป เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จะทำให้สามารถนำฟิล์มบาง CuInSe_2 และ CdS ไปประยุกต์ใช้เป็นฐานรองประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด ตามความเหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

10.2 โครงการวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรจังก์ชันของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ทั้งเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

11. ผลงานที่จะได้รับเมื่อจบโครงการ

สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนาขึ้นนี้ให้หน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งภาคเอกชนและรัฐบาลทั้งภายในประเทศและต่างประเทศได้รับทราบ เพื่อนำไปประกอบการพิจารณา รอยต่อเฮเทอโรจังก์ชัน ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปใช้เป็นโครงการพัฒนาการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง

- J.L. Shay and J.H. Wernick, Ternary Chalcopyrite Semiconductor, Pergamon Press, London, 1975 : pp. 1 - 78.
- S. Wagner, "Device applications of ternary compounds", Ternary Compound. , The Institute of Physics Conferences Series ; No. 35, Bristol, 1977 : pp. 205 - 216.
- L. L. Kazmerski "The utilization of I-III-V₂ ternary compound semiconductor in thin film heterojunction and homojunction photovoltaic devices" Ternary Compound, The Institute of Physics Conferences Series ; No. 35, Bristol, 1977 : pp. 217 - 288.
- I. Shih, C. H. Champness and A. Vahidshahidi, Growth by directional freezing of CuInSe_2 and diffused homojunctions in bulk materials" Solar cells, 16 (1986) : 27 - 41.
- B. Tell, J.L.Shay and H.M. Kasper "Room temperature electrical properties of ten I-III-V₂ semiconductors" J. Appl. Phys. 43, 2496 (1972).

- P.W. Yu, Y.S. Park, S.P. Faile and J.E. Ehret, "Electroluminescence and photovoltaic detection in Cd-implanted CuInSe₂ p-n junction diodes" Appl. Phys. Lett., 26 (1975) : 717 - 719.
- S. Wagner, J.L. Shay and H.M. Kasper "The CuInSe₂/n-CdS heterodiode : photovoltaic detector, solar cell and light emitting diode" Journal de Physique, Colloque C3, Supplement au no 9, Tome 36, (1975) : C3-100-C3-104.
- W. Tantraporn, "Determination of low barrier heights in metal-semiconductor contact" J. Appli Phys. , 41 (11), (1970) : 466 - 4671

13. ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการวิจัยจะมีลักษณะและขั้นตอนการดำเนินงานแบบครบวงจร จากการวิจัยพื้นฐานจนถึงการวิจัยเพื่อการประยุกต์ในอนาคต กล่าวคือ เริ่มจากการพัฒนาเทคนิคการเตรียมสารกึ่งตัวนำ การพัฒนาวิธีการวัดคุณสมบัติ ฟิสิกส์ของผลึกและฟิล์มบางที่เตรียมได้ ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

13.1 การพัฒนาเทคนิคการเตรียมสารกึ่งตัวนำ

การพัฒนาเทคนิคการเตรียมสารกึ่งตัวนำ จะประกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ 3 วิธีด้วยกัน คือ

13.1.1 การหลอมสารและการแอนนیلสาร

13.1.2 การปลูกผลึกด้วยเทคนิคโตเรกซ์ชั้นนัล ฟริชชิง

13.1.3 การเตรียมฟิล์มบางโดยการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

13.2 การพัฒนาวิธีการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

การพัฒนาวิธีการและการศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำนอกจากจะมีจุดประสงค์เป็นการตรวจสอบวิธีการเตรียมผลึกแล้วยังเป็นการศึกษาข้อมูลทางทฤษฎีสารกึ่งตัวนำด้วยคุณสมบัติต่าง ๆ นี้ ได้แก่

13.2.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

13.2.2 การตรวจสอบผิวหน้าสารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

13.2.3 สมบัติเชิงแสง

13.2.4 สมบัติเชิงไฟฟ้า

13.2.5 สมบัติของรอยต่อโอห์มมิก

14. ขอบเขตของการวิจัยและพัฒนา

ระยะตอนที่หนึ่งเป็นการสร้างอุปกรณ์หลัก คือ เต่าที่สามารถใช้ในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำได้ทั้งสภาวะหลอมเหลว (melt growth) เช่น วิธีบริดจ์แมนส์โตคบาร์เกอร์ วิธีโตเรกชันนัลฟริชชิง เป็นต้น และสภาวะไอระเหยสารเคมี เช่น ขบวนการพาดด้วยไอระเหยสารเคมี เป็นต้น ซึ่งเป็นเตาโซนเดี่ยว (single zone furnace) มีอุณหภูมิสูงถึง 1200°C และเต่าที่ใช้ในการแอนนิลสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นเตาโซนเดี่ยว มีอุณหภูมิสูงถึง 600°C

ระยะตอนที่สอง เป็นการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 แบบโตเรกชันนัลฟริชชิง โดยใช้เทคนิคการลดอุณหภูมิเตาในแนวราบ เพื่อให้ได้ผลึกเดี่ยว ขนาดใหญ่ รวมทั้งเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2 ด้วยการระเหยธาตุตั้งต้น CuInSe_2 ในรูปของผลึกผง ในระยะสุดท้ายภาควิทยาศาสตร์ทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วยวิธี X-rays diffraction การวิเคราะห์ microstructure ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีซีวร้อน และการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพาว์ นอกจากนี้จะเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CdS โดยขบวนการ Sublimation process พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่นเดียวกับผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2

ระยะตอนที่สาม เป็นการเตรียมรอยต่อแบบโอห์มมิก โดยการระเหยโลหะผสมของอินเดียนขึ้นไปเคลือบบนฟิล์มของ CuInSe_2 และ CdS โดยควบคุมอุณหภูมิของฟิล์มบาง CuInSe_2 และ CdS อยู่ในช่วง $300 - 350^{\circ}\text{C}$ แล้วนำไปศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของรอยต่อ

15. ระยะเวลาทำการวิจัย

1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2538 ถึง 30 กันยายน 2539

16. รายละเอียดของแผนงานและวิธีวิจัยและพัฒนา

รายละเอียด	ระยะเวลา	ปีงบประมาณ 2539			
		เดือนที่ 1-3	เดือนที่ 4-6	เดือนที่ 7-9	เดือนที่ 10-12
1. จัดหาวัสดุธาตุบริสุทธิ์ Cu, In, Se, S, Cd, โลหะผสมอินเดียม		←→			
2. จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาเผา อุณหภูมิสูงถึง 1200°C		←→			
3. สร้างเตาเผาอุณหภูมิสูง และทดสอบการทำงานของเตา		←→			

รายละเอียด	ระยะเวลา	ปีงบประมาณ 2539			
		เดือนที่ 1-3	เดือนที่ 4-6	เดือนที่ 7-9	เดือนที่ 10-12
4. จัดเตรียมอุปกรณ์ท่อแก้วควอทซ์ระบบการนำก๊าซและก๊าซที่ใช้ในขบวนการพาไอระเหยสารเคมีในเตาเตรียมสารและสำหรับเตาแอนนีส		↔			
5. เตรียมสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 แบบโตเรกชันนัลฟริชซิง โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวราบ		↔			
6. เตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2 บนแผ่นแก้วบางในระบบสุญญากาศ		↔	↔		
7. ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างและ microstructure ของผลึกเดี่ยวและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2			↔		
8. เตรียมสารกึ่งตัวนำ CdS จากสถานะไอภายในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย			↔	↔	
9. เตรียมฟิล์มบางของ CdS บนแผ่นแก้วบางในระบบสุญญากาศ				↔	↔
10. ตรวจวิเคราะห์โครงสร้างและ microstructure ของผลึกเดี่ยวและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS				↔	↔
11. ศึกษาสมบัติเชิงแสง และเชิงไฟฟ้าของสารตัวอย่างดังกล่าว					↔
12. ศึกษารอยต่อแบบโฮมมิกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และ CdS กับโลหะผสมของอินเดียน					↔
13. สรุปผลการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป					↔

17. อุปกรณ์การวิจัย

17.1 อุปกรณ์ในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ

- เตาหลอมและเตาแอนนีส (anneal) พร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
- อุปกรณ์หลอมและปิดแก้วควอทซ์พร้อมทั้งระบบสุญญากาศอย่างสูง (10^{-6} torr) 1 ชุด
- ระบบสุญญากาศอย่างสูง (10^{-6} torr) สำหรับใช้งานทั่วไป 1 ชุด
- เครื่องขัดผลึก 1 ชุด

17.2 อุปกรณ์ศึกษาคุณสมบัติกายภาพ

- เครื่องสเปกโตรมิเตอร์เชิงทัศนศาสตร์ (Optical Spectrometer) พร้อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 1 ชุด
- เครื่องระเหยโลหะแบบสุญญากาศ 1 ชุด
- อุปกรณ์ที่มีในห้องปฏิบัติการรังสีเอ็กซ์
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

อุปกรณ์ข้อ 17.2 บางส่วนนั้น คณะวิจัยมีพร้อมอยู่แล้ว สิ่งที่ต้องจัดซื้อและสร้างเพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้ได้แก่

- อุปกรณ์ข้อ 17.1
- เอกสารและหนังสือเกี่ยวกับงานวิจัยและที่เกี่ยวข้อง
- อุปกรณ์ส่งเสริมงานวิจัย ได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้งานเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์บางชนิด เครื่องเขียน กระดาษที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
- หลอดแก้วควอทซ์สำหรับบรรจุสารเวลาหลอม
- ธาตุบริสุทธิ์ที่ใช้ในการเตรียมผลึก
- สารละลายเคมีบางชนิดที่ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนฉนวนนำสารกึ่งตัวนำ
- ระบบก๊าซสำหรับเตา anneal และ Vapor phase epitaxy
- อุปกรณ์อะไหล่สำหรับเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว

18. ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคม

ถึงแม้ว่าขณะนี้จะมีการศึกษาวิจัยและพัฒนา เซลแสงอาทิตย์กันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศก็ตามในเชิงพาณิชย์ก็ยังจัดได้ว่าเป็นค่าใช้จ่ายในอัตราชั้นสูง จึงเป็นการยากแก่การนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น และคาดว่าจะมีโครงการอื่นต่อเนื่องจากโครงการนี้เพื่อพัฒนา เซลแสงอาทิตย์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ให้เข้าสู่อุตสาหกรรมภายในประเทศต่อไป ซึ่งอาจจะใช้เวลาวิจัยและพัฒนาในระยะเวลาไม่นานนัก อันจะมีผลให้ประเทศไทยสามารถผลิตสิ่งประดิษฐ์ที่นำมาใช้สอยได้ทันต่อเหตุการณ์ เช่น เครื่องวัดทางไฟฟ้า เครื่องวัดทางแสง คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์การสื่อสารต่าง ๆ เป็นต้น โดยอาศัยวัสดุชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตได้เองภายในประเทศ ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตจากที่เคยอาศัยการสั่งซื้อ นำเข้าจากต่างประเทศ ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงเห็นได้ชัดเจนว่าโครงการวิจัยนี้มีผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างมากมายทุกแขนงทั้งหน่วยงานรัฐบาลและภาคเอกชน

19. รายละเอียดงบประมาณปี 2539

ข้าพเจ้า นายฐิตินัย แก้วแดง ข้าราชการประจำสถาบันฯ ตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 7 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอรับรองว่าจะปฏิบัติตามระเบียบและข้อกำหนดในการขอรับทุนอุดหนุนการวิจัยของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

1. หมวดค่าจ้างชั่วคราว

- ค่าจ้างผู้ช่วยนักวิจัย

76.320 บาท

ระดับปริญญาตรี อัตราเงินเดือน 6,360 บาท จำนวน 1 คน

เพื่อทำหน้าที่จัดซื้ออุปกรณ์ ประกอบและทดสอบระบบต่าง ๆ

ตลอดจนเตรียมสาร เก็บข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลเป็นระยะ

เวลา 12 เดือน

รวมหมวดค่าจ้างชั่วคราว

76.320 บาท

2. หมวดค่าสาธารณูปโภค

ค่าไปรษณีย์ต่างประเทศ

1,000 บาท

รวมหมวดค่าสาธารณูปโภค

1,000 บาท

3. หมวดค่าใช้จ่าย

- ค่าเข้าปกเย็บเล่มรายงาน	580 บาท	
- ค่าจ้างเชื่อมและกลึงชิ้นงานสแตนเลส ในส่วนของระบบสุญญากาศ และระบบท่อนำก๊าซของระบบเตรียมสารแบบพาโอระเหยสารเคมี	28,000 บาท	
รวมหมวดค่าใช้จ่าย		28,580 บาท

4. หมวดค่าตอบแทน

ค่าอาหารทำงานนอกเวลา สำหรับพนักงานพิมพ์ดีด จำนวน 1 คน	1,500 บาท	
อัตราวันละ 100 บาท × 15 วัน		
รวมหมวดค่าตอบแทน		1,500 บาท

5. หมวดค่าวัสดุ

5.1 วัสดุสำนักงาน

- กระดาษพิมพ์แบบต่อเนื่อง 8" × 11" 1 กล่อง	500 บาท
- ผ้าหมึกเครื่องพิมพ์ สำหรับคอมพิวเตอร์ 1 อัน	600 บาท
- ค่าถ่ายเอกสาร	2,000 บาท
- ค่าล้างฟิล์มและอัดรูป	1,000 บาท

5.2 วัสดุสำหรับสร้างเตาโซนเดี่ยวแบบบริดจ์แมน 79,700 บาท

สโตนบาเกอร์อุณหภูมิสูงเพื่อเตรียมฟิล์มบางแบบพาโอระเหย
เคมี พร้อมระบบก๊าซเฉื่อยและเตาแอนนูล พร้อมระบบ
ท่อนำก๊าซเฉื่อย

5.3 วัสดุไฟฟ้าสำหรับสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิเตา เช่น 20,000 บาท

สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง วงจรควบคุมป้อนกลับและวงจร
เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ได้แก่ ไอซี ตัวต้านทาน
ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ สายโคแอกเซียล เทอร์โมคัปเปิล
 ฯลฯ

5.4 ค่าวัสดุในการเตรียมสาร เช่น ฮาตุบริสุทธิ์ Cu, In, Se, Cd, S 103,000 บาท

และโลหะผสมอินเดียม, แผ่นแก้วบาง, ท่อแก้วควอทซ์,
สารละลายเคมี, เรซินสำหรับน้ำ D.I., ผงขัดอูมินา ฯลฯ

5.5 ค่าวัสดุสำหรับการประกอบ ระบบสุญญากาศ ได้แก่	35,000 บาท
ท่อ ข้อต่อ วาล์ว สุญญากาศ	
รวมหมวดค่าวัสดุ	241,800 บาท
รวมทั้งสิ้น	349,200 บาท

ลงชื่อ

(นายฐิตินัย แก้วแดง)

หัวหน้าโครงการ



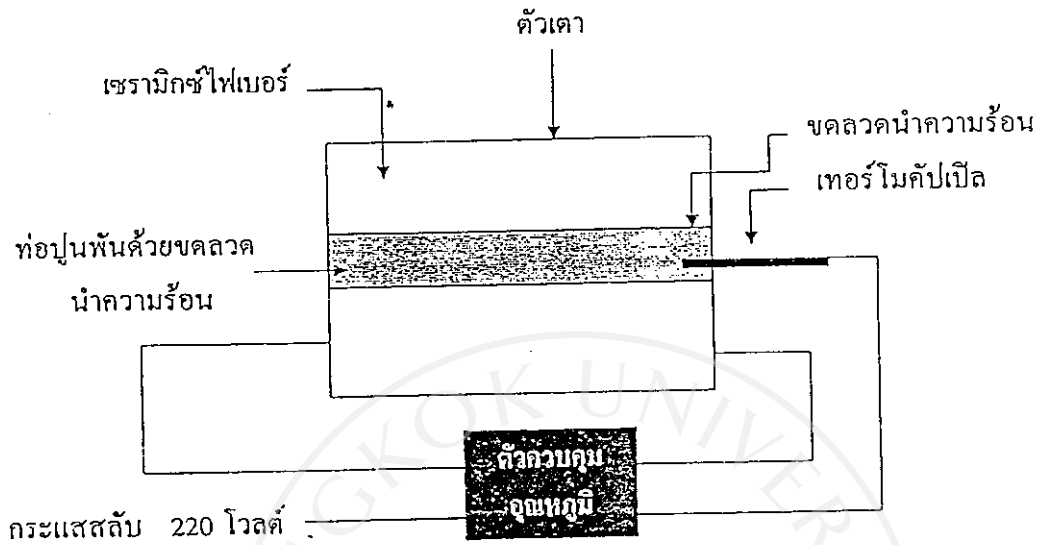
บทที่ 2

การปลูกผลึก

ผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2 ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ เตรียมจากวิธีโตเรกซ์ชั้นนัลฟริชซิง โดยลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา กับแนวราบด้วยการลดอุณหภูมิเตาแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะใช้วงจรไฟฟ้าต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาเพื่อทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ ส่วนผลึกเดี่ยวของ CdS เตรียมจากสภาวะไวที่อุณหภูมิ $1150\text{ }^\circ\text{C}$ ในหลอดแก้วควอทซ์ที่มีปลายด้านหนึ่งปิดและปลายอีกด้านหนึ่งเปิด ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ โดยดัดแปลงจากเทคนิคการปลูกผลึกจากสภาพไอของ Piper และ Polich [12]

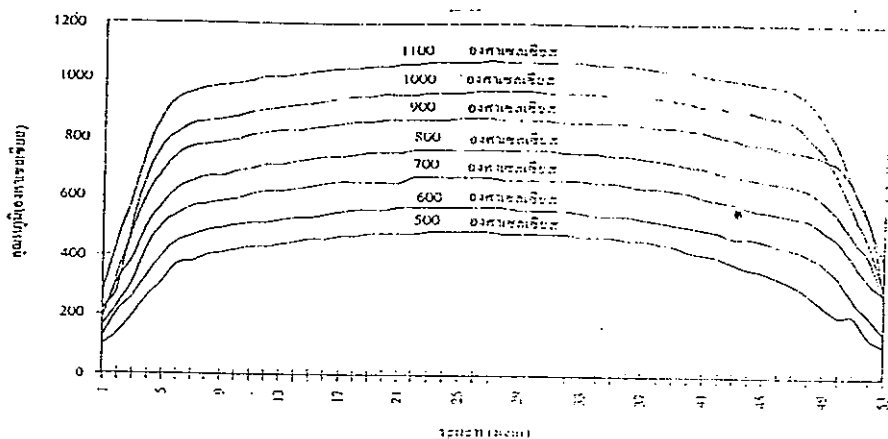
2.1 การสร้างเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยวสำหรับปลูกผลึกเดี่ยว

เตาที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นเตาโซนเดี่ยวจำนวน 3 เตา มีขนาด $40 \times 80 \times 40\text{ cm}^3$ จำนวน 1 เตา และขนาด $54 \times 30 \times 30\text{ cm}^3$ อีก 2 เตา โดยมีเตาขนาดใหญ่เอาไว้ปลูกผลึกเดี่ยวแบบโตเรกซ์ชั้นนัลฟริชซิง ส่วนเตาขนาดเล็กไว้ปลูกผลึกเดี่ยวจากสภาวะไอระเหย และใช้สำหรับแอนนีลสารภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เริ่มต้นจากการสร้างแบบแกนเตา โดยการใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 cm ยาว 80 cm มาผ่าออกเป็น 2 ซีกตามแนวยาว นำแผ่นไม้ขนาด $3 \times 80 \times 0.4\text{ cm}^3$ จำนวนสองแผ่นมาสอดไว้ระหว่างรอยผ่าให้เสมอกับผิวนอกของท่อ แล้วใช้แผ่นไม้ขนาดเล็ก 2 แผ่น มาขันน็อตยึดแผ่นไม้ไว้ไม่ให้เคลื่อนและทำให้ท่อพีวีซีที่ผ่าแล้วคงรูปเดิม นำแผ่นพลาสติกมาพันรอบท่อพีวีซี รัดท่อให้แน่นด้วยเข็มขัดรัดท่อที่บริเวณปลายท่อทั้งสองข้าง จากนั้นใช้น้ำมันหล่อลื่นทาให้ทั่วแผ่นพลาสติก แล้วจึงนำลวดแคนทาล (kantal A1) มาพันรอบท่อโดยให้ระยะห่างระหว่างรอบประมาณ 0.7 cm ในการพันขดลวดนั้นข้อควรระวัง คือ ควรดึงลวดให้ตึงขณะที่ทำการพัน โดยยึดปลายลวดด้านหนึ่งไว้ที่ปลายท่อ แล้วพันลวดจนได้ความยาวประมาณ 70 cm จากนั้นก็ยึดลวดไว้ที่ปลายท่ออีกด้านหนึ่ง แล้วจึงฉาบด้วยซีเมนต์ทนความร้อน CAST 15 ให้มีความหนาประมาณ 1 cm ซีเมนต์นี้จะทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรอันเนื่องมาจากลวดแตะกันขณะที่ลวดร้อน และขยายตัวเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน พรมน้ำเป็นระยะ ๆ เพื่อให้ปูนอยู่ตัว ถ้ามีรอยร้าวเกิดขึ้นให้ฉาบปูนซีเมนต์ทับอีกครั้ง เมื่อปูนแห้งดีแล้วจึงเอาท่อพีวีซีที่เราใช้เป็นแบบออก โดยคลายเข็มขัดรัดท่อออกแล้วดึงแผ่นไม้ที่ใช้สอดเอาไว้ออกก่อน จากนั้นจึงดึงท่อพีวีซีและแผ่นพลาสติกออก นำลงไปบรรจุในกล่องอลูมิเนียมที่เตรียมไว้แล้ว โดยมีเซรามิกไฟเบอร์เป็นฉนวนความร้อนบรรจุในช่องว่างระหว่างท่อกับกล่องอลูมิเนียมจนแน่น ต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างเข้ากับระบบควบคุมอุณหภูมิ ส่วนประกอบของระบบเตาโซนเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.1



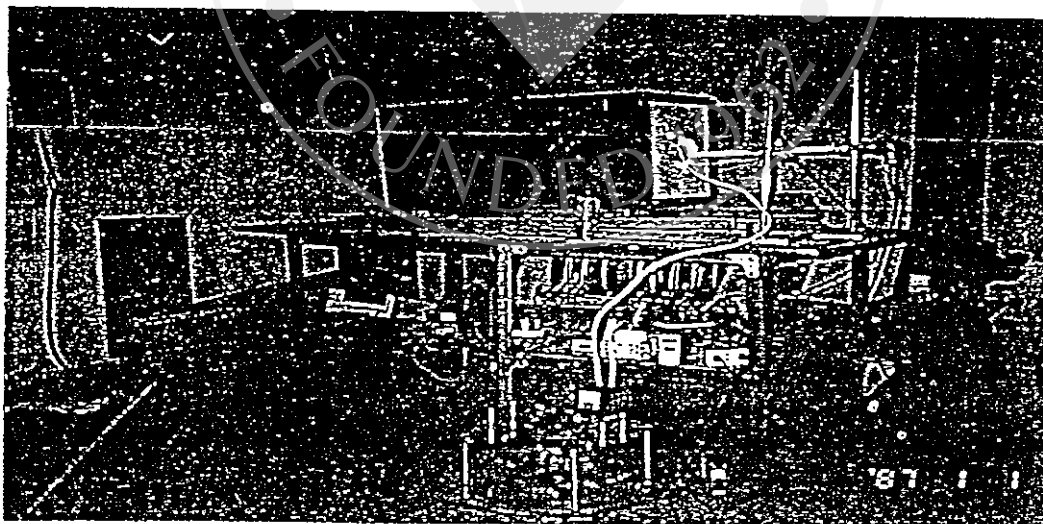
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของระบบเตาโซนเดี่ยวพร้อมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ

สำหรับเตาขนาด $54 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ อีกจำนวน 2 เตา ก็สร้างขึ้นด้วยวิธีเดียวกัน ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับจากแวลวารีแอค (variac) ให้กับขดลวดภายในเตา มีวงจรควบคุมอุณหภูมิตามที่ต้องการ ใช้สวิตช์แม่เหล็ก (magnetic switch) เป็นตัวตัดกระแสที่ป้อนให้กับเตา เมื่อพบว่าอุณหภูมิสูงกว่าที่ตั้งไว้ เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ และเมื่ออุณหภูมิภายในเตาลดลงจากค่าที่ตั้งไว้ ก็จะจ่ายกระแสให้กับเส้นลวดอีก โดยเราจะอ่านค่าอุณหภูมิของเตาผ่านทางเทอร์โมคับเปิลที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยการสอดเทอร์โมคับเปิลเข้าไปตามแนวยาวของท่อให้ปลายอยู่ที่ตำแหน่งกลางเตา รูปที่ 2.2 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิเตาโซนเดี่ยวที่สร้างขึ้น

วางเตาบนแท่นที่สามารถปรับมุมให้เตาเฉียงประมาณ 5 องศา ได้อย่างสะดวก ดังรูปที่ 2.3 ส่วนสำคัญ คือ วงจรไฟฟ้ากำลังกลศาสตร์ที่ต่อพ่วงเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ

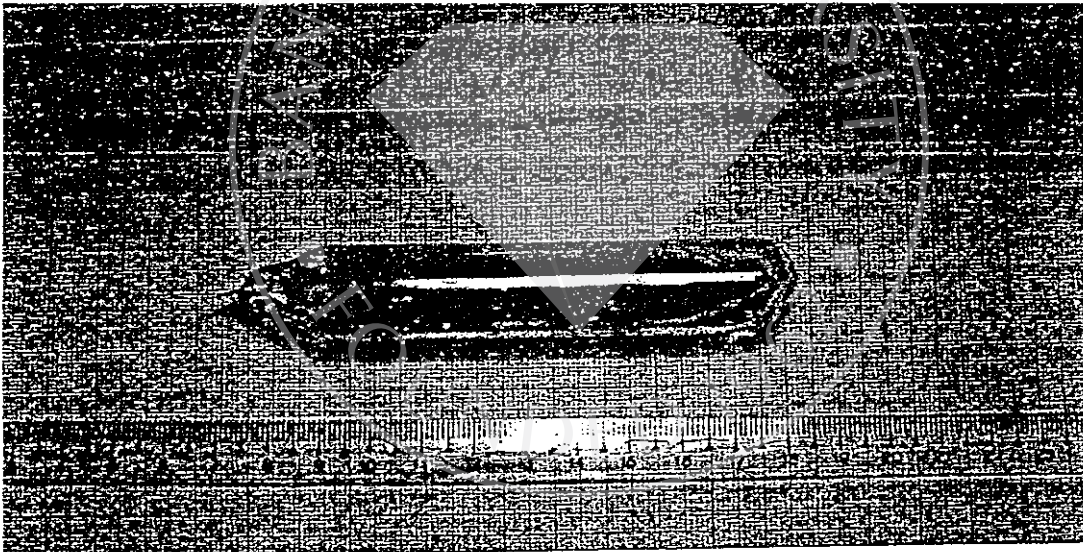


รูปที่ 2.3 แสดงระบบเตาในแนวเฉียง 5 องศา ขณะกำลังหลอมสารที่อุณหภูมิ 1150 °C

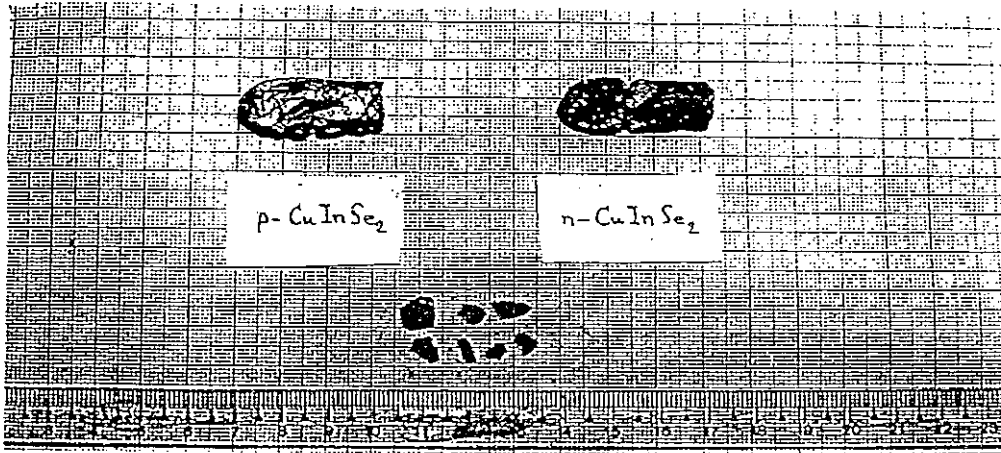
2.2 การปลูกผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2

2.2.1 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสารตั้งต้น

ภาชนะที่ใช้เป็นหลอดแก้วควอทซ์ (fused quartz) ที่สามารถทนได้สูงถึง $1583\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงจะเริ่มหลอมเหลว ใช้หลอดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 mm ยาวประมาณ 20 cm ทำความสะอาดโดยใช้สารละลาย $\text{HCl} : \text{HNO}_3$ ในอัตราส่วน $3 : 1$ และน้ำดีไอออไนซ์ 10 ส่วน จากนั้นจึงหลอมปิดปลายข้างหนึ่งให้เป็นรูปกรวย ซึ่งมีมุมกรวยประมาณ 30 องศา ด้วยหัวเชื่อมก๊าซออกซิเจน-อะเซทิลีน บรรจุธาตุบริสุทธิ์ Cu , In และ Se ตามสัดส่วนปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric) ปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมดรวม 15 กรัม ดูดอากาศออกจากหลอดแล้วหลอมปิดหลอด จากนั้นจึงนำไปใส่ในหลอดแก้วควอทซ์ที่ใหญ่กว่า แล้วดูดอากาศออกแล้วหลอมปิด จะได้หลอดแก้วควอทซ์สองชั้น ดังรูปที่ 2.4 แล้วนำเอาไปเข้าเตาเผาเพื่อหลอมสารเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิของเตาลงอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราเร็วประมาณ $2\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ โดยใช้วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ [13] เมื่อสารตัวอย่างแข็งและเย็นจึงนำออกไปตัดเอาหลอดแก้วควอทซ์ แล้วจะได้ผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ดังรูปที่ 2.5



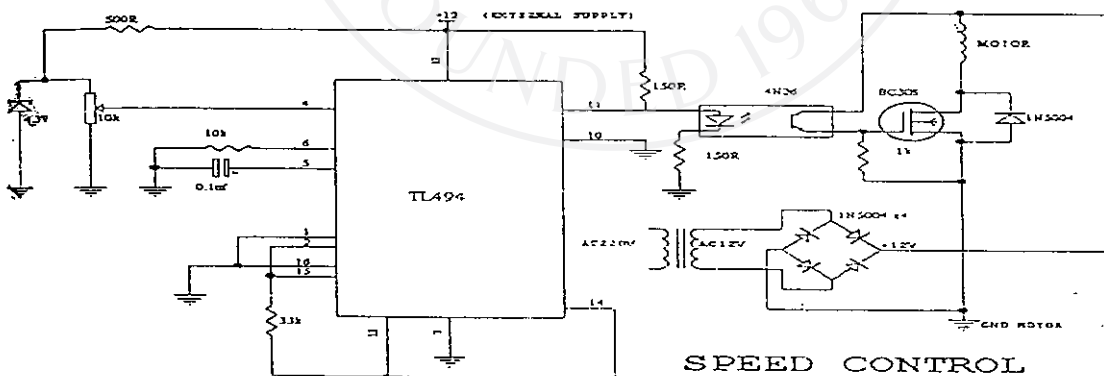
รูปที่ 2.4 แสดงหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุ Cu , In และ Se ก่อนนำไปหลอม



รูปที่ 2.5 แสดงขนาดของผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ โดยวิธีลดอุณหภูมิเตา ในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา

2.2.2 การทำความสะอาดผิวหน้าผลึก

ได้ทำการสร้างเครื่องขัดผิวหน้าผลึก โดยมีแป้นหมุนคลุมด้วยผ้าขัดชนิดเนื้อหยาบและใช้ผงขัดอลูมินา (Al_2O_3) ขนาด $2.5\ \mu\text{m}$ ซึ่งละลายในแอลกอฮอล์ผสมน้ำ แป้นหมุนนี้จะติดกับมอเตอร์ที่มีวงจรควบคุมความเร็วได้ตามต้องการ วงจรนี้แสดงดังรูปที่ 2.6



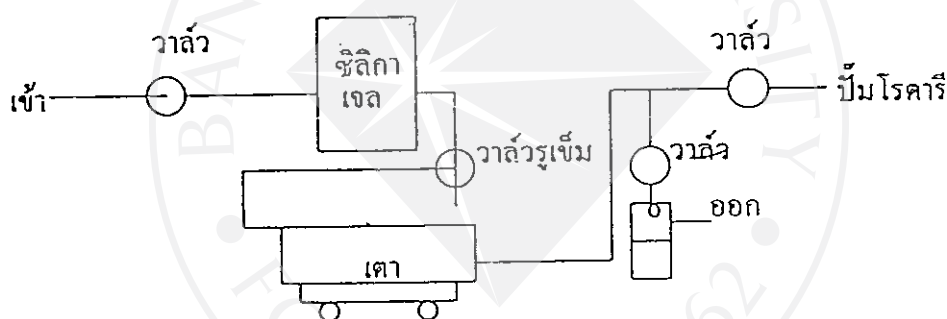
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของเครื่องขัดผิวหน้าชั้นผลึก

ผลึกที่ได้รับการขัดด้วยผงขัดอลูมินาจะเรียบเป็นมันวาว จากนั้นนำไปล้างสิ่งสกปรกออกด้วย แอลกอฮอล์ และตามด้วยน้ำดีไอออนซ์ เพื่อที่จะลดร่องรอยการขีดข่วนจากขัดด้วยผงขัดอลูมินา ดังนั้น จึงต้องมีการกัดผิวหน้าด้วยสารละลาย $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ด้วยปริมาณ 13.5 cm^3 , 7.5 cm^3 และ 10 cm^3 ตามลำดับ [14]

2.3 การปลูกผลึกเดี่ยวของ CdS

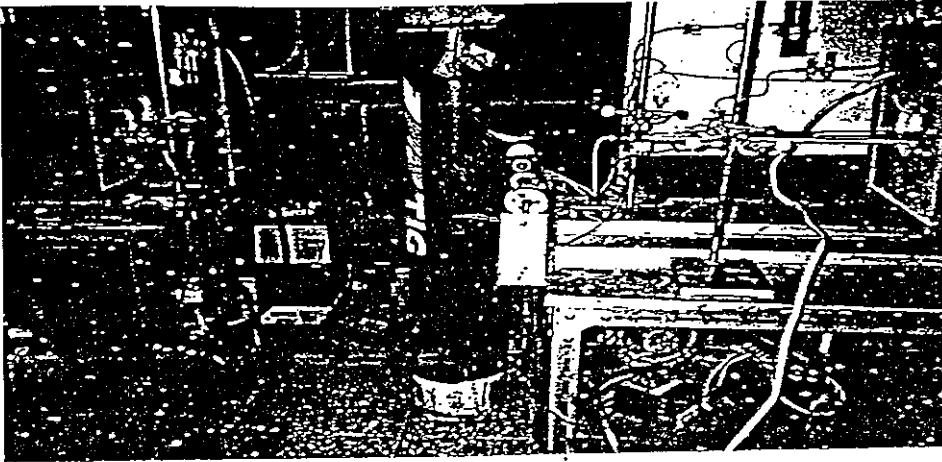
2.3.1 การสร้างระบบเพื่อใช้ปลูกผลึกจากสถานะไอ

การปลูกผลึกจากสถานะไอนี้จะต้องอยู่ภายในบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน บริสุทธิ์ เป็นต้น ภาชนะที่ใช้ปลูกผลึกจะอยู่ในท่อแก้วควอทซ์ขนาดใหญ่ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 cm และยาว 120 cm และสอดอยู่ในเตา ก๊าซอาร์กอนจะไหลจากถังบรรจุผ่านซิลิกาเจลเข้ามาในท่อแก้วควอทซ์ในเตา แล้วผ่านทางช่องระบายออกสู่ภายนอก แผนภาพของระบบการไหลของก๊าซอาร์กอนที่สร้างขึ้นอยู่ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงระบบการไหลของก๊าซอาร์กอนผ่านเข้ามาในเตาปลูกผลึกของสาร CdS

ในการปลูกผลึก CdS นี้จะใช้เทคนิคการเลื่อนเตาอย่างช้า ๆ เสมอ ดังนั้นจึงต้องสร้างระบบการเลื่อนเตาโดยให้เตาวางอยู่บนรางเลื่อนอลูมิเนียมที่มีความฝืด เตาจะถูกดึงให้เคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ด้วยมอเตอร์รอบช้า ด้วยอัตราเร็วประมาณ 1.5 mm/hr [15] ระบบการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdS แสดงไว้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงภาพถ่ายของระบบเตาที่ใช้ปลูกผลึก CdS

2.3.2 ขั้นตอนการปลูกผลึก CdS จากสถานะไอ

วิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Piper และ Polish [12] โดยภาชนะที่ใช้ในการปลูกผลึกเป็นท่อแก้วควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 cm ยาวประมาณ 30 cm หลอมปิดปลายด้านหนึ่งเป็นรูปกรวยทำมุม 30 องศา (ดังรูปที่ 2.9) เพื่อควบคุมให้เกิดนิวเคลียสเอชันที่ปลายแหลมรูปกรวยนี้ รวมทั้งมีท่อแก้วควอทซ์ขนาดเล็กต่อจากปลายแหลมเพื่อช่วยระบายความร้อนของผลึกที่ปลูก ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะมีท่อแก้วควอทซ์ปลายปิดสอดเข้าพอดีเป็นตัวปิดกั้นสารตั้งต้น เมื่อเกิดการระเหิดของสารตั้งต้นจะมีไอหนีออกมาทางนี้ แต่เนื่องจากท่อควอทซ์นี้ยาวพอที่จะทำให้ไอที่รั่วออกมาเย็นตัวก็จะแข็งตัวปิดกั้นทำให้กลายเป็นระบบปิด



รูปที่ 2.9 แสดงภาชนะท่อแก้วควอทซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก CdS

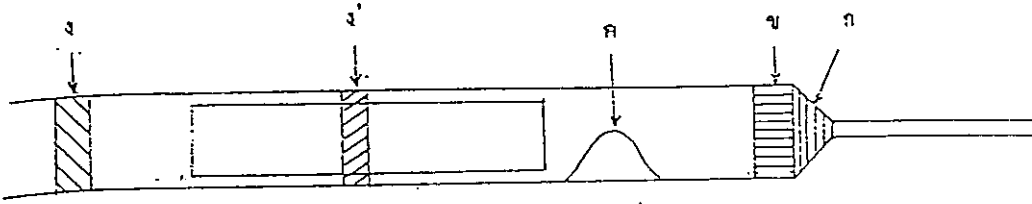
เริ่มทำการทดลองโดยการบดสารตั้งต้นให้เป็นผงละเอียด แล้วนำไปวางไว้ในภาชนะท่อแก้วควอทซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก ให้อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากปลายแหลมรูปกรวยเป็นระยะทาง 3.5 cm ทั้งนี้ภาชนะท่อแก้วควอทซ์ที่ใช้จะต้องผ่านการล้างอย่างสะอาด และผิวด้านในต้องเรียบ โดยเฉพาะที่ปลายแหลมรูปกรวย เนื่องจากมีผิวขรุขระและสิ่งสกปรกจะกลายเป็นนิวเคลียสเอชของการเกิดผลึก ทำให้ผลึกที่ได้มีหลายเกรน หรือเป็นก้อนผลึกที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก นำเอาภาชนะนี้ไปสอดเข้าไว้ในท่อแก้วควอทซ์ขนาดใหญ่ที่วางอยู่ในเตา จัดภาชนะท่อแก้วควอทซ์นี้ให้อยู่ในตำแหน่งของโพรไฟล์เตาที่เหมาะสม ปิดหัวท้ายของท่อแก้วควอทซ์ขนาดใหญ่ด้วยคัปปลิงแล้วต่อเข้ากับระบบก๊าซเฉื่อย ทำการดูดอากาศออกด้วยปั๊มโรตารี (rotary pump) แล้วเติมก๊าซอาร์กอนเข้าไปจนเต็มจึงทำการดูดอากาศออกอีก ทำซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่ในระบบน้อยที่สุด จากนั้นจึงปล่อยให้ก๊าซอาร์กอนไหลผ่านระบบด้วยอัตราเร็วประมาณ 1 ฟองของอากาศ / วินาที ความดันภายในระบบเท่ากับ 1 บรรยากาศเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาเป็นระดับขั้นดังนี้ คือ

จาก	25	-	300 °C	ในอัตรา	100 °C /hr	แล้วทิ้งไว้	1 วัน
จาก	300	-	800 °C	ในอัตรา	50 °C /hr	แล้วทิ้งไว้	1 วัน
จาก	1,000	-	1,150 °C	ในอัตรา	50 °C /hr	แล้วทิ้งไว้	1 วัน

จากนั้นทำการเลื่อนเตาด้วยอัตราเร็ว 1.5 mm/hr เพื่อให้ปริมาณปลายแหลมเลื่อนเข้าไปทางด้านโพรไฟล์เตาที่มีอุณหภูมิต่ำลง ไอระเหยของ CdS จะไปควบแน่นกลายเป็นผลึกที่ปลายแหลมรูปกรวย

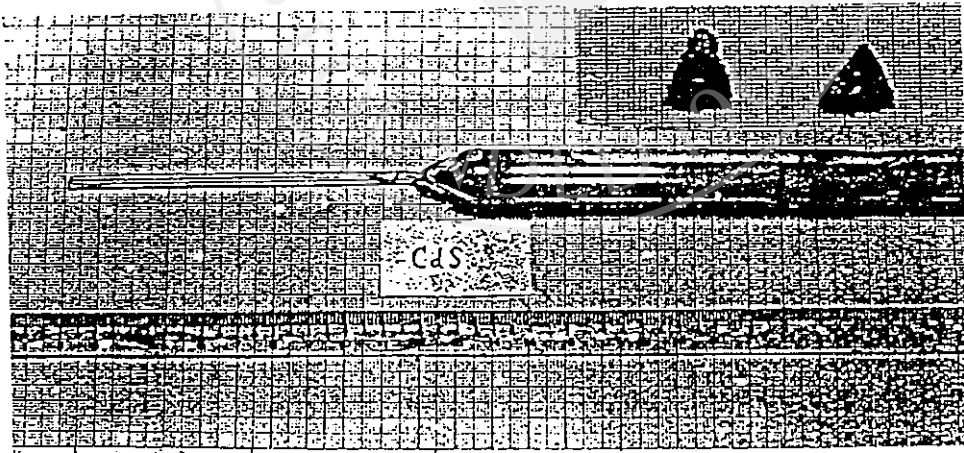
2.3.3 ผลของการปลูกผลึกเดี่ยวของ CdS

ผลึกที่สมบูรณ์เกิดบริเวณปลายกรวยแหลม ซึ่งเป็นนิวเคลียสเอชของการปลูกผลึกมีลักษณะเป็นรูปกรวยขนาด 1.5 cm (ตั้งตำแหน่ง ก ของรูปที่ 2.10) ส่วนตำแหน่ง ข เกิดผลึกแผ่นบาง ๆ เกาะอยู่บริเวณใกล้ปลายกรวยแหลม ส่วนผลึกที่เกิดจากผงผลึกของสารตั้งต้นที่เหลือจากการปลูกผลึกจะอยู่ที่ตำแหน่ง ค ส่วนตำแหน่ง ง เป็นผลึกที่มีขนาดเล็กจำนวนมากรวมตัวกันหนาแน่น



รูปที่ 2.10 แสดงตำแหน่งของการเกิดผลึก

รูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายของภาชนะที่ใช้เตรียมผลึก และผลึกขนาดใหญ่ที่เตรียมได้ ผลึกส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดที่ปลายแหลมรูปกรวยอย่างเดียว อาจเป็นเพราะว่าบริเวณรอบท่อควอทซ์ที่ใช้กัน สารตั้งต้นอุดมทมิไม่เย็นพอที่ไอ CdS มาตกผลึกได้ ดังนั้นไอของ CdS จึงไปตกผลึกที่ปลายท่อ แก้วควอทซ์ด้านตรงข้ามกับปลายแหลม รวมทั้งอัตราเร็วของการเลือนเตาอาจจะเร็วเกินไป ผลึกที่เป็นก้อนขนาดใหญ่จะมีสีน้ำตาล ผิวเป็นมันไม่ติดกับผิวด้านท่อควอทซ์ มีรอยร้าวขนาดเล็กในเนื้อผลึกบ้างเล็กน้อย ลักษณะผิวหน้าผลึกเป็นชั้นวางซ้อนทับกันโดยส่วนใหญ่อยู่ในทิศทางเดียวกัน ส่วนผลึกก้อนเล็กหรือเป็นแผ่นบาง ๆ จะมีสีเหลือง



รูปที่ 2.11 แสดงผลึกของ CdS ที่ปลูกได้จากสภาวะไอ

บทที่ 3

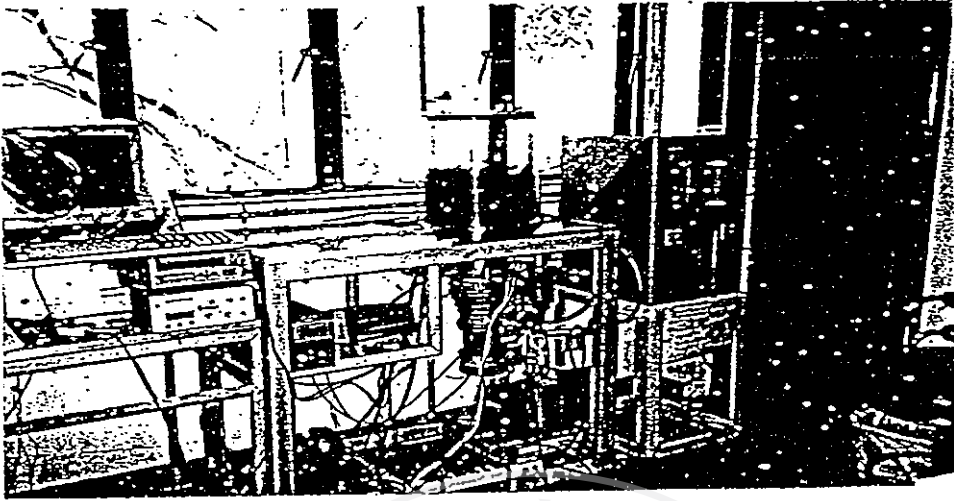
การเตรียมฟิล์มบาง

เทคโนโลยีของฟิล์มบางมีความจำเป็นต่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแม้ว่าคุณสมบัติของฟิล์มบางจะด้อยกว่าผลึกเดี่ยว เนื่องจากฟิล์มบางมักเป็นผลึกหลายรูป (Polycrystalline) แต่ปัจจุบันได้พัฒนาให้ฟิล์มบางมีคุณภาพดีขึ้นโดยเทคนิคการเตรียมที่หลากหลาย ในแต่ละครั้งจะทำได้ในปริมาณที่มากใช้เนื้อวัสดุน้อยใช้เวลาสั้นกว่า ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตฟิล์มบางต่ำกว่าการผลิตผลึกเดี่ยว

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ $\text{CdS}/\text{CuInSe}_2$ ได้รับการพัฒนาจนมีประสิทธิภาพสูงกว่า 16% ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2 และ CdS ด้วยเทคนิคการระเหยสารตั้งต้นด้วยความร้อนจากแหล่งกำเนิดแหล่งเดียวภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำ ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

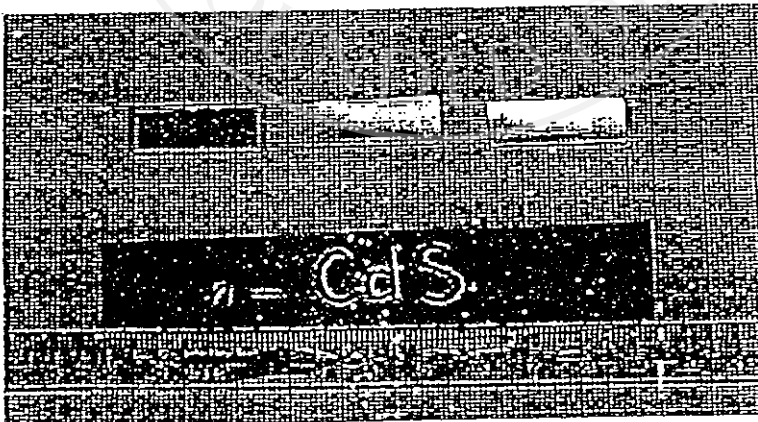
3.1 การเตรียมฟิล์มบางของ CdS

ระบบสุญญากาศที่ใช้ในการระเหยสารสามารถทำความดันได้ต่ำกว่า 2×10^{-5} mbar ด้วยปั๊มพีโรตารีและปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) ดังรูปที่ 3.1 นำก้อนสาร CdS (ความบริสุทธิ์ 99.999% จากบริษัท Cerac) ใส่ลงในโบท (boat) ทังสแตน แล้วทำการสูบอากาศออกจนมีความดันต่ำกว่า 2×10^{-5} mbar จากนั้นจึงปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านโบทจนร้อนแดงด้วยอุณหภูมิสูงราว 1150°C (วัดด้วยไพโรมิเตอร์) โอระเหยจะเคลือบบนกระจกสไลด์ขนาด $2.5 \times 1.25 \text{ cm}^2$ ใช้เวลาระเหยประมาณ 8 นาที อัตราความหมายของฟิล์มบางประมาณ $10 \text{ \AA}/\text{s}$ ขณะทำการระเหยสารจะควบคุมให้ฐานรองกระจกสไลด์มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 150°C



รูปที่ 3.1 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางของ CdS ด้วยวิธีระเหย ด้วยความร้อนจากแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว

ฟิล์มบางของ CdS จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลักษณะของหน้ากาก (mask) มีสีเหลืองใสเป็นเงาเรียบสม่ำเสมอและติดแน่นกับกระจกสไลด์ดีมาก (ดังรูปที่ 3.2) ถ้ากระจกสไลด์ที่ใช้ได้นำเอาไปขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้มีรอยขีดข่วนฟิล์มจะติดน้อยกว่า กระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดแบบปกติด้วยอะซิโตน เอทิลแอลกอฮอล์ และน้ำกลั่นตามลำดับ นำฟิล์มที่เตรียมได้ไปแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงจะนำไปศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานอื่น ๆ ต่อไป

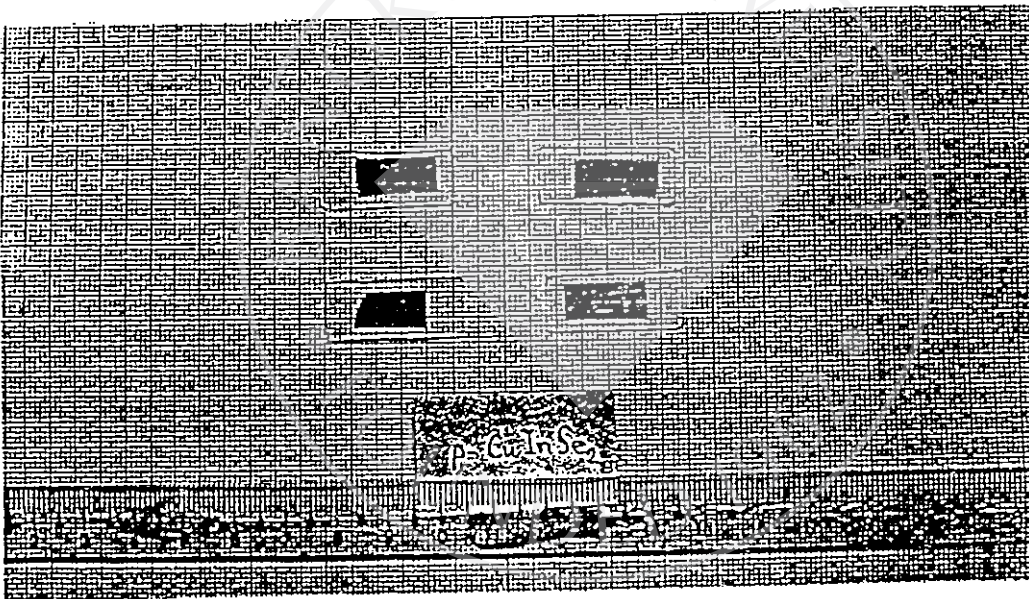


รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของ CdS ที่เตรียมได้

3.2 การเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2

ใช้ผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2 ที่เตรียมได้จากวิธีโตเรกซ์นัล ฟริชชิง เป็นสารตั้งต้น และใช้กระจกสไลด์เป็นฐานรอง ทำการระเหยสารจากโบททั้งสเดน ภายใต้สุญญากาศความดันต่ำราว 2×10^{-5} mbar เป็นเวลา 10 นาที ควบคุมฐานรองให้มีอุณหภูมิคงที่ 150°C ขณะทำการระเหยสาร

ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสีเทาดำ (ดังรูปที่ 3.3) แต่ถ้าในระบบสุญญากาศมีสิ่งเจือปนอย่างเช่น CdS ฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลืองแถบเทา ขนาดของฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับขนาดของหน้าฉาก โดยฟิล์มที่ทำการเคลื่อนนั้นจะติดกับแผ่นสไลด์ดีหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเตรียมกระจกสไลด์ด้วย ซึ่งพบกระจกสไลด์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 30 นาที และเรียบไม่มีรอยขีดข่วน เมื่อนำมาใช้เป็นฐานรองจะทำให้ได้ฟิล์มบางที่เรียบสม่ำเสมอ และติดแน่นกับกระจกได้ดีกว่ากรณีที่ใช้ฐานรองเป็นกระจกสไลด์ที่มีร่องรอยการขีดข่วนโดยใช้กระดาษทรายขัด



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของ CuInSe_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำ

บทที่ 4

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสารตัวอย่าง

ในบทนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ โดยเริ่มต้นจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) คุณสมบัติเชิงแสง และคุณสมบัติเชิงไฟฟ้า เป็นต้น หลังจากการตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นแนวทางในการปรับปรุงวิธีการเตรียมสารตัวอย่าง เพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีต่อไป

4.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

4.1.1 สำหรับผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2

นำเอาผลึกเดี่ยวของสารตัวอย่างที่เตรียมได้บางส่วนมาบดละเอียดเป็นผลึกผง และเติมผลึกผงของซิลิกอนลงไปเล็กน้อย เพื่อเป็นตัวมาตรฐานสำหรับแก้ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

เมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านเข้าไปในผลึกผงรังสีเอ็กซ์นี้จะเลี้ยวเบนออกมา เนื่องจากระนาบต่าง ๆ ที่เอียงทำมุมกับแนวรังสีตกกระทบ เป็นมุมที่สอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ดังสมการ

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.1)$$

สำหรับ CuInSe_2 นี้เป็นสารประกอบซัลไฟด์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทอร์โกนอล จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวนี้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (λ) มุมของแบรกก์ระนาบ (h, k, ℓ) ต่าง ๆ ของผลึก และค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (a, c) ดังความสัมพันธ์

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right) = \frac{1}{4} \left[\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{\ell^2}{c^2} \right] \quad (4.2)$$

ทำการหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนได้โดย

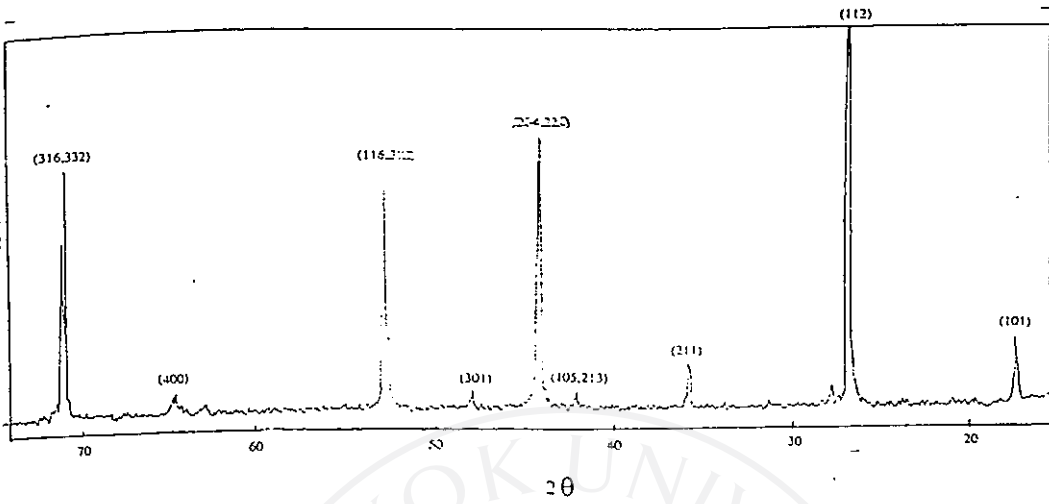
$$\left[\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right]_{\text{Si, cal}} - \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{\text{Si, obs}} = \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{\text{Si}} \quad (4.3)$$

และ

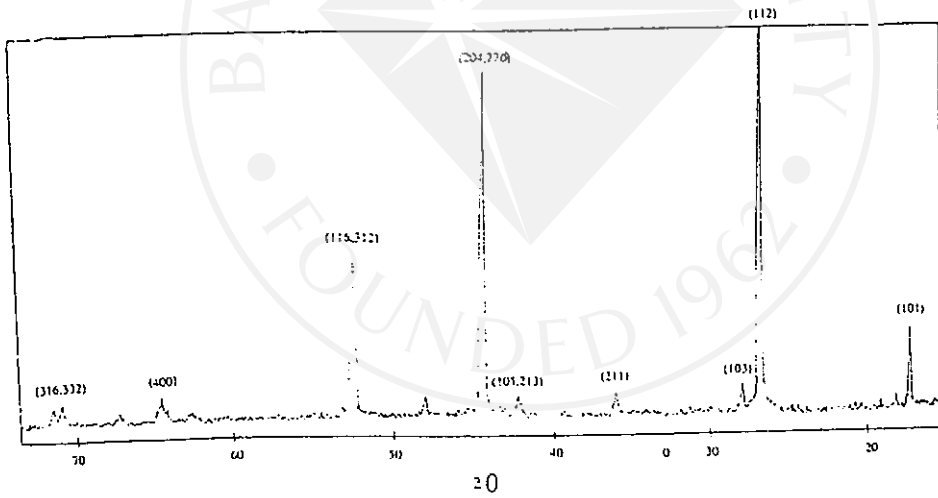
$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{\text{CuInSe}_2, \text{ corr}} = \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{\text{CuInSe}_2, \text{ obs}} + \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{\text{Si}} \quad (4.4)$$

แล้วนำสมการ (3.4) แทนลงในสมการ (3.2) เมื่อพิจารณา $h k l$ ที่ค่าต่าง ๆ เพื่อใช้คำนวณหาค่าคงที่โครงผลึกโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากการคำนวณหาค่าคงที่โครงผลึกของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยใช้ S: เป็นตัวมาตรฐาน สามารถหาได้ว่า $a = 5.789(7) \text{ \AA}$ และ $c = 11.645(6) \text{ \AA}$ และ $c/a = 2.01$ ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 แสดงดังรูปที่ 4.1



ก

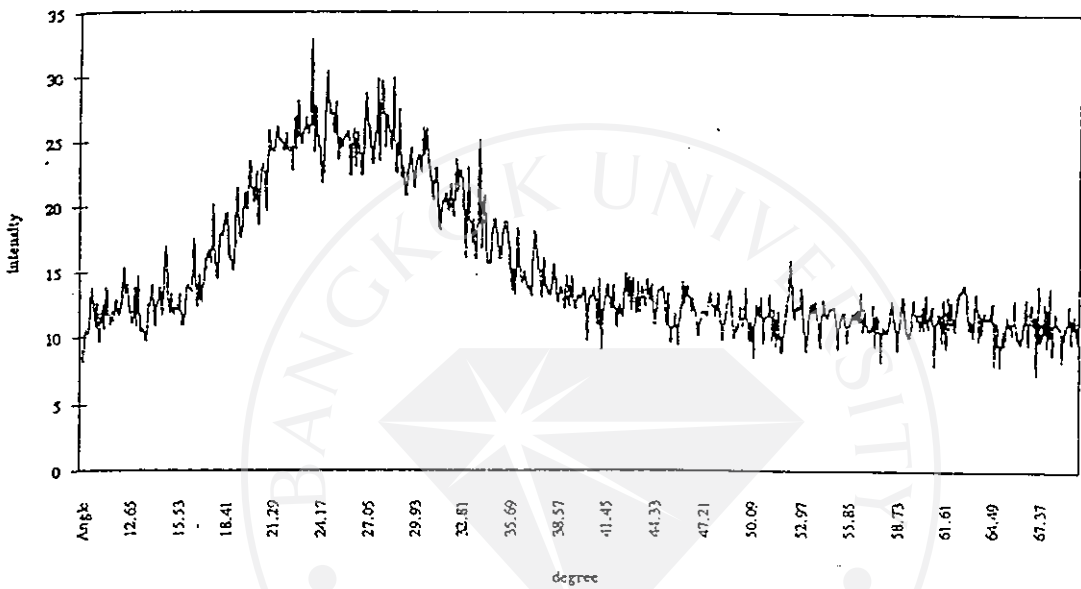


ข

รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง (ก) ชนิด $p\text{-CuInSe}_2$ (ข) ชนิด $n\text{-CuInSe}_2$

4.1.2 สำหรับฟิล์มบางของ CuInSe_2

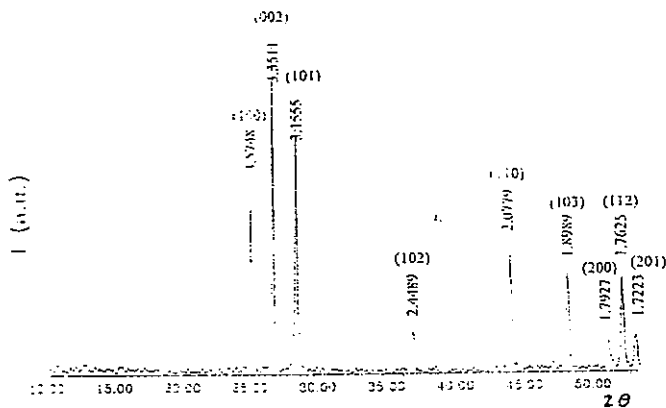
นำเอาฟิล์มบางของ CuInSe_2 ไปใส่ในช่องบรรจุสารตัวอย่างของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เพื่อศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ได้โดยตรงผลที่ได้แสดงไว้ในรูป 4.2 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นอะมีฟัสอาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิของฐานรองไม่สูงมากพอ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ประมาณ $300 - 350^\circ\text{C}$ แต่อุปกรณ์ของเราให้ความร้อนที่ฐานรองเพียง 150°C



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของสารตั้งต้น CuInSe_2

4.1.3 สำหรับผลึกเดี่ยวของ CdS

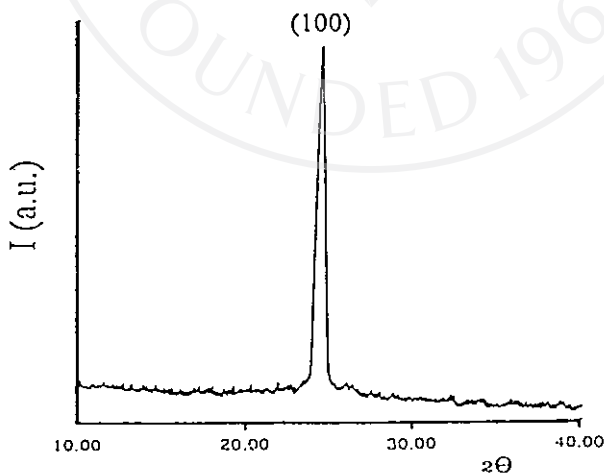
นำเอาผลึกเดี่ยวชิ้นเล็ก ๆ ที่แตกออกจากผลึกก้อนใหญ่นำมาบดให้ละเอียดเป็นผงผสมผลึกผงของ Si เข้าไปเล็กน้อยเพื่อใช้เป็นตัวมาตรฐาน สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนแสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับการหาค่าคงที่โครงผลึกก็เป็นเช่นเดียวกับที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งสรุปได้ว่า CdS ที่ปลูกได้มีโครงสร้างเป็นแบบเวอร์ทไซด์ มีค่าคงที่โครงผลึก a และ c เท่ากับ $4.16254, \text{\AA}$ และ $6.684(5) \text{\AA}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึก CdS ที่เตรียมได้จากสถานะไอระเหย

4.1.4 สำหรับฟิล์มบางของ CdS

ทุก ๆ ฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ จะแสดงพีคของการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์เพียง 1 พีค ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของผู้อื่นที่ได้รายงานไว้ [16] ซึ่งระบุว่าเป็นผลมาจากระนาบ (100) ของโครงผลึกแบบเวอร์ทไซต์ อาจกล่าวได้ว่าลักษณะการเกิดผลึกหลายรูป (polycrystalline) ของฟิล์มบางจะอยู่ในทิศ [100] รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้

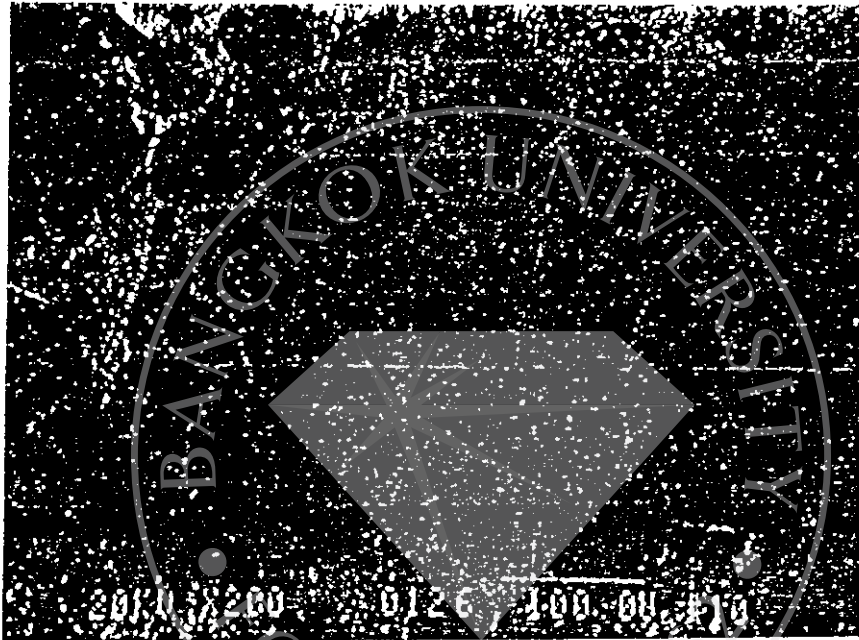


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของ CdS ที่เตรียมได้จากการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

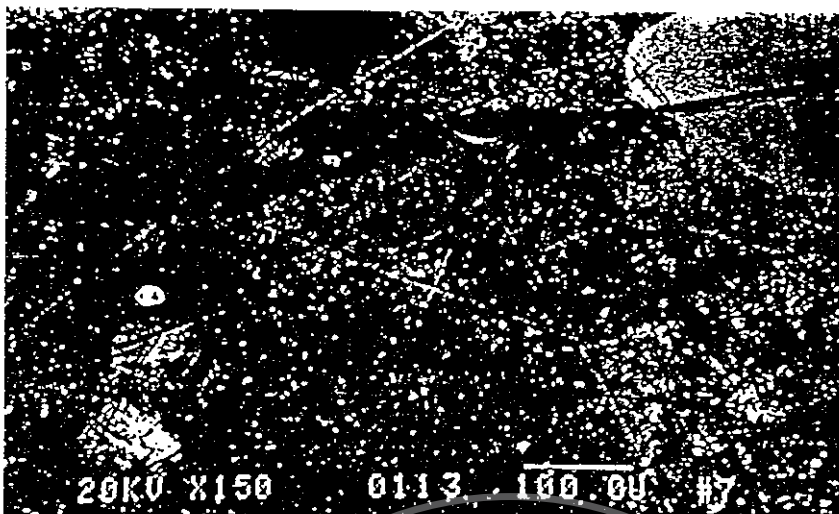
4.2 การตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

4.2.1 ผิวหน้าผลึกของ CuInSe_2

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL โมเดล JSM - 5410 LV เพื่อใช้ในการศึกษาผิวหน้าของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ รูปที่ 4.5 แสดงเกรนของผลึกของ p-CuInSe_2 ที่มีอะตอมของ Cu เกินกว่าปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric) ไป 0.3% ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงริ้วรอยของผิวหน้าผลึกที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษแต่ไม่ได้กัดด้วยสารละลายเคมี



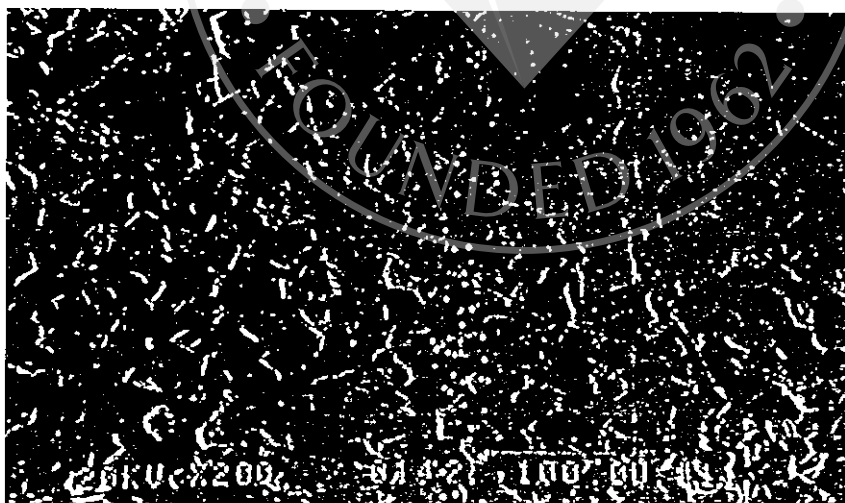
รูปที่ 4.5 . แสดงภาพถ่ายของผิวหน้าผลึก p-CuInSe_2 (0.3% Cu)



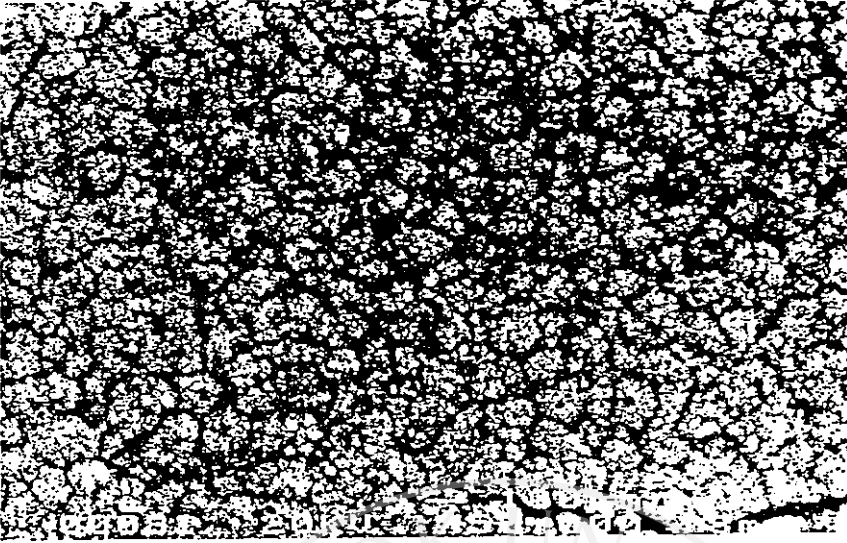
รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายของผิวหน้าผลึก CuInSe_2

4.2.2 ผิวหน้าผลึกของ CdS

รูปที่ 4.7 แสดงผิวหน้าผลึกของ CdS ที่เตรียมได้จากสภาวะไอ เลือกบริเวณที่มีรอยแยกต่อกันจะเห็นเกรนต่าง ๆ ได้ชัดเจน สำหรับรูปที่ 4.8 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบางของ CdS ซึ่งขนาดของเกรนจะสม่ำเสมอแต่มีขนาดเล็กมากกว่า ๆ $0.1 \mu\text{m}$ เท่านั้น



รูปที่ 4.7 แสดงผลึกของ CdS ที่เตรียมได้จากสภาวะไอ

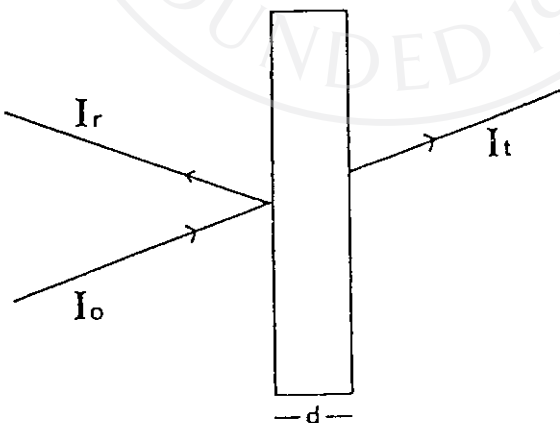


รูปที่ 4.8 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS

4.3 การวัดการส่งผ่านแสง (Optical Transmission Measurements)

4.3.1 สำหรับผลึก CuInSe_2

ชั้นของสารตัวอย่างที่จะใช้ทำการทดลองจะต้องขัดให้บางที่สุดเท่าที่ทำได้ประมาณ $7.2 \mu\text{m}$ อุปกรณ์ที่ใช้คือ เครื่องเปอร์กิน-เอลเมอร์ สเปกโตรมิเตอร์โมเดล 112 ใช้หลอดทั้งสแตนเป็นแหล่งกำเนิดซึ่งจะให้แสงความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ย่านอินฟราเรดจนถึงย่านที่มองเห็นได้ แผนภาพของการวัดการส่งผ่านแสงจะแสดงดังรูปที่ 4.9

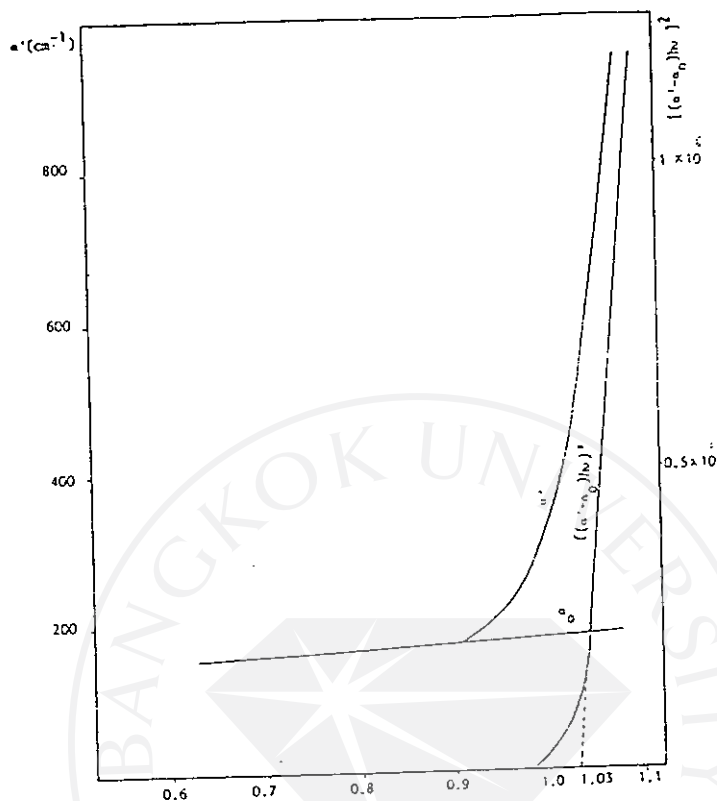


รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพการวัดการส่งผ่านแสง

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงตกกระทบ I_0 ความเข้มแสงที่ทะลุผ่าน I_1 และความหนาของชั้นสารตั้งสมการ

$$\alpha' = \frac{1}{d} \ln(I_0/I_1)$$

โดยที่ α' คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ d คือ ความหนาของชั้นสาร ในทางปฏิบัติจะพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลังเกิดขึ้นเสมอ [13] เนื่องจากความบกพร่องของผลึก แต่อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพื้นหลังนี้มีค่าเกือบคงที่ในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพื้นหลังนี้จึงเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและจะต้องนำเอาไปหักออกจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่วัดได้ จึงจะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $(\alpha' - \alpha_0)$ ซึ่งเป็นปริมาณที่สัมพันธ์กับขนาดของช่องว่างแถบ พลังงานสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลังนี้สามารถหาได้โดยการลากเส้นตรงต่อจากส่วนที่มีค่าเกือบคงที่ในบริเวณที่มีพลังงานต่ำดังกราฟรูปที่ 4.10 จากกราฟรูปนี้สอดคล้องดีกับความสัมพันธ์ $[(\alpha' - \alpha_0)h\nu]^2 = A(h\nu - E_g)$ เมื่อ $h\nu$ คือ พลังงานของแสงที่ความถี่ค่าต่าง ๆ A คือ ค่าคงที่ และ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน นั่นคือสรุปได้ว่า ผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง และมีขนาดเท่ากับ 1.03 eV ซึ่งสอดคล้องดีกับค่าที่ได้มีผู้รายงานไว้ [17]



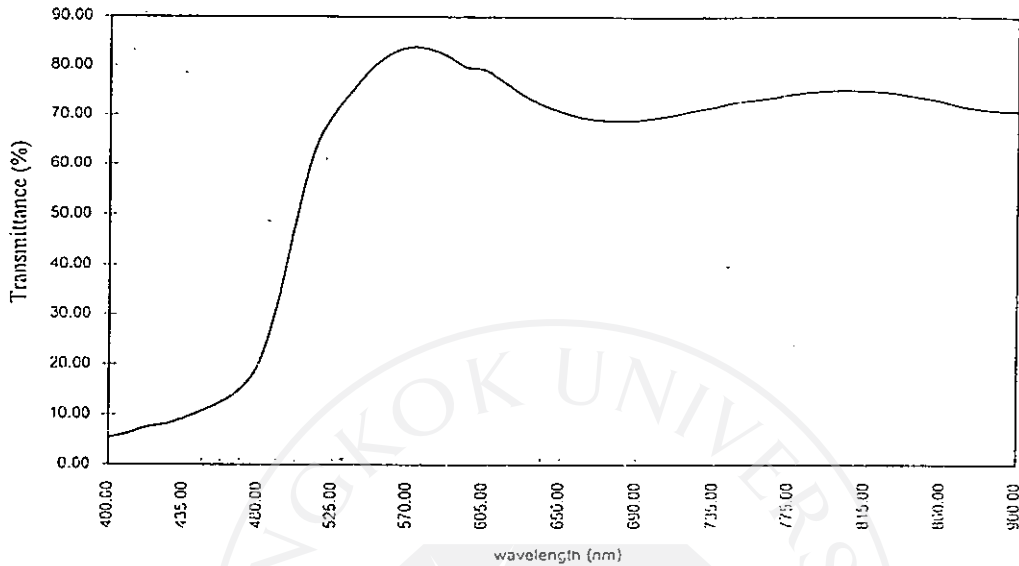
รูปที่ 4.10 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของ CuInSe_2

4.3.2 สำหรับฟิล์มบางของ CdS

เนื่องจากฟิล์มบางของผลึกหลายรูปของ CdS มีคุณภาพดี กล่าวคือ ผิวเรียบสม่ำเสมอ เป็นมันวาว ไม่มีรอยแตกสามารถที่จะนำไปวัดการส่งผ่านทางแสงได้อย่างสะดวก อุปกรณ์ที่ใช้ คือ เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ UV/VIS Hitachi 220 A เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 470 nm ขึ้นไปจะแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจาก CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่ค่อนข้างใหญ่ ดังนั้น เราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากความสัมพันธ์ [9]

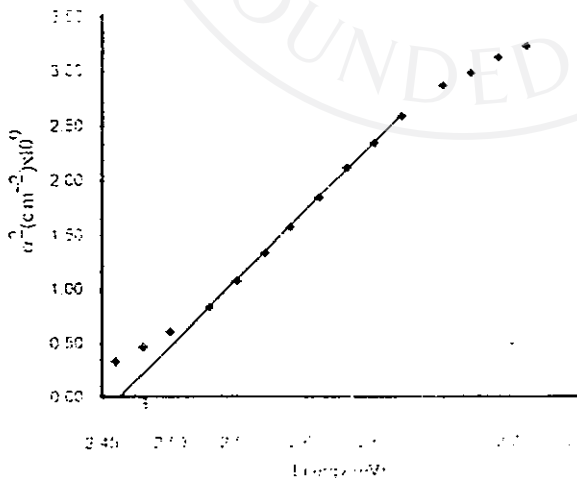
$$T = 100 \exp(-\alpha d)$$

เมื่อ T คือ เปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านแสง ความหนาของฟิล์มบางหาได้โดยใช้หลักการแทรกสอดทางแสง [18] ซึ่งพบว่าฟิล์มบางของ Cds มีความหนาประมาณ $0.5 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของ Cds

ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ จะหาค่า E_g ได้โดยการลากเส้นต่อจากบริเวณที่เป็นเชิงเส้นไปตัดแกนอน (ดังรูปที่ 4.12) ซึ่งจะได้ E_g เท่ากับ 2.46 eV ซึ่งสอดคล้องกับผลที่มีผู้รายงานไว้ [16]



รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่า E_g ของฟิล์มบางของ Cds

4.4 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

4.4.1 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยใช้หัวร้อน (hot probe method)

วิธีหัวร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบว่าผลึกสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือ นำชิ้นผลึกที่ต้องการตรวจสอบวางบนแผ่นอลูมิเนียมนำขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับแผ่นอลูมิเนียมจี้หัวแรงปิดกริ่งบนชิ้นผลึก เอาขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับหัวแรง ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก สารกึ่งตัวนำนั้นจะเป็นชนิดอื่นอันเนื่องมาจากอิเล็คตรอน ซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่ไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่ไปยังขั้วลบซึ่งเย็นกว่า

จากการทดลองเตรียมผลึกหลาย ๆ ครั้ง พบว่าผลึกเดี่ยวของ CuInSe_2 มีทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นขึ้นอยู่กับการเตรียม แต่ในแง่ผลึกของการเตรียมแต่ละครั้งจะเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งหมายถึงเนื้อแท่งผลึกมีความเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอดี การควบคุมให้เกิดเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีอาจทำได้โดยการเพิ่มสารตั้งต้นให้เกินกว่าปริมาณสัมพัทธ์เล็กน้อย กล่าวคือ ถ้าให้ Cu หรือ In เกินเล็กน้อยราว 0.6% จะได้สารเป็นชนิดเอ็น แต่ถ้าให้ Se เกินเล็กน้อยจะเป็นชนิดพี [17] นอกจากนี้เงื่อนไขการแอนนีลิ่งทำให้สารกึ่งตัวนำเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้าได้ด้วย [19] สำหรับฟิล์มบางของ CuInSe_2 แต่ละอันจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นอย่างใดอย่างหนึ่ง สารกึ่งตัวนำ CdS จะเป็นชนิดเอ็นเสมอ ทั้งที่เป็นผลึกและเป็นฟิล์มบางและยากที่จะทำให้เป็นชนิดพีได้ [8]

4.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

เลือกใช้วิธีของแวนเดอเพาว์ (Van de Pauw) ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องใช้โลหะอินเดียมทำขั้วไฟฟ้าโดยการติดอินเดียมชิ้นเล็ก ๆ แล้วกดที่ขอบของผลึกที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าแล้ว นำไปแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงทำการต่อขั้วเข้ากับเส้นลวดทองแดงเส้นเล็ก ๆ โดยใช้กาวเงิน (Silver Paint) เป็นตัวประสานให้ติดแน่นยิ่งขึ้น แล้วจึงทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าต่อไป

ส่วนขั้วไฟฟ้าของฟิล์มบางได้มาจากการระเหยอินเดียมขึ้นไป เคลือบที่ขอบทั้งสองด้านซึ่งอยู่ตรงกันข้ามของทั้งฟิล์มบาง CuInSe_2 และ CdS เมื่อรู้ความหนาของฟิล์มบาง (ซึ่งหาได้จากหลักการแทรกสอดของแสง) และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ในที่นี้ไม่พิจารณาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มของแสงที่ฉายลงบนสารตัวอย่าง ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าไฟฟ้าในที่นี้คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีดซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

จากการตรวจสอบสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงจากหลอดไอโอดีนด้วยความเข้ม 5 W/m^2 พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดจาก $10^6 \Omega\cdot\text{cm}$ เป็น $10^2 \Omega\cdot\text{cm}$ เมื่อหยุดการฉายแสง สภาพต้านทานไฟฟ้าจะกลับสู่ค่าเดิมภายในเวลาไม่กี่วินาที

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่เตรียมได้

สารประกอบ	เงื่อนไข	ชนิดการนำไฟฟ้า	สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\cdot\text{cm}$)
CuInSe ₂	ผลึก (เติม 0.6% Cu)	n	0.1
	ผลึก (เติม 0.6% In)	n	3.1
	ผลึก (เติม 0.6% Se)	p	1.7
	ฟิล์มบาง	p	1.4 K
	ฟิล์มบาง	n	0.9 K
CdS	ผลึก	n	$\approx 3 \text{ M}$
	ฟิล์มบาง	n	$\approx 70 \text{ M}$

บทที่ 5 รอยต่อไอห์มิก

การต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญมาก เพราะต้องทำให้ความต้านทานที่รอยต่อมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของชิ้นสารกึ่งตัวนำและต้องไม่มีลักษณะการเรียงกระแสแบบรอยต่อชอตต์กีปรากฏอยู่ด้วย เพื่อที่จะช่วยลดความต้านอนุกรม (series resistance) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ลักษณะที่บ่งบอกสมบัติของรอยต่อแบบไอห์มิก คือ ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ R_C ซึ่งนิยามดังนี้ คือ

$$R_C = \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad (5.1)$$

สำหรับรอยต่อไอห์มิกของสารกึ่งตัวนำที่มีปริมาณสารเจือต่ำ (lightly doped) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อจะมาจากกระบวนการเทอร์มิโอนิก อิมิสชัน ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ [11]

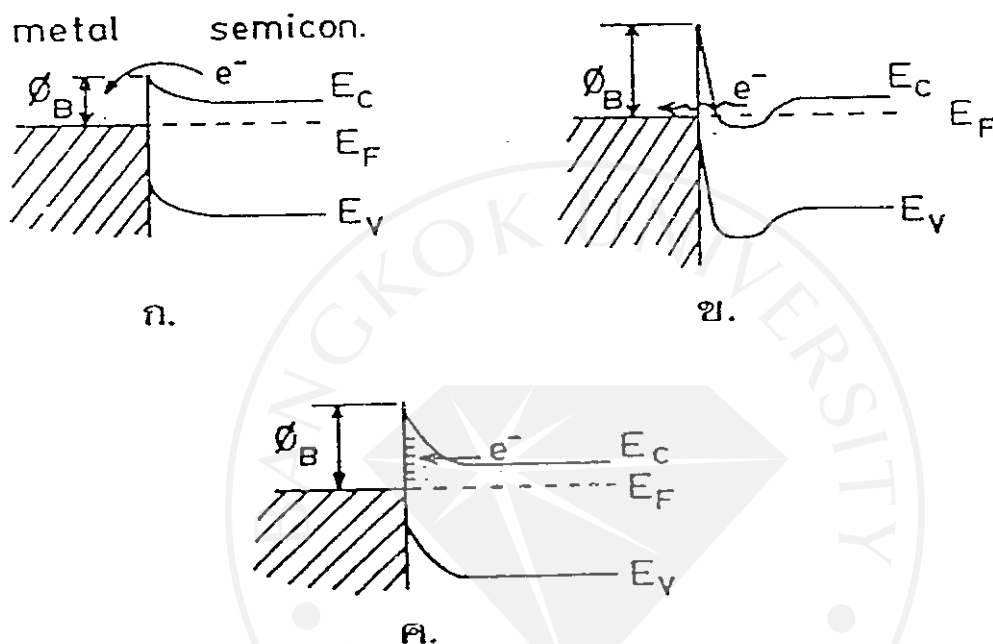
$$R_C = \frac{k}{qA * T} \exp \left(\phi_B / kt \right) \quad (5.2)$$

ฉะนั้นถ้าค่าแกงค์กั (ϕ_B) มีค่าน้อยจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อยด้วย สำหรับรอยต่อไอห์มิกของสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือในปริมาณสูง (heavily doped) ค่าแกงค์กัที่รอยต่อจะบางลง ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน รอยต่อส่วนใหญ่จะมาจากกระบวนการลอดผ่านค่าแกงค์กั ความต้านทานจำเพาะที่รอยต่อจะเป็นไปตามสมการ [11]

$$R_C = \exp \left[\frac{2(\epsilon_s m_e^*)^{\frac{1}{2}}}{\hbar} (\phi_B / \sqrt{N_d}) \right] \quad (5.2)$$

เมื่อ ϵ_s, m_e^* และ N_d คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า, มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน และความเข้มข้นของสารเจือตามลำดับ นั่นคือความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะมีค่าน้อยลงในขณะที่ความหนาแน่นของสารเจือเพิ่มขึ้น

ทั้งกรรมวิธีการเติมสารเจือที่บริเวณรอยต่อให้มีค่าสูง และการเลือกใช้โลหะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าแรงคักย์ที่มีค่าต่ำอันจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้ได้รอยต่อโอห์มมิกที่ดี นอกจากนี้แล้วรอยต่อแบบโอห์มมิกยังทำได้จากการเตรียมรอยต่อที่มีความบกพร่องของผลึกเป็นจำนวนมากพอเหมาะ ซึ่งตำแหน่งความบกพร่องเหล่านี้ จะเป็นศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล ซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อได้ [13] •



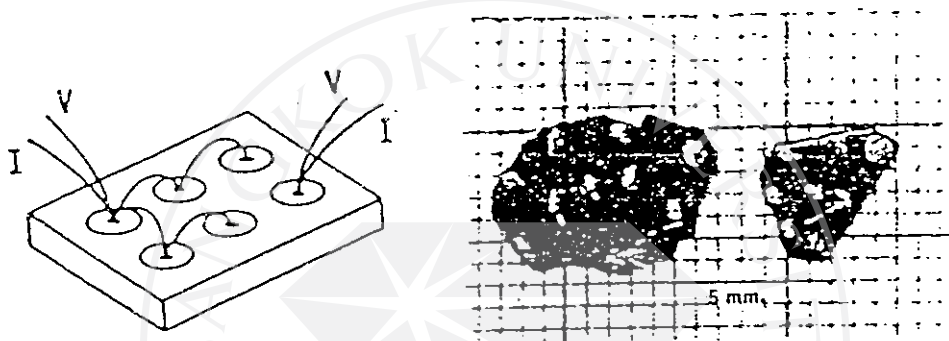
รูปที่ 5.1 แสดงกลไกการเกิดรอยต่อโอห์มมิก

- (ก) รอยต่อที่ค่าแรงคักย์มีค่าต่ำ
- (ข) รอยต่อที่เกิดจากการเจือสารอย่างหนักด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า
- (ค) รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล

สำหรับในทางปฏิบัติการรู้แต่เพียงค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อเท่านั้น ไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน แต่ถ้ารู้ทั้งความสูงของค่าแรงคักย์และความหนาแน่นของกระแสมากที่สุด โดยที่รอยต่อยังไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแสในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจะเหมาะสมต่อการบอกลักษณะของรอยต่อโอห์มมิกมากกว่าการใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ

การเลือกใช้โลหะให้เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำของเราเพื่อให้ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าต่ำนั้นหาไม่ง่ายนัก หรือการที่จะทำให้ได้ตำแหน่งข้อบกพร่องอันเหมาะสมที่รอยต่อนั้นเป็นการยากที่จะควบคุมได้ ทั้งยังไม่ทราบกลไกที่แท้จริง ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการเจือสารอย่างหนักด้วยโลหะผสมของอินเดียม เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ยึดติดกับอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ได้ดี ไม่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายในสภาวะแวดล้อมการใช้งาน และเชื่อมสายเข้ากับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย โดยใช้กาวเงินช่วยในการประสาน เป็นต้น

สำหรับการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์จะใช้ในลักษณะของรอยต่อเล็กกับรอยต่อใหญ่ของสิ่งประดิษฐ์ ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งได้มีการอธิบายไว้แล้วอย่างละเอียด [20, 21] จึงจะไม่นำมากล่าวอีก



รูปที่ 5.2 แสดงการเชื่อมต่อจุดของโลหะผสมอินเดียมบนชั้นสารตัวอย่าง

5.1 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโอห์มมิก

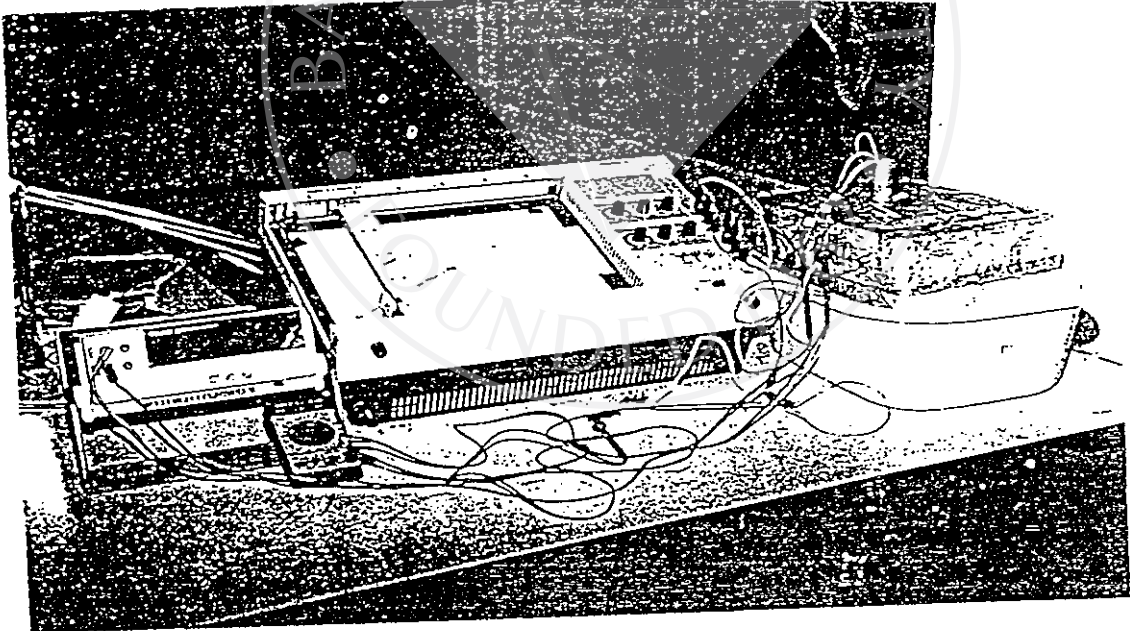
5.1.1 รอยต่อโอห์มมิกของ CuInSe_2

นำเอาชิ้นโลหะของ In, In - Pb และ In - Sn - Cd มากดลงบนชั้นผลึกของ CuInSe_2 ที่ทำความสะอาดผิวหน้าแล้วให้ได้หลาย ๆ ชิ้น จากนั้นจึงนำไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ไหลถ่ายเทตลอดเวลา เตาแอนนัลประกอบไปด้วยตัวเตา ซึ่งสามารถเลื่อนไปบนรางคู่ขนานและมีท่อแก้วควอทซ์ยาวประมาณ 50 cm สอดผ่านเข้าไปในเตา ปลายทั้งสองข้างของท่อแก้วควอทซ์ถูกยึดให้ติดกับแท่นยึดเพื่อให้ท่อแก้วควอทซ์อยู่นิ่ง และเชื่อมต่อเข้ากับระบบก๊าซเพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ไหลผ่านเข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ได้ทางปลายด้านหนึ่ง และออกทางปลายอีกด้านหนึ่ง แอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 20 นาที

โลหะผสมของอินเดียมจะมีลักษณะรูปครึ่งทรงกลมเกาะติดแน่นดีกับชั้นผลึกของ CuInSe_2 แต่ชั้นสารที่ผ่านการแอนนیلแล้วจะมีผิวด้านไม่สะท้อนแสง อาจเนื่องมาจากว่ามีส่วนประกอบบางอย่างหลุดออกมาจากผิวของสารกึ่งตัวนำ เช่น Se_2 หรือ In_2Se เป็นต้น [22]

5.1.2 การเตรียมแผ่นรองชั้นสาร

ก่อนที่จะนำเอาชิ้นส่วนตัวอย่างไปเชื่อมต่อระหว่างจุดเข้าด้วยกัน จะต้องเตรียมแผ่นรองชั้นสารทำจากทองแดง ทาด้วยกรีสแล้วปิดทับด้วยไมกาแผ่นบาง ๆ นำชั้นสารวางบนแผ่นไมกาเพื่อเชื่อมต่อระหว่างจุดด้วยลวดทองแดงเส้นเล็ก ๆ และใช้กาวเงินเป็นตัวช่วยประสานให้ลวดติดแน่นดีกับโลหะอินเดียมต่อจากนั้นจึงนำเอาแผ่นรองชั้นสาร ซึ่งทำจากทองแดงที่โยงด้วยลวดสี่เส้น (ดังรูปที่ 5.3) ไปจุ่มในไนโตรเจนเหลว ความร้อนจะถ่ายเทออกจากชั้นสารผ่านกรีสสู่แท่งทองแดงเข้าสู่ไนโตรเจนเหลวด้วยกระบวนการนำความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวเท่ากับ 77 K ดังนั้นชั้นสารจะเย็นลงตามไปด้วย ในการทดลองจะปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าทางรอยต่อพื้นที่ใหญ่ผ่านชั้นสารตัวอย่าง และออกทางรอยต่อพื้นที่เล็ก ซึ่งเราจะเรียกวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้างี้ว่า ไบอัสตรง แต่ถ้าให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศตรงข้ามจะเรียกว่า ไบอัสกลับทาง อุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ของตัวอย่างจะแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ของสิ่งประดิษฐ์

5.1.3 รายละเอียดในการทดลองและผลการทดลอง

ทำการทดลองวัดค่ากระแสกับความต่างศักย์ของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิก โดยการไบอัสตรงและปรับค่าความต้านทาน R เพื่อให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นสลับสวิตช์ เพื่อกลับขั้วไฟฟ้า (ไบอัสกลับทาง) เพื่อหาว่าที่กระแสค่าใดจะได้ความต่างศักย์ เนื่องจากการไบอัสตรงและไบอัสกลับทางเริ่มมีค่าไม่เท่ากัน เขียนกราฟระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของการไบอัสทั้งสองในช่วงกระแสตั้งแต่ค่าเป็นศูนย์จนกระทั่งถึงค่าที่ทำให้ความต่างศักย์ทั้งสองไม่เท่ากัน ค่ากระแสที่ทำให้ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงและไบอัสกลับทางเริ่มมีค่าไม่เท่ากันนี้จะเท่ากับกระแสชาร์ตสันที่รอยต่อพื้นที่เล็ก ดังนั้นถ้ากระแสค่าสูงกว่านี้เมื่อไบอัสตรง รอยต่อของพื้นที่เล็กจะเริ่มขัดขวางการไหลของกระแส แต่ในขณะที่เดียวกันถ้าสลับสวิตช์เพื่อไบอัสกลับทาง รอยต่อของพื้นที่ใหญ่จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแส การขัดขวางการไหลของกระแสที่รอยต่อพื้นที่เล็กเปรียบเสมือนเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมความต้านทานของรอยต่อซึ่งเป็นผลให้ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงไม่เท่ากับขณะไบอัสกลับทางถ้าให้กระแสมีค่าสูงกว่ากระแสชาร์ตสันของรอยต่อพื้นที่เล็ก ความต่างศักย์นี้จะยังมีค่าต่างกันมากขึ้น

เมื่ออุณหภูมิของชิ้นสารเพิ่มขึ้นเนื่องจากไนโตรเจนเหลวระเหยไปเรื่อย ๆ เราสามารถวัดกระแสและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จนถึงอุณหภูมิห้องได้และพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่ากระแสที่จุดแยกของความต่างศักย์ระหว่างการไบอัสตรงกับการไบอัสกลับทางจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ

ที่อุณหภูมิห้องรอยต่อของ In กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิด n และ p จะแสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแสเมื่อกระแสมีค่าสูงกว่า 0.2 มิลลิแอมป์ (ความหนาแน่นของกระแส 0.4 mA/cm^2) โดยประมาณ และไม่สามารถที่จะวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ได้ เนื่องจากกระแสชาร์ตสันมีค่าต่ำมาก รอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิด n และ p จะพบการแยกของความต่างศักย์ที่ค่ากระแสสูงที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวซึ่งค่ากระแสที่วัดได้ประมาณ 33.75 มิลลิแอมป์ (ความหนาแน่นของกระแส 0.14 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งจะถือว่าเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี ส่วนรอยต่อระหว่าง In-Pb กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิด n และ p นั้นจะแสดงผลการขัดขวางการไหลของกระแสที่ค่ากระแสสูงกว่า 10.75 มิลลิแอมป์ (ความหนาแน่นของกระแส 43 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 และสามารถที่จะหาค่ากระแสชาร์ตที่อุณหภูมิต่ำได้ซึ่งจะเห็นผลอย่างชัดเจน

ต่อมานำค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขณะไบอัสตรงและไบอัสกลับทางของค่ากระแสที่คงที่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิ จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 จะเห็นว่ารอยต่อโอห์มมิกระหว่าง In-Pb กับสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในช่วงที่กระแสอุณหภูมิมีค่าอยู่ในบริเวณเส้นประเท่านั้น ถ้านำเอาค่าอุณหภูมิ (T_s) ที่จุดที่ความต่างศักย์เริ่มแยกออกจากกันของกระแสค่าคงที่ค่าต่าง ๆ ไปเขียนกราฟระหว่าง I/T_s^2 กับ $1/T_s$ ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 ความชันของเส้นตรง คือ ค่า ϕ_B/k จากความชันของเส้นตรงนี้สามารถคำนวณความสูงของกำแพงศักย์ได้ โดยความสูงของกำแพงศักย์ของ

รอยต่อระหว่างโลหะผสม In-Pb กับสารกึ่งตัวนำ p-CuInSe₂ ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.19 eV และโลหะ In-Pb กับ n-CuInSe₂ มีค่า 0.16 eV

จากกราฟถ้าพิจารณาที่ค่าความชัน โดยที่ความชันนี้ คือ ส่วนกลับของความต้านทาน (1/R) ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ นั้นเอง จะเห็นว่าความชันนี้จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำที่แปรตามอุณหภูมิจะเป็นไปตามสมการ

$$\sigma = pe\mu_h \quad (5.4)$$

ถ้าสภาพเคลื่อนที่ได้ของโฮลในสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้นสมการ (5.4) จะกลายเป็น

$$\ln\left(\frac{1}{R}\right) = \ln C - \frac{E_a}{2k} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (5.5)$$

โดยที่ C คือ ค่าคงที่

ดังนั้นถ้านำเอาส่วนกลับความต้านทาน (1/R) ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ ไปเขียนกราฟกับ (1/T) ความชันของเส้นเส้นตรง คือ $-E_a/2k$ จากค่าความชันนี้เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนได้

รอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น โดยใช้โลหะ In จะใช้ได้ในช่วงความหนาแน่นของกระแสและช่วงอุณหภูมิ ไม่สูงมากนัก สำหรับรอยต่อระหว่างโลหะผสม In-Pb กับ CuInSe₂ เป็นรอยต่อที่ไม่ดีนักเนื่องจาก In-Pb มักจะหลุดจากผิว CuInSe₂ ได้ง่ายอีกทั้งโลหะผสมชนิดนี้แข็งและยากต่อการเชื่อมต่อกับส่วนรอยต่อของโลหะผสม In-Sn-Cd เหมาะสมที่จะใช้ทำเป็นรอยต่อ เนื่องจากยึดติดแน่นกับสารกึ่งตัวนำได้ดี จากการวัดส่วนกลับของความต้านทานของ CuInSe₂ พบว่าพลังงานไอออไนซ์ของ p-CuInSe₂ (สารตัวอย่างที่ 1) มีค่าเท่ากับ 100 meV และ p-CuInSe₂ (สารตัวอย่างที่ 2) มีค่าเท่ากับ 150 meV (ดังรูปที่ 5.10) ส่วน n-CuInSe₂ มีค่าเท่ากับ 100 และ 15 meV (ดังรูปที่ 5.11)

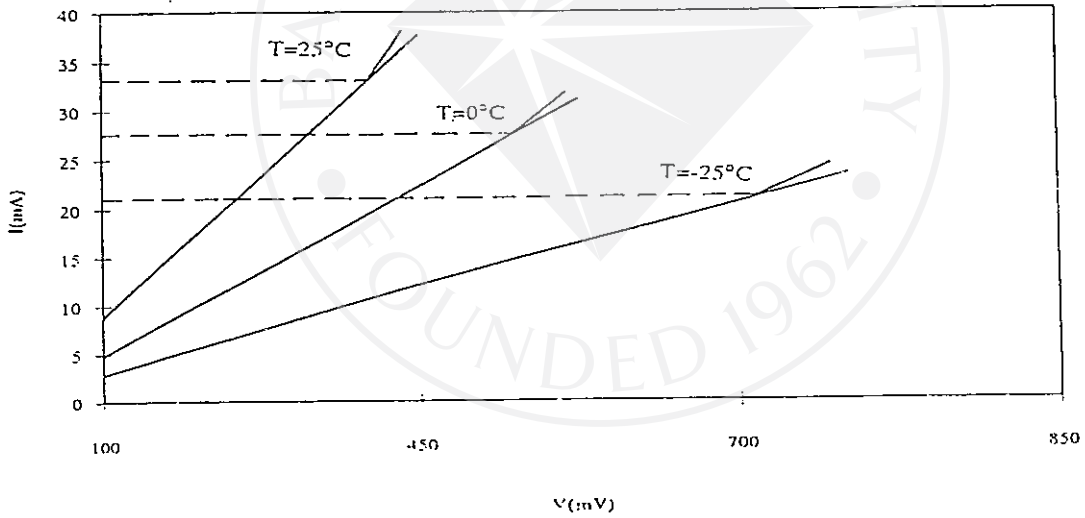
ส่วนรอยต่อระหว่าง In กับผลึกของ CdS ความหนาแน่นของกระแสชาร์ตสันเท่ากับ 3 mA/cm² ที่อุณหภูมิ 100 °C รูปที่ 5.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิของรอยต่อ In กับ n-CdS และความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 0.29 eV (ดังรูปที่ 5.13) รูปที่ 5.14 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 68 meV สำหรับรอยต่อระหว่าง In กับฟิล์มบางของ n-CdS จะให้ความหนาแน่นของกระแสชาร์ตสันต่ำมากราว ๆ 12 µA/cm² ผลการศึกษารอยต่อระหว่างโลหะผสมของอินเดียมกับสารตัวอย่างที่เตรียมได้จะสรุปไว้ในตารางที่ 5.1 ส่วนตารางที่ 5.2 แสดงค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเอง เนื่องจากความบกพร่องของผลึกของสารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการศึกษารอยต่อโหนดผสมของอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำที่ใช้ศึกษา

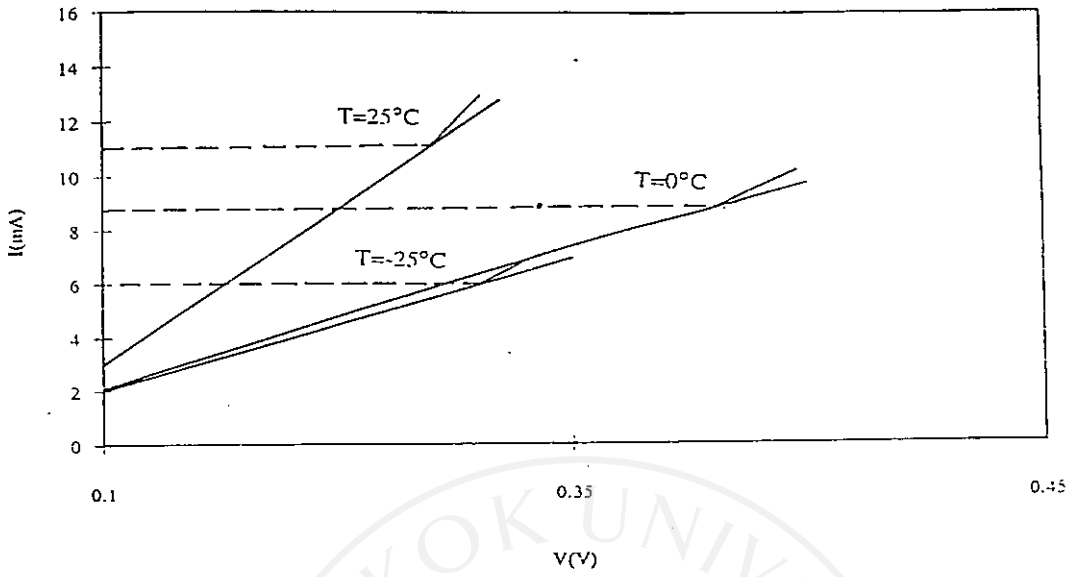
สารกึ่งตัวนำ	ชนิดการนำไฟฟ้า	โลหะที่ใช้ทำารอยต่อ	สมบัติของรอยต่อโหนดผสมที่วัดได้		ลักษณะของโลหะที่ใช้ทำารอยต่อ (หลังจากแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C)
			ความหนาแน่นของกระแสและอุณหภูมิที่ใช้ได้	ความสูงของกำแพงศักย์	
CuInSe ₂	P	In	มีค่าต่ำกว่า 0.4 mA/cm ² ที่อุณหภูมิห้อง	-	เป็นก้อนผิวมันวาวมีรูปพุนเล็กน้อย ยึดติดแน่นกับสารกึ่งตัวนำ
	P	In-Pb	มีค่าต่ำกว่า 135 mA/cm ² ที่อุณหภูมิห้อง	0.19 eV	ค่อนข้างแข็งและหลุดออกจากผิวของสารกึ่งตัวนำได้ง่าย
	n	In-Sn-Cd	มีค่าสูงกว่า 120 mA/cm ² ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว และสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	มีค่าน้อยมาก	ผิวมันเป็นวาว ยึดติดกับผิวของสารกึ่งตัวนำได้ดี และเชื่อมต่อกันได้ง่าย
CdS (ผลึก)	n	In	มีค่าต่ำกว่า 3 mA/cm ² ที่อุณหภูมิ 100 °C	0.29 eV	เป็นก้อนผิวมันวาวยึดติดแน่นกับสารกึ่งตัวนำ
CdS (ฟิล์มบาง)	n	In	มีค่าต่ำกว่า 12 μA/cm ² ที่อุณหภูมิ 100 °C	-	เป็นก้อนผิวมันวาวยึดติดแน่นกับสารกึ่งตัวนำ

ตารางที่ 2 แสดงค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเอง เนื่องจากความบกพร่องของผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการศึกษา

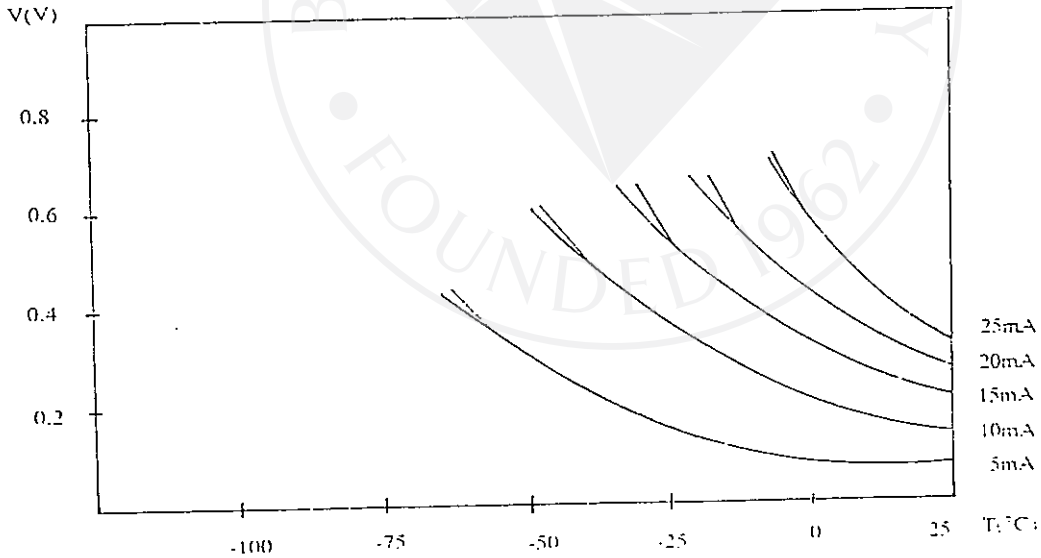
สารกึ่งตัวนำ	ชนิดการนำไฟฟ้า	พลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปน (meV)		
		ชนิดผู้รับ (E_a)		ชนิดผู้ใช้
		E_{a1}	E_{a2}	E_{d1}
CuInSe ₂	p	150	100	-
	n	-	100	15
CdS	n	-	-	68



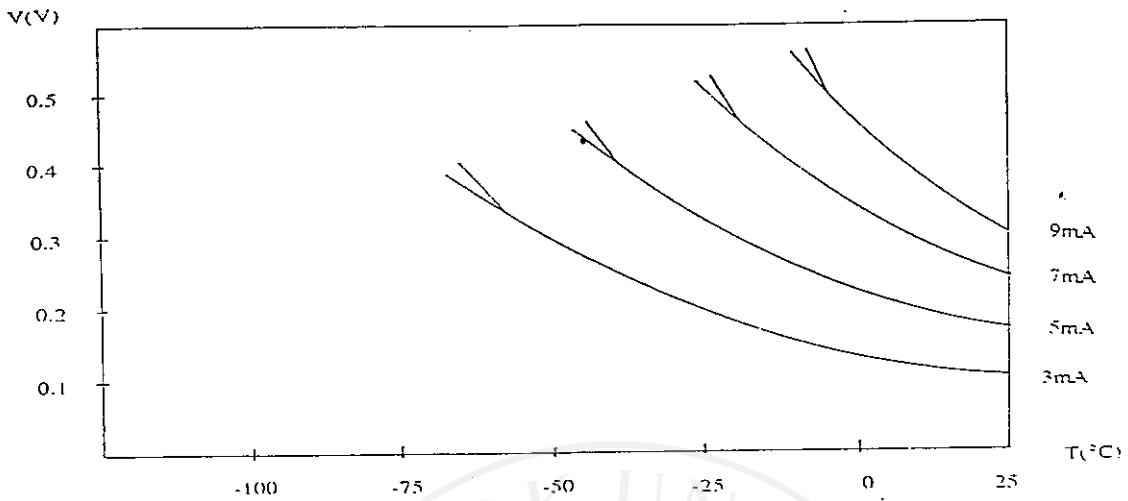
รูปที่ 5.4 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน (I_{01}) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe₂ กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



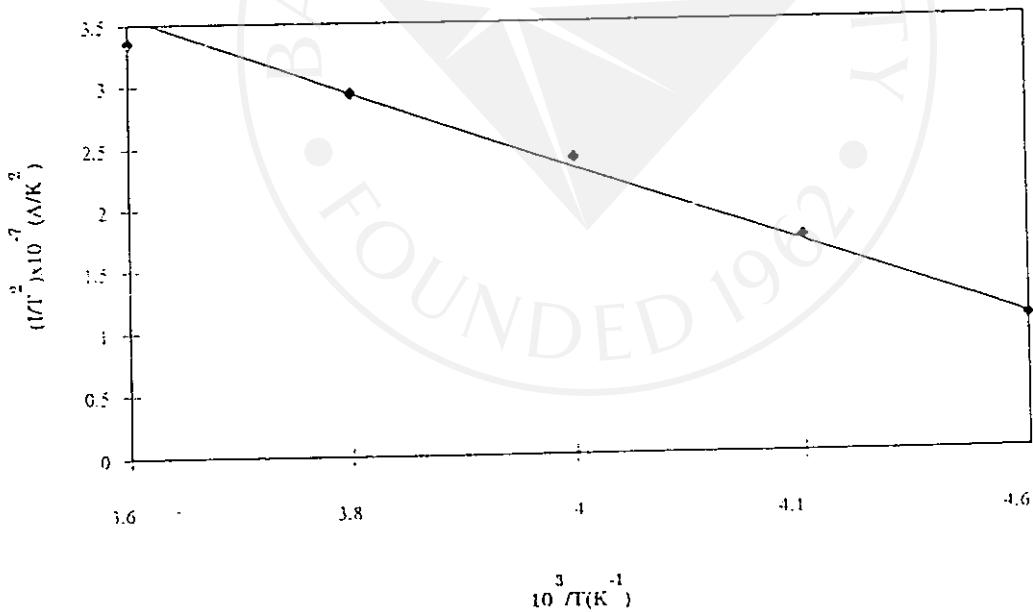
รูปที่ 5.5 แสดงค่ากระแสชาร์ตสั้น (I_{01}) จากกราฟความสัมพันธ์ค่ากระแส-ความต่างศักย์ของ รอยต่อ n- CuInSe_2 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



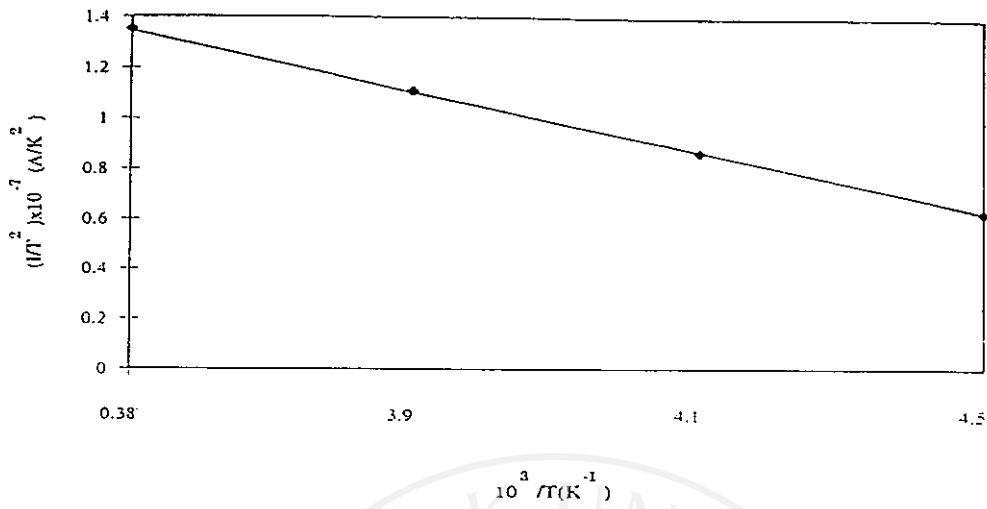
รูปที่ 5.6 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง p- CuInSe_2 กับ In-Pb ที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ



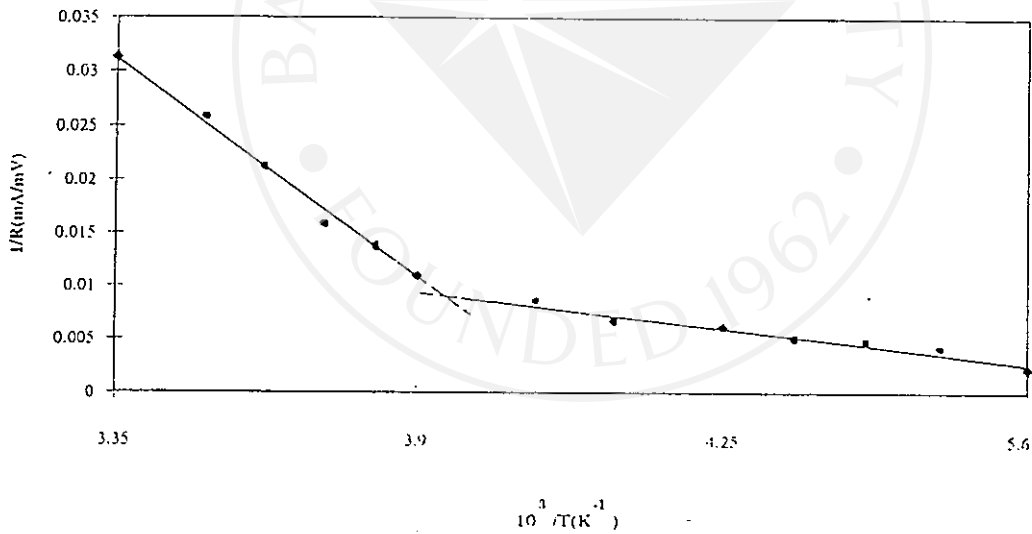
รูปที่ 5.7 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe₂ กับ In-Pb ที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ



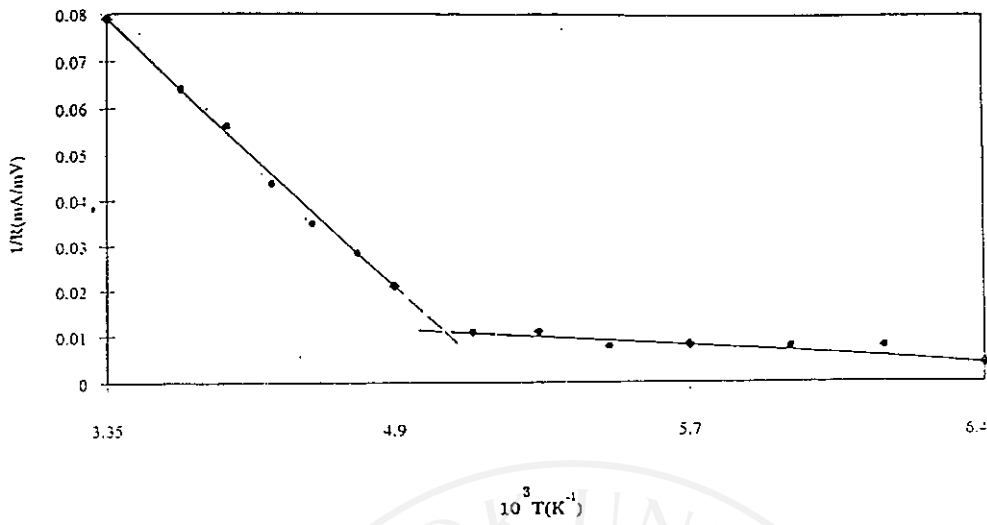
รูปที่ 5.8 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อ p-CuInSe₂ กับ In-Pb



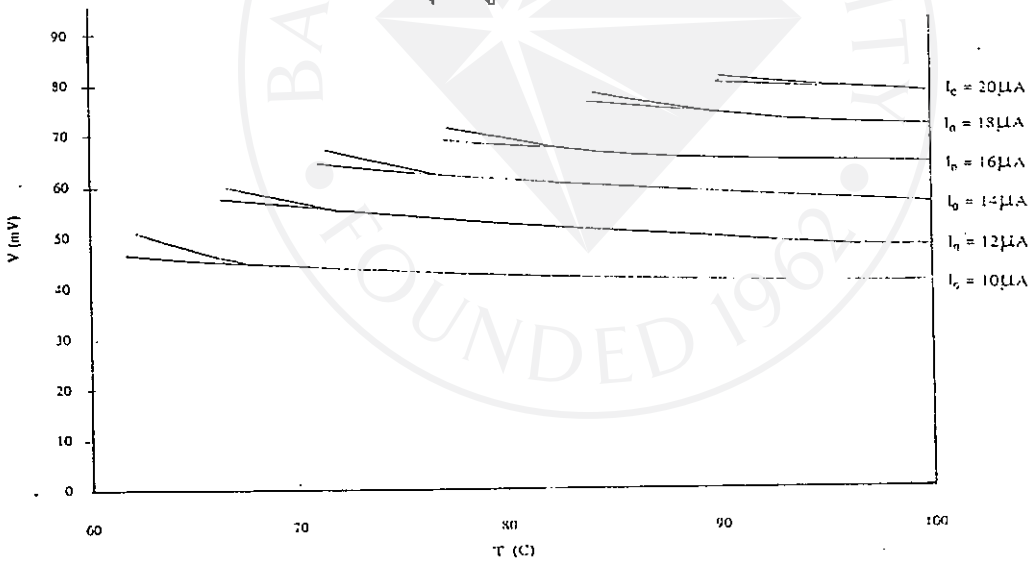
รูปที่ 5.9 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อ n-CuInSe₂ กับ In-Pb



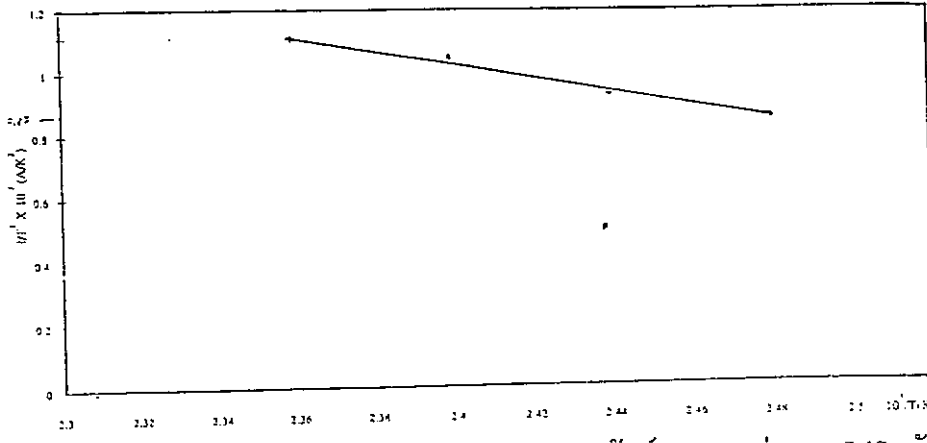
รูปที่ 5.10 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ p-CuInSe₂ จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



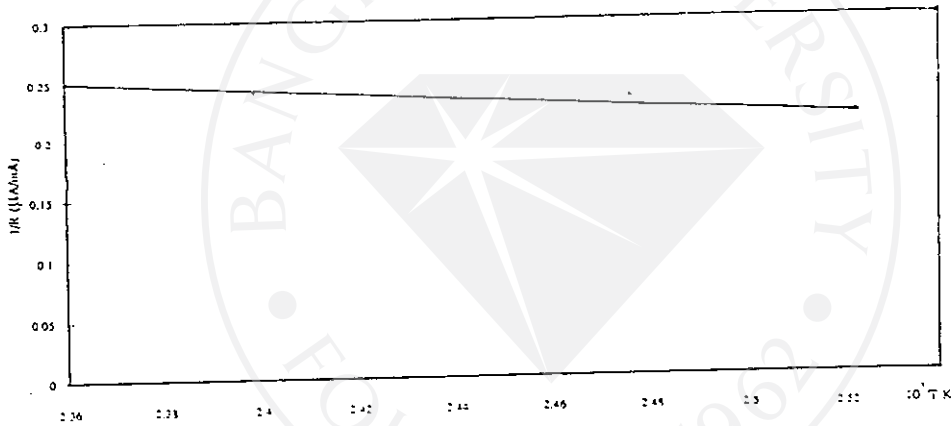
รูปที่ 5.11 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ $n\text{-CuInSe}_2$ จากกราฟส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



รูปที่ 5.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง $n\text{-CdS}$ กับ In

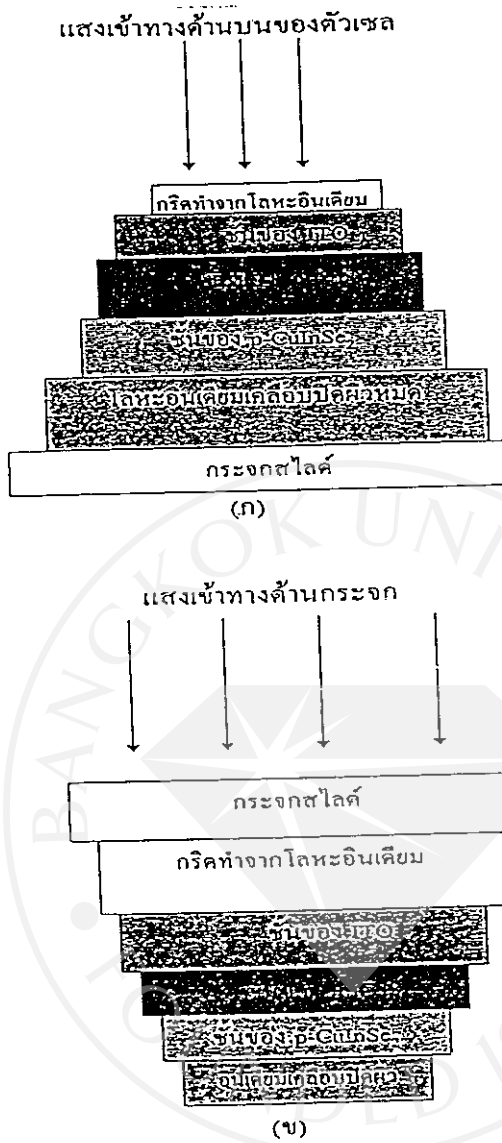


รูปที่ 5.13 แสดงการหาค่าความสูงของก้ำแพงศักย์ของรอยต่อ n-CdS กับ In



รูปที่ 5.14 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ n-CdS

ในการวิจัยนี้เราได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกัน 2 แบบ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแง่ทิศทางของแสงที่ตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ คือ แบบที่แสงเข้าทางด้านกระจก และแบบที่แสงเข้าทางด้านบนของตัวเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 5.15 แต่จากการทดสอบการทำงาน of เซลล์แสงอาทิตย์นี้ พบว่าแรงดันวงจเปิด (open circuit voltage) และกระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าไม่คงที่ จึงทำให้ไม่สามารถหาคุณลักษณะเฉพาะของกราฟ I-V ได้ [23] ซึ่งอาจมีสาเหตุจากคุณภาพของฟิล์มบาง CuInSe₂ เองมากกว่าที่จะเกิดจากปัญหารอยต่อโอห์มมิก รวมทั้งปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดที่ผิวรอยต่อ (interface) ก็ยากที่จะหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากมีการระเหยฟิล์มบางซ้อนกันหลายชั้น



รูปที่ 5.15 แสดงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ คือ (ก) แสดงเข้าทางด้าน
 ขั้วไฟฟ้า (ข) แสดงเข้าทางด้านกระจกสไลด์

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้เริ่มต้นจากการสร้างเตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูงถึง 1200 °C จำนวน 1เตา และสร้างเตาเพื่อใช้แอนนีสสารที่อุณหภูมิ 600 °C จำนวน 2 เตา สร้างเครื่องขัดผิวหน้าผลึกโดยใช้กับผงขัดอลูมินา และสามารถควบคุมอัตราการหมุนของแป้นขัดได้ด้วยวงจรไฟฟ้า รวมทั้งยังได้สร้างระบบท่อนำก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอนบริสุทธิ์เพื่อใช้ปลูกผลึก CdS จากสภาวะไอ และสร้างระบบแอนนีสสารภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนด้วย จากนั้นจึงทำการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ จากสภาวะหลอมเหลวโดยใช้เทคนิคโตเรกชันนัล ฟริชซิง ภายในเตาซึ่งเอียงทำมุม 5 องศา กับแนวราบ สำหรับผลึกเดี่ยวของ CdS ปลูกได้จากสภาวะไอซึ่งได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่และความสมบูรณ์สูง

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ และ CdS เตรียมได้โดยการระเหยสารตั้งต้นด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำจากแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว จากนั้นจึงทำการตรวจสอบคุณภาพของผลึกเดี่ยวและฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยเริ่มจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ การศึกษาผิวหน้าสารตัวอย่างทั้งที่เป็นผลึกและฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การวัดการส่งผ่านแสงของสารตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า และศึกษารอยต่อโอห์มมิกของสารตัวอย่างกับโลหะผสมของอินเดียม

การปลูกผลึกของ CuInSe₂ จากสภาวะหลอมเหลวมักจะมีรอยแยกเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากการขยายตัวของสารขณะเริ่มเกิดเป็นผลึกให้ช่วงการลดอุณหภูมิของเตา [24] การลดปัญหาการแยกที่เกิดขึ้นทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ของผิวหน้าเปิดให้มากขึ้น เพื่อให้เนื้อสารมีการขยายตัวได้มากขึ้นโดยไม่ถูกผนังหลอดแก้วควอทซ์ขัดขวาง จึงเลือกใช้วิธีให้เตาเอียง 5 องศา กับแนวราบ แม้ว่าแท่งสารที่เตรียมได้จะมีขนาดบาง แต่สามารถเลือกตัดที่บริเวณขนานกับผิวหน้าเปิดก็จะได้แผ่นผลึกที่มีขนาดใหญ่เหมาะสมที่จะนำไปศึกษาต่อไปได้

ส่วนการปลูกผลึกของ CdS จะต้องทำในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน และทำภาชนะการปลูกผลึกให้มีปลายแหลมรูปกรวย เพื่อให้ไอระเหยของสารตั้งต้นไปควบแน่นกลายเป็นผลึกเดี่ยวที่บริเวณปลายแหลมรูปกรวยนี้ อัตราการเลื่อนเตา (หรืออัตราการลดอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึก) จะเป็นตัวกำหนดที่สำคัญต่ออัตราการเกิดผลึก การปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลึกเดี่ยวที่มีขนาดเล็ก ฉะนั้นจึงควรปลูกผลึก CdS ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1150 °C แต่การเกิดผลึกเดี่ยวขนาดเล็กจำนวนมาก และหลายบริเวณอาจจะเกิดมาจากอัตราการเลื่อนเตาเร็วเกินไปหรือภาชนะหลอดแก้วควอทซ์สองอันที่ซ้อนกันอยู่ไม่สนิทที่มีช่องว่างมากเกินไปทำให้ไอระเหยพุ่งกระจายหลุดออกไปควบแน่นกลายเป็นหลอดด้านตรงข้ามกับปลายแหลม [25]

ฟิล์มบางของ CdS ซึ่งเตรียมได้ โดยการระเหยสารตั้งต้นด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำจากแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลักษณะของหน้ากาก ขนาดพื้นที่ประมาณ 2 cm^2 มีสีเหลืองผิวเรียบสม่ำเสมอเป็นมันวาว ติดแน่นกับกระจกสไลด์ดีมาก จากหลักการแทรกสอดของแสงโดยใช้หลอดโซเดียมเป็นแหล่งกำเนิดแสงพบว่าความหนาของฟิล์มมีค่าประมาณ $0.5 \mu\text{m}$ และจากการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าเกรนของผลึกหลายรูปมีขนาด $0.1 \mu\text{m}$ แต่สำหรับฟิล์มบางของ CuInSe_2 มีสีเทาดำ บางครั้งก็เป็นสีน้ำตาล ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากมีอะตอมออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาขณะเกิดฟิล์มบาง ยังผลให้ฟิล์มบางนี้กลายเป็นอะมอร์ฟัสไม่ใช่เป็นผลึกหลายรูป อีกทั้งอาจเกิดมาจากอุณหภูมิของฐานรองที่กระจกสไลด์ไม่สูงถึงระดับ $300 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามที่มีผู้ได้รายงานไว้ [10] เนื่องมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่มีอยู่

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมจากเทคนิคโดเรกซ์ชั้นนัล ฟริชซิง เป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์ มีความเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อนสาร สำหรับผลึกเดี่ยวของ CdS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวอร์ทไฮท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่คงตัวดีกว่าโครงสร้างแบบซิงเบลนด์ ส่วนฟิล์มบางของ CdS เป็นผลึกหลายรูปมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวอร์ทไฮท์เหมือนกัน และไม่ปรากฏว่ามีโครงสร้างผลึกทั้งสองแบบผสมกันอยู่ (mixed phase)

จากการวัดการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ซึ่งสรุปได้ว่าแถบพลังงานของทั้ง CuInSe_2 และ CdS มีลักษณะเป็นแบบตรง โดยมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.03 eV และ 2.46 eV ตามลำดับ สารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น แต่สำหรับ CdS เป็นแต่ชนิดเอ็นอย่างเดียว สืบเนื่องมาจากข้อบกพร่องของผลึกที่เกิดขึ้นเอง ซึ่งมีทั้งที่ประพุดิตัวเป็นระดับผู้ให้ และระดับผู้รับขึ้นในช่องว่างแถบพลังงาน แต่จากการชดเชยกันแล้วพาหะข้างมากยังมาจากระดับผู้ให้เสมอ ซึ่งต่างจากของผลึก CuInSe_2 ซึ่งมีระดับผู้ให้และระดับผู้รับเป็นจำนวนมาก ซึ่งผลของการชดเชยกันแล้วอาจจะทำให้พาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน หรือโฮลล์ยากที่จะคาดเดาได้ แต่ยั้งดีที่เราสามารถเปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้าของ CuInSe_2 จากชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่งได้ด้วยหลายวิธี เช่น การแอนนัลในบรรยากาศก๊าซเฉื่อยหรือในบรรยากาศของไอซีลีเนียมก็ได้ เป็นต้น

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีซีวร้อน พบว่าตลอดทั้งก้อนผลึกทั้ง CuInSe_2 และ CdS มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดโดชนิดหนึ่ง ซึ่งหมายถึงเนื้อสารมีความสมบูรณ์สม่ำเสมอดี สภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึก CuInSe_2 มีค่าค่อนข้างต่ำ แต่สำหรับของฟิล์มบางจะมีค่าสูงมากระดับ $10^3 \Omega\cdot\text{cm}$ แต่สำหรับผลึก CdS มีสภาพต้านทานไฟฟ้าระดับ $10^6 \Omega\cdot\text{cm}$ ขณะไม่มีการฉายแสง และสำหรับฟิล์มบางจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าในผลึกมากกว่า 20 เท่า จากการตรวจสอบสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงจากหลอดไอโอดีนด้วยความเข้ม 5 w/m^2 พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงจาก $10^6 \Omega\cdot\text{cm}$ เป็น $10^2 \Omega\cdot\text{cm}$ เมื่อหยุดการฉายแสงสภาพต้านทานไฟฟ้าจะกลับสู่ค่าเดิมภายในเวลาไม่กี่วินาที นั่นคือ CdS ตอบสนองต่อแสงได้ดี โดยเฉพาะในช่วงตามองเห็นได้ จึงเหมาะที่จะนำไปทำเป็นตัวตรวจจับแสง

จากการศึกษารอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่าง CuInSe_2 และ CdS กับโลหะผสมอินเดียม สามารถหาความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อ ช่วงของความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ และช่วงของอุณหภูมิที่รอยต่อนี้ยังเป็นแบบโอห์มมิก ปริมาณดังกล่าวนี้น่าจะเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความเป็นรอยต่อโอห์มมิกได้ดีกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ

ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะ In-Pb กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ชนิดพี และชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 0.19 และ 0.16 eV ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ต้องไม่เกิน 135 mA/cm^2 [26] ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้นี้จะมีค่าต่ำลงที่อุณหภูมิต่ำลงสำหรับรอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd (44 : 42 : 14) กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดีมากเนื่องจากสามารถใช้ได้กับช่วงความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงถึง 120 mA/cm^2 และอุณหภูมิตั้งแต่ไนโตรเจนเหลวขึ้นไป ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยมาก ส่วนรอยต่อที่ใช้ In บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ต้องไม่เกิน 0.4 mA/cm^2

ความสูงของกำแพงศักย์ระหว่าง In กับผลึก CdS ชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 0.29 eV ความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ต้องไม่เกิน 3 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 100°C แต่สำหรับกรณีที่เป็นฟิล์มบาง ความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ต้องไม่เกิน $12 \mu\text{A/cm}^2$ อย่างไรก็ตามภายใต้การฉายแสงความหนาแน่นของกระแส (ริชาร์ดสัน) เหล่านี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยปกติขั้วของไฟฟ้าของ CdS ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด $\text{CdS} / \text{CuInSe}_2$ จะอยู่ด้านบน ซึ่งรับแสงอยู่แล้ว ถ้าแม้จะใช้แค่ In บริสุทธิ์ก็สามารถเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ใช้ได้ดีเพียงพอ

จากการศึกษาพลังงานไอออไนซ์ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 โดยการวัดส่วนกลับของความต้านทานของสารตัวอย่าง ทำให้ทราบว่า CuInSe_2 มีระดับพลังงานสิ่งเจือปนที่เกิดจากความบกพร่องของผลึก มีทั้งระดับผู้ให้ (E_g) และระดับผู้รับ (E_u) โดยพลังงานไอออไนซ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 100 meV สำหรับ p- CuInSe_2 (ตัวอย่างที่ 1) และเท่ากับ 150 meV สำหรับ p- CuInSe_2 (ตัวอย่างที่ 2) ส่วน n- CuInSe_2 (ตัวอย่างที่ 1) จะมีพลังงานไอออไนซ์เท่ากับ 100 และ 15 meV ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้สอดคล้องดีกับผลการทดลองของผู้อื่นที่ได้รายงานไว้ [17, 27] สำหรับกรณีผลึก CdS พลังงานไอออไนซ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 68 meV

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การเตรียมสารตัวอย่างทั้งในรูปผลึกและฟิล์มบางเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการวิจัยทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จากการศึกษาวิธีเตรียมสารตัวอย่างของ CuInSe_2 และ CdS ทำให้ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมเพื่อให้ได้ชั้นผลึกที่มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ตลอดจนเรียนรู้การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ ทั้งคุณสมบัติเชิงไฟฟ้า และ

คุณสมบัติเชิงแสง เป็นต้น การทำรอยต่อโอห์มมิกนับว่าเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่สุดก่อนที่จะนำเอาสารตัวอย่างไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์โดยต้องพยายามลดความต้านทานอนุกรมแฝงที่เกิดจากรอยต่อให้เหลือน้อยที่สุด การวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdS / CuInSe₂ ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ จากสถานะหลอมเหลว โดยวิธีไดเรกชันนัล ฟรีซซิงเท่าที่ผ่านมายังไม่สามารถควบคุมกลไกการเกิดผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มากได้ เราอาจจะเลือกใช้เตาที่สามารถปรับค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและอัตราการเกิดผลึกให้เหมาะสมได้ เช่น ใช้เตาสองโซน และควบคุมการลดอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ อาจเพิ่มขนาดของผลึก CdS ให้ใหญ่กว่านี้ได้ โดยการปรับปรุงภาชนะของการปลูกผลึกให้มีความเหมาะสมกับเกรเดียนต์อุณหภูมิของเตา ในการเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe₂ ให้มีคุณภาพดีจะต้องปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิฐานรองให้สูงถึง 500 °C เพื่อแอนนัลฟิล์มบางทุก ๆ ขณะที่ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น จากนั้นควรนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศของไอซีลีเนียม เพื่อลดข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากการขาดหายไปของอะตอมซีลีเนียมในเนื้อฟิล์มบาง ส่วนขนาดของเกรนของผลึกหลายรูปของฟิล์มบาง CdS สามารถขยายให้ใหญ่ขึ้นได้ถ้าแอนนัลภายในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิในช่วง 200 - 350 °C ประมาณ 30 นาที [7] ขนาดของเกรนใหญ่ทำให้สภาพคล่องตัว (mobility) เพิ่มขึ้นด้วย ควรจะมีการศึกษารอยต่อโอห์มมิกโดยใช้ทองคำ (Au) เป็นขั้วโลหะเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ เนื่องจากนิยมใช้ทองคำเป็นขั้วไฟฟ้าในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อยู่แล้ว การศึกษาระดับพลังงานของสิ่งเจือปนที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์ดูจะให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดและถูกต้องดีกว่าการหาพลังงานไอออไนซ์โดยใช้การวัดส่วนกลับของความต้านทานที่แปรตามอุณหภูมิ

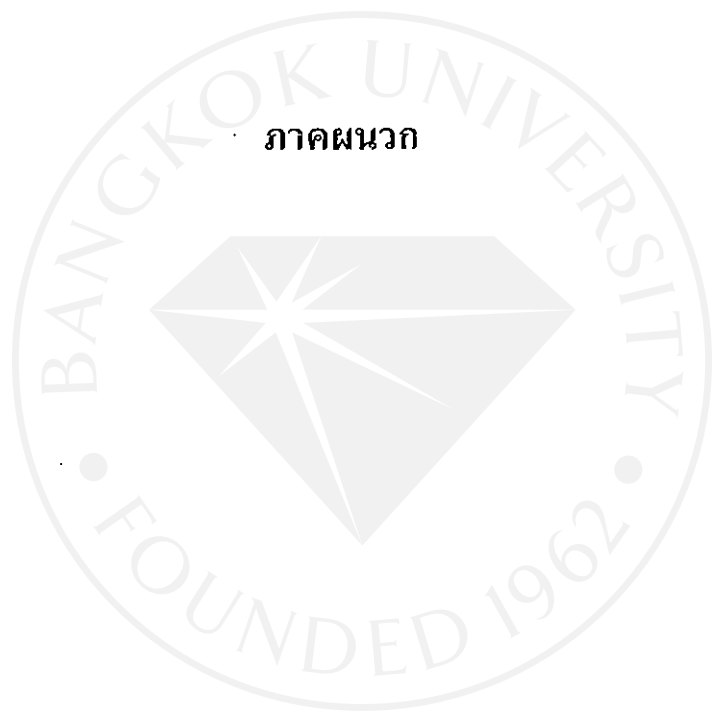
เอกสารอ้างอิง

1. Van Overstraeten, R.J. and Mertens, R.P. Physics, Technology and Use of Photovoltaics, Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston, 1986, pp. 1-38.
2. Shay, J.L. and Wernick, J.H. Ternary Chalcopyrite Semiconductor, Pergamon Press, 1975, pp. 1-78.
3. Isomura, S., Kaneko, H., Tomioka, S., Nakatani, I. and Masumoto, I. "Preparation of CuInSe_2 Thin Films by Thermal Evaporation Technique". 19 (suppl. 19-3), 1980, pp: 23-26.
4. Isomura, S. , Nagamatsu, A. , Shinohara, K., and Aono, T. "Preparation and Some Semiconducting Properties of CuInSe_2 Thin Films" Solar Cells, 16, 1986, pp. 143-153.
5. Thornton, J. A. and Lommasson, T.C. "Magnetron Reactive Sputtering of Copper-Indium-Selenide" Solar Cells, 16, 1986, pp. 165-180.
6. Riedl, W., Rimmash, J., Probst, V., Karg, F and Guckenberger, R. "Surface Microstructure of CIS Thin Films Produced by Rapid Thermal Processing" Solar Energy Materials and Solar Cells, 35, 1994, pp. 129-139.
7. Mathur, P.C., Shishodia, P.K. and Chanban, G. "Growth and Characterization of CdS Thin Films Suitable for Device Applications" Proceedings of the 6th International Workshop 2-6 December 1991, New Delhi, India, pp. 407-413.

8. Yodo, T. and Tanaka, S. "Growth of CdS by Atmospheric Pressure Metalorganic Vapor Phase Epitaxy at Low Temperature" *J. Appl. Phys*, 72(7) , 1992, pp. 2781-2790.
9. Nakanishi, T. and Ito, K. "Properties of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 35, 1994, pp. 171-178.
10. Menna, P., Parretta, A., Pellegrino, M., Quercia, L. and Addonizia, M.L. "Study of the Selenium Incorporation in Sputtered Cu, In Alloys" *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 35, 1994, pp. 165-170.
11. Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices* 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, 1981, pp. 790-838, 304-306.
12. Piper, W.W. and Polich, S.J. "Vapor Phase Growth of Single Crystals of II-VI Compounds" *J. Appl. Phys*, 32(7), 1961, pp. 1278-1279.
13. จูตินัย แก้วแดง "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์" วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530 หน้า 83-84, 104-107, 71-72
14. งามนิตย์ วงษ์เจริญ, วิชิต ศรีตระกูล, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ "การวิจัยและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 " รายงานวิจัยและพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี พ.ศ. 2533-2534 หน้า 82-83.

15. Gaewdang, Ng. , Wongcharoen, T. , Poo-Rakkiat, c. and Gaewdang, T.
 "Crystalline Bulk Growth of Cadmium Sulphide" 23rd Conference on Science and Technology of Thailand, 20-22 October 1997 (Abstract), pp. 172-173.
16. Dona, J. M. and Herrero, J. "Chemical Bath Deposition of CdS Thin Films : Electrochemical In Situ Kinetics Studies "J. Electrochem. Soc. , 139(10), 1992, pp. 2810-2814.
17. Rinco, C., Bellabarla, C., Gonzalez, J. and Sanchezperez, G. "Optical Properties and Characterization of CuInSe₂" Solar Cells, 16, 1986, pp. 335-349.
18. Gaewdang, T. "Preparation and Some Properties of Cadmium Sulfide Semiconductor" Journal of Science Ladkrabang (in press)
19. Shih, I., Champness. C.H. and Vahid Shahidi, A. "Growth by Directional Freezing of CuInSe₂ and Diffused Homojunctions in Bulk Material" Solar Cells, 16, 1986, pp. 27-41.
20. Tantraporn, W. "Determination of Low Barrier Heights in Metal-Semiconductor Contact "J. Appl. Phys. Vol. 41(11), 1970, pp. 4669-4671.
21. งามนิตย์ วงษ์เจริญ "รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ" วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม 2537
22. Von Bardeleben, H. J. "Selenium Self-Diffusion Study in I-III-VI₂ Semiconductor : CuInSe₂" , J. Appl. Phys. 16(2), 1984, pp. 321-326.

23. ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี “การเตรียมและการศึกษาฟิล์มบางของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์”
โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ปีการศึกษา 2539
24. Tomlinson, R.D., “Fabrication of CuInSe_2 Single Crystals Using Melt-Growth
Techniques” *Solar Cells*, 16, 1986, pp. 17-26.
25. อธิติมา นาครินทร์ “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์” โครงการ
พิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สจล. ปีการศึกษา 2539
26. อัมพวรรณ บัวบุตร “รอยต่อโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์” โครงการ
พิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สจล. ปีการศึกษา 2539
27. Wasim, S.M. , “Transport Properties of CuInSe_2 ” *Solar Cells*, 16, 1986,
pp. 286-316.



ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อผู้ขอรับทุน (ภาษาไทย) นายฐิตินัย แก้วแดง
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Thitinai Gaewdang
2. ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ระดับ 7 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 3269982-84 ต่อ 285
3. ประวัติการศึกษา
วท.บ. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วท.ม. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Ph.D (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยบอร์โด 1 ฝรั่งเศส
4. ประสบการณ์ในการวิจัย
 - 4.1 การปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ สารประกอบออกไซด์ สารประกอบฟลูออไรด์ ด้วยวิธีบริดจ์แมน และวิธีหลอมฟลักซ์ วิธี PVD เป็นต้น
 - 4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐาน เช่น คุณสมบัติเชิงไฟฟ้า คุณสมบัติเชิงแสง คุณสมบัติเรืองแสง
5. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่ในวารสารและสิ่งตีพิมพ์ต่าง ๆ
 - 5.1 Gaewdang, T. and gaewdang. Ng. "Photoluminescence of Ce^{3+} in Some Fluoroindate Compounds", Thamsat Int. J. Sc. Tech., Vol. 4(1), 1999 : 54-59.
 - 5.2 Gaewdang, T. "Preparation and Some Properties of Cadmium Sulfide semiconductor", Journal of Science Ladkrabang (in press)
 - 5.3 Gaewdang, T. and Gaewdang, Ng. "Crystallization of Indium Titanate by Flux Growth Technique", The Journal of Science Khonkaen University. Vol. 26(3), 1998 : 196-202.

- 5.4 Gaewdang, T. and Wongjareon, Ng. "The Study of Metal-CuInSe₂ Semiconductor Contacts", Journal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Vol. 5(1), 1997 : 15-24.
- 5.5 Gaewdang, T. and Wongjareon, Ng. "Luminescence Phenomena and Scintillation Properties of Indium Tungstate", Journal of Science Khonkaen University, Vol. 24(3), 1996 : 173-182.
- 5.6 Chaminade, J. P., Garcia, A. Gaewdang, T., Ponchard, M., Granec, J. and Jacquier, B., "Reversible Photoionization Process in Luminescent Ce³⁺-Doped Elpasolite-type Fluoroindates", Radiation Effects and Defects in Solids, Vol. 135, 1995 : 137-146.
- 5.7 Garcia, A., Gaewdang, T., Chaminade, J.P., Fouassier, C., Varrel, B., Jacquier, B., Messous, M., Chambon, B. and Drain, D. "Luminescence and Scintillation Properties of In₂Si₂O₇" Radiation Effects and Defects in Solids, Vol. 135, 1995 : 397-399.
- 5.8 Gaewdang, T. "Coexistence of Ce³⁺ and In⁺ Luminescent Centres in Rb₂K In F₆ : Ce³⁺ Single Crystals, Thai Journal of Physics, Vol. 1(1), 1995 : 5-12.