

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO:Al โดยวิธีอบสารละลายเคมี



ร.พ.
ช.ล.บ.ก.
๑๐๖๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62309**
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ส.ค. 2549

b..... 11620146
i.....

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fabrication of CdO:Al by Chemical Bath Deposition Method

Miss.Chinarat Onwan

Mr.Saruti Pailai



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

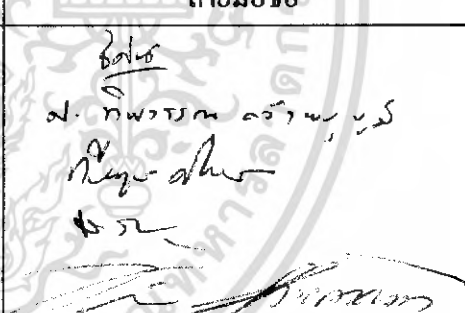
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO:Al โดยวิธีออบสารละลายเคมี
นักศึกษา นางสาวชินรัตน์ อ่อนหวาน
 นายศรุต ไพไหล
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2548
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้ฉบับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ	อาจารย์ ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	
กรรมการ	อ.กฤษฎิ์ ศรีนวลจันทร์	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ	

(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO:Al โดยวิธีอบสารละลายเคมี

นักศึกษา นางสาวชินรัตน์ อ่อนหวาน
นายศรุต ไพไหล

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม โดยวิธีอบสารละลายเคมี บนกระจกสไลด์ เตรียมที่อุณหภูมิ 55 °C ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่เจืออยู่ระหว่าง 0-10% ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแสดงให้เห็นถึงความเป็นพหุพันธ์ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงถึงผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรน ผลจากการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางพบว่าช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง 2.30-2.70 eV ขึ้นอยู่กับปริมาณของ Al จากการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์พบว่าฟิล์มบาง CdO:Al เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีสภาพนำไฟฟ้า $235.29 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ สภาพคล่องพาหะอยู่ในช่วง $153\text{-}2.79 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ และ ความหนาแน่นพาหะ $8.66 \times 10^{17}\text{-}1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Fabrication of CdO:Al by Chemical Bath Deposition Method

Name Miss Chinarat Onwan

Mr. Saruti Pailai

Department Applied Physics Faculty of Science

Program Applied Physics – Science and Industry Instrument

Academic Year 2005

Special Project Advisor Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen

Special Project co-advisor Assist.Prof.Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat

ABSTRACT

In this special project, aluminium – doped cadmium oxide (CdO:Al) thin films were deposited by chemical bath deposition technique at 55 °C for 1 h and 40 min on the glass slide substrate. Al concentration in films was varied from 0 to 10%. X-ray diffraction patterns showed that the films were polycrystalline in nature. SEM micrograph showed the presence of faceted crystallines and grain size. Optical transmittances showed 10-50% transparency with a bandgap value lying in rang 2.30-2.70 eV, depending upon the Al content in films. The optimum Al concentration of obtaining maximum conductivity was found to be 7.5 % and the corresponding electrical conductivity was found to be $235.29 (\Omega \text{ cm})^{-1}$, mobility and carrier concentration lying in the range 1.53-2.79 cm^2/Vs and $8.66 \times 10^{17} - 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, when percentage of Al varies in the range 0 to 10%. The Hall measurements confirmed that the material is of n-type.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์งามนิศย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ภู์รักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลุกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชดิธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง อิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และยูวี-วิสสิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลตและย่านคาบมองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการ

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ คุณประชาน ประจวบโชค คุณอุปลักษณ์ นาครักษ์ นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวัสดุทางแสงภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณฉัฐพร พรหมรส ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำทางด้านการศึกษาค้นคว้าด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครู-อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาวชินรัตน์ อ่อนหวาน
นายศรุต ไพล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 สมบัติพื้นฐานของแคดเมียมออกไซด์	6
2.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	7
2.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)	7
2.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)	8
2.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)	9
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึก	10
2.5 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	14
2.5.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน	14
2.5.2 โลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน	15
2.5.3 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	16
2.6 การส่งผ่านแสง	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง	19
2.7 สมบัติทางไฟฟ้า	21
2.7.1 สภาพนำไฟฟ้า	21
2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	22
2.7.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)	23
2.7.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)	24
2.7.2.3 การวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่ใช้ในการทดลอง	26
2.7.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ	29
2.7.4 ปรากฏการณ์ของฮอลล์	30
2.8 วิธีอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition :CBD)	34
บทที่3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	36
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการอบสารละลายเคมี	36
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์	37
3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	38
3.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	38
3.4 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในวิธีการอบสารละลายเคมี	40
3.5 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม (CdO:Al)	41
3.6 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	42
3.6.1 อุปกรณ์	42
3.6.2 วิธีวัดความต้านทานของฟิล์มบาง	42
3.7 วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.1 อุปกรณ์	44
3.7.2 วิธีการทดลอง	45
3.8 การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	46
3.8.1 อุปกรณ์	47
3.8.2 วิธีการทดลอง	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	52
4.1 फिल्मบาง CdOAl ที่เตรียมได้โดยวิธีอบสารละลายเคมี	52
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	52
4.3 ผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	56
4.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	57
4.5 ผลการทดลองความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdO:Al	64
4.6 ความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)	64
4.7 การวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	77
ประวัติผู้เขียน	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ , เลขออกซิเดชัน และการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน ของธาตุ Cd กับ O	6
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของ โครงผลึก และ ขนาดของเกรน ของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	54
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า TC (hkl) ของ โครงผลึกของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	55
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียง: E_g (eV)ของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	63
ตารางที่ 4.4 แสดงความต้านทานแผ่นในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงของ ฟิล์มบาง CdO:Al (%)	64
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของรูปที่ 4.18แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์ม บาง CdO:Al (%) ในกรณีไม่ฉายแสงและมี การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ชนิด ELH	65
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdO:Al (%) ที่เตรียมโดย วิธีการอบสารละลายเคมี	70

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบโซเดียมคลอไรด์	5
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของแคะเมียมออกไซด์	7
รูปที่ 2.3 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	8
รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	9
รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	9
รูปที่ 2.6 แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน	10
รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	11
รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	11
รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการหา β, ρ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์	13
รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะสารกึ่งตัวนำฉนวน	16
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0K$)	17
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอน กับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	18
รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง	19
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	20
รูปที่ 2.15 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง	23
รูปที่ 2.16 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้า โดยวิธีวัดโดยตรง	24
รูปที่ 2.17 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้า โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	25
รูปที่ 2.18 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	27
รูปที่ 2.19 แสดงรูปการวัดความต้านทานของฟิล์มบาง โดยไม่ทำการฉายแสงให้กับฟิล์ม	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.20 แสดงรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(R/R_0)$ กับ $(10^3/T)$	28
รูปที่ 2.21 แสดงรูปการวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยทำการฉายแสงให้กับฟิล์ม	28
รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{R2} กับ ξ	29
รูปที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์	31
รูปที่ 2.24 แสดงภาพจำลองเครื่องมือและอุปกรณ์ของเทคนิค วิธีอบสารละลายเคมี	35
รูปที่ 3.1 แสดงกลไกการรวมตัวทางโพลิเมอร์จากการควบคุมด้วยค่า pH	39
รูปที่ 3.2 แสดงถึงความแตกต่างของอิเล็กตรอนไมโครกราฟจากตะกอนของกลไกการรวมตัวทางโพลิเมอร์ของ Silicate จำพวกโลหะออกไซด์ จากความสัมพันธ์ของค่า pH	40
รูปที่ 3.3 แสดงหลักการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	42
รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{R2} กับ ξ	43
รูปที่ 3.5 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอุณหภูมิต่างๆ	44
รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$ กับ $\left(\frac{10^3}{T}\right)$ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น	45
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	46
รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอุณหภูมิต่างๆ	48
รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องซังคิจิตอล	48
รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์วัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	49
รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์วัดค่าของฮอลล์	49
รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องล้างตัวอย่างด้วยอุตราโซนิก	50
รูปที่ 3.13 แสดงเตาแอนนูลในอากาศ	50
รูปที่ 3.14 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีอบสารละลายเคมี	51
รูปที่ 3.15 แสดงเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	51
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง CdO:Al (%) ที่เตรียมได้โดยวิธีอบสารละลายเคมี	52
รูปที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	53
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับ CdO:Al (%)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง แสดงภาพถ่าย ผิวหน้าฟิล์มบาง CdO ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า เมื่อแอนนัลในอากาศ (in air) ที่อุณหภูมิ 350 °C โดยมีขนาดของเกรนอยู่ที่ 66 nm	56
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง แสดงภาพถ่าย ผิวหน้าฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า เมื่อแอนนัลในอากาศ (in air) ที่อุณหภูมิ 350 °C โดยมีขนาดของเกรนที่ 35 nm	56
รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdO:Al (%) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี	57
รูปที่ 4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO	58
รูปที่ 4.8 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (2.5%)	58
รูปที่ 4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (5.0%)	59
รูปที่ 4.10 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%)	59
รูปที่ 4.11 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (10.0%)	60
รูปที่ 4.12 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO	60
รูปที่ 4.13 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO:Al (2.5%)	61
รูปที่ 4.14 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO:Al (5.0%)	61
รูปที่ 4.15 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%)	62
รูปที่ 4.16 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO:Al (10.0%)	62
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	63
รูปที่ 4.18 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางฟิล์มบางCdO:Al (%) ในกรณีไม่ฉายแสง และมีการฉายแสง	65
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_w/R)$ ของฟิล์มบางฟิล์มบาง CdO:Al (0.0%)	66

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_w/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (2.5%)	66
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_w/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (5.0%)	67
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_w/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%)	67
รูปที่ 4.23 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_w/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (10.0%)	68
รูปที่ 4.24 แผนภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง CdO:Al ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ ϕ_s คือความสูงของกำแพงศักย์ และ x คือระยะทาง	69
รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับสนามแม่เหล็ก	70
รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า สภาพคล่องฮอลล์ และปริมาณพาหะข้างมากของฟิล์มบาง CdO:Al (%)	71
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระตุ้นกับสารเจือที่อุณหภูมิต่างๆกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันชีวิตประจำวันของเราต้องพึ่งพาสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ มากมาย โดยอุปกรณ์เหล่านี้มักจะข้องเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งอำนวยความสะดวกเหล่านี้ต้องอาศัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นหัวใจในการทำงานก็เพราะสารกึ่งตัวนำมีสมบัติเฉพาะตัวก็คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ แสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่าง ฉนวนและโลหะ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้สร้างสิ่งประดิษฐ์ได้มากมาย เช่น ไดโอดทรานซิสเตอร์ วงจรรวม เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากพลังงานในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน, ถ่านหิน, นิวเคลียร์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งาน และไม่ทำลายสภาพแวดล้อม เพียงแต่ติดตั้งไว้ในที่ๆมีแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ มีอายุการใช้งานเกินกว่า 20 ปี เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทรอยต่ออวิวิพันธ์ (heterojunction) ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบชัลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Cu(In,Ga)Se_2 เป็นชั้นดูดกลืนแสง กำลังได้รับความนิยมเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยจะมีส่วนประกอบเป็นชั้นๆ ตัวอย่างเช่น $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{Mo}/\text{Sodalime glass}$ มีประสิทธิภาพสูงถึง 18.8% [1] เนื่องจากในชั้นบัฟเฟอร์คือ CdS ซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงานเทียบเท่าความยาวคลื่น 516 nm นั้น ยังมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ถ้าเราสามารถหาสารกึ่งตัวนำตัวอื่นซึ่งมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดีกว่ามาทดแทน ก็จะทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นได้

ฟิล์มบางจำพวก โลหะออกไซด์ (metal oxide) ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ทางแสง , อุณหภูมิจึง , ไฟฟ้า และ อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เป็นตัวนำโปร่งแสง (TCO) วัสดุที่เหมาะสมต้องมีคุณสมบัติการส่งผ่านแสงดี ในแสงย่านตามองเห็น (visible region) สารประกอบหมู่ II-VI ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronics) , เลเซอร์ ไดโอด (laser diode) [2]

ฟิล์มบาง CdO ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็น TCO เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ต่ำ อย่างไรก็ตาม CdO ก็ยังเป็นที่น่าสนใจเพราะเป็นหนึ่งในสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์ที่มีค่าสภาพคล่องพาหะ (carrier mobility) สูง และมีประสิทธิภาพในการทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง มีการสะท้อนแสงย่านอินฟราเรด (infrared region) แต่มีการส่งผ่านแสงในย่านตามองเห็น (visible region) [3] จึงสามารถนำมาใช้นำมาใช้แทน ZnO ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ที่ 3.3 eV [3] นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบาง CdO:Al ที่เตรียมได้โดยกรรมวิธีโซลเจล (sol-gel dip coating technique) มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ที่ 2.52-2.76 eV [4]

การเตรียมฟิล์มบาง CdO เจือด้วย Al สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering), วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ (Evaporation), วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis), วิธีโซลเจล (sol-gel) และวิธีการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition :CBD) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีนั้น เป็นวิธีที่มีข้อดีคือ สามารถเตรียมสารได้ขนาดใหญ่ตามต้องการ ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมากและยังสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักคือที่ประมาณ 60-90 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าวิธีอื่นๆ จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

การเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีนั้นฟิล์มบาง CdO:Al เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) กับออกไซด์ไอออน (O^{2-}) ในสารละลาย แล้วไปเคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ (substrate) จากนั้นใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยการอบสารละลายเคมีที่เจือด้วยอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จากนั้นนำฟิล์มบาง CdO:Al ไปทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ โดยการแอนนิลนี้ทำให้ฟิล์มบาง CdO:Al มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในฟิล์มเป็นระเบียบยิ่งขึ้น ทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และที่สำคัญจะทำให้คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมและปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบาง CdO บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยการอบสารละลายเคมีที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอะลูมิเนียมด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆ และนำไปแอนนิลที่อุณหภูมิ 350 °C ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4. ศึกษาสมบัติของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

5. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

6. วัดค่าสภาพนำไฟฟ้า, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ โดยวิธีปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มบางจากการอบสารละลายเคมี ในส่วนของชั้นฟิล์มบาง CdO:Al เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีการเตรียมที่ให้ประสิทธิภาพสูง และต้นทุนไม่สูงจนเกินไป จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆเชิงฟิสิกส์ ได้แก่ ช่องว่างแถบพลังงาน , สมบัติเชิงไฟฟ้า , สมบัติเชิงแสง , ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีอบสารละลายเคมี พร้อมทั้งจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ทำโครงการพิเศษ
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CdO:Al บนกระจกสไลด์โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยการอบสารละลายเคมีที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอะลูมิเนียม และนำไปแอนนิลที่อุณหภูมิ 350° C ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง โดยอาศัยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
4. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
5. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง
6. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
7. วัดค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ โดยวิธีปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีที่มีคุณภาพดี ข้อบกพร่องน้อย ความต้านทานต่ำสัมประสิทธิภาพดูดกลืนแสงสูง ทิศแน่นอน ผิวหน้าเรียบ

1. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdO:Al
2. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษากันคว้าทฤษฎี และเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นชั้นบัฟเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำให้ได้เรียนรู้วิธีการตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง เช่น สมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



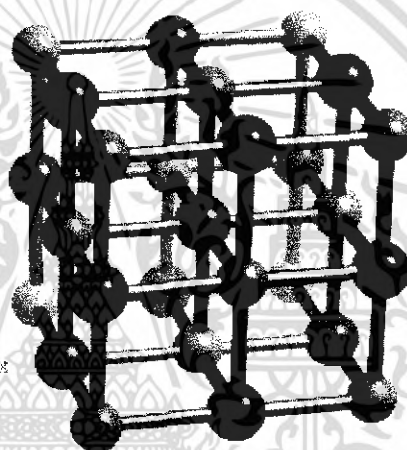
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ (5,6)

โครงสร้างแถบพลังงานของสาร ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ เรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdO มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกเป็น โครงสร้างสามัญแบบโซเดียมคลอไรด์ (rock salt)



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบโซเดียมคลอไรด์

โครงสร้างผลึกแบบโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride , NaCl structure) แสดงดังรูปที่ 2.1 บราวายส์แลตทิซ (bravais lattice) เป็นแบบแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic lattice: fcc, $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) หนึ่งหน่วยเซลล์มี 4 อะตอม เบสิส (basis) ประกอบด้วย อะตอมของ Na และ Cl อะตอมของโครงสร้างผลึกอยู่ที่ตำแหน่ง

$$\begin{array}{l} \text{Na : } 0,0,0 ; \quad \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0 ; \quad \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2} ; \quad 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \\ \text{Cl : } \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} ; \quad 0, 0, \frac{1}{2} ; \quad 0, \frac{1}{2}, 0 ; \quad \frac{1}{2}, 0, 0 \end{array}$$

คลอไรด์ไอออนมีโครงสร้างแบบการบรรจุชิดที่สุดรูปลูกบาศก์ (ccp) และมีโซเดียมไอออนบรรจุในช่องว่างของออกตะฮีดรอล แต่คลอไรด์ไอออนจะสัมผัสกับโซเดียมหกไอออน และแต่ละโซเดียมไอออนจะสัมผัสกับคลอไรด์หกไอออน ทำให้โซเดียมคลอไรด์มีจำนวนโคออร์ดิเนชัน

แบบ 6:6 และหน่วยเซลล์มีการซ้อนทับกันระหว่าง ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (face-center cubic structure) ของคลอไรด์ไอออนกับทรงเหลี่ยมสี่หน้า ของโซเดียมไอออน

ในหน่วยเซลล์ของโซเดียมคลอไรด์จะมีช่องออกตะติรอลอยู่ตรงกลางของหน่วยเซลล์ 1 ช่อง และอีก 12 ช่องอยู่ตามขอบของรูปลูกบาศก์ และช่องว่างที่อยู่ที่ยกขอบจะต้องแบ่งให้หน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกันจึงมีปริมาตรของช่องว่างแต่ละหน่วยเซลล์เท่ากับ $\frac{1}{4}$ ในหน่วยเซลล์ของออกตะติรอลเท่ากับ $1+12 \times \frac{1}{4} = 4$ ช่อง ดังนั้นมี Na = 4 ไอออนต่อหน่วยเซลล์

ส่วนคลอไรด์ไอออนจะมี 6 ไอออนที่หน้าของรูปลูกบาศก์จะถูกแบ่งให้ 2 หน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกัน และที่มุมทั้ง 8 จะถูกแบ่งให้แปดหน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกัน Cl ในหนึ่งหน่วยจะเท่ากับ $(6 \times \frac{1}{2}) + (8 \times \frac{1}{8}) = 4$ ไอออน ในหน่วยเซลล์ของ NaCl จึงมีอัตราส่วน Na : Cl = 1:1

2.2 สมบัติพื้นฐานของแคดเมียมออกไซด์ [6]

แคดเมียมออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ ออกตะติรอล (octahedral) รูปแบบของโครงสร้างเป็นแบบ NaCl (rock salt)

แคดเมียมออกไซด์ : CdO

เลขมวล : 128.41

กลาส : ออกไซด์

สมบัติทางกายภาพ

สี : น้ำตาล

สถานะ : ของแข็ง

จุดหลอมเหลว : 1500°C

จุดเดือด : 1559°C

ความหนาแน่น : 8150 kg m⁻³.

ตารางที่ 2.2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์, เลขออกซิเดชัน และการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของธาตุ Cd กับ O

ธาตุ	เลขออกซิเดชัน	การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน
Cd	2	[Kr].4d ¹⁰
O	-2	[He].2s ² .2p ⁶

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

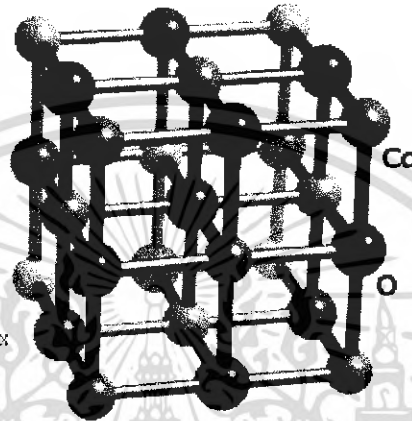
โครงสร้างสถานะของแข็ง [6]

รูปแบบโครงสร้าง : NaCl (rock salt)

โครงสร้างเชิงเรขาคณิตของแคดเมียม : มีจำนวนโคออร์ดิเนชัน (coordination number)

เท่ากับ 6 ออกตะสีดรอ

cadmium (II) oxide



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมออกไซด์

2.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก [1,5,7,8]

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร และในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วย ซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง โครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

2.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

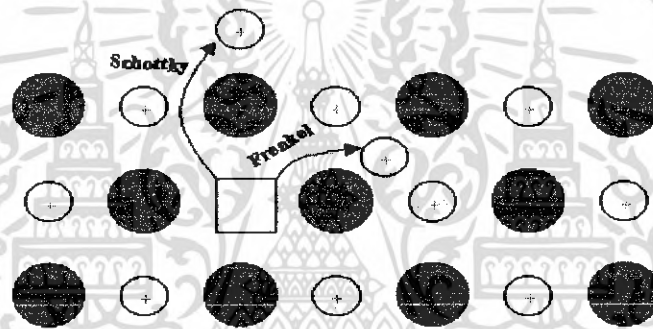
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงสร้างผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (schottky defect)

ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก

ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไป จากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก

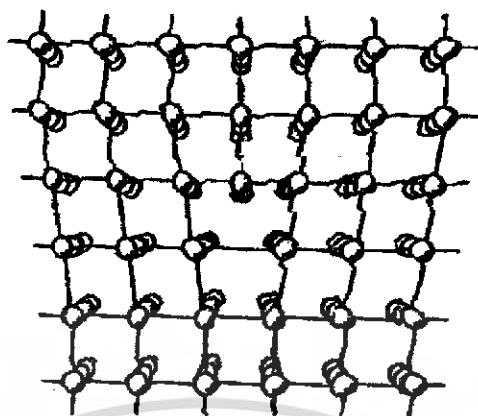
ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ



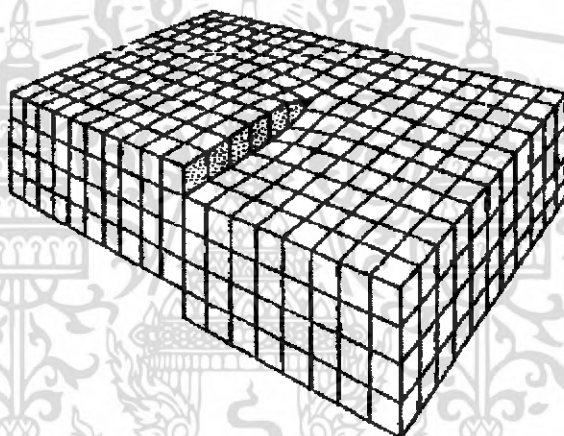
รูปที่ 2.3 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

2.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน (dislocations) เกิดจากความผิดปกติของจุดของแลตทิซตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.4 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตเลชันแบบขอบ



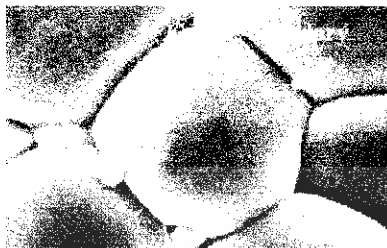
รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตเลชันแบบสกรู

2.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), รวมทั้งเกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries)

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ซึ่ง

เกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.6 แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึก [1,7,8,9]

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยวิธี θ - 2θ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึก พหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

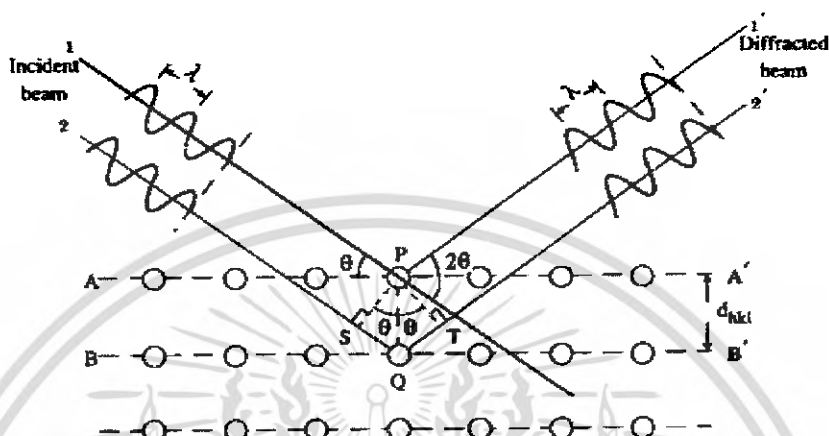
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง(path difference) จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hk} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

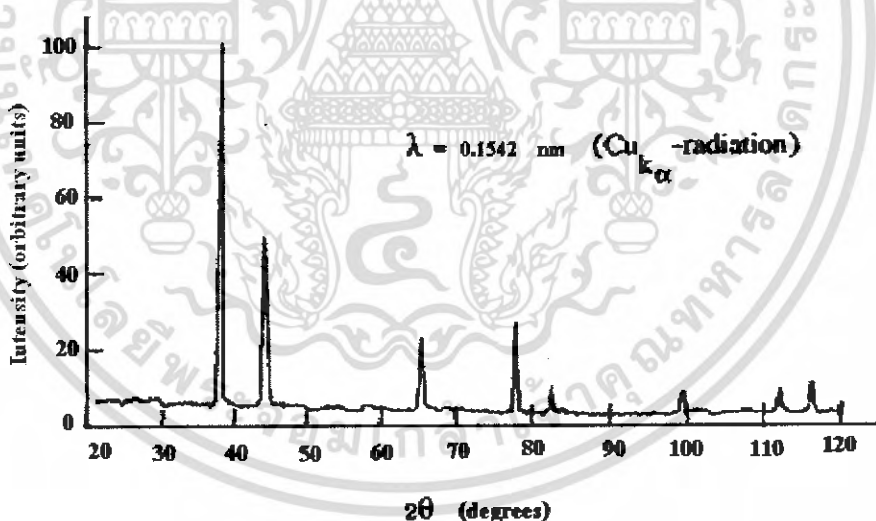
เมื่อ d_{hk}	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบ
θ	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
n	คือ	อันดับการเลี้ยวเบนที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

จากรูปที่ 2.8 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพิก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
h, k, l คือ ระนาบของผลึก
การพล็อตค่า $\beta_{2\theta} \cos\theta/\lambda$ กับ $(\sin\theta/\lambda)$ สามารถหาขนาดขนาดของเกรน (grain size) และความเครียดในระดับจุลภาคได้

$$\beta_{2\theta} \cos\theta/\lambda = 1/D + (\epsilon \sin\theta/\lambda)$$

เมื่อ ϵ คือ ความเครียดระดับจุลภาค
D คือ ขนาดของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of diffraction peak)

ขนาดของเกรน (grain size) หาได้จากสมการ

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.4)$$

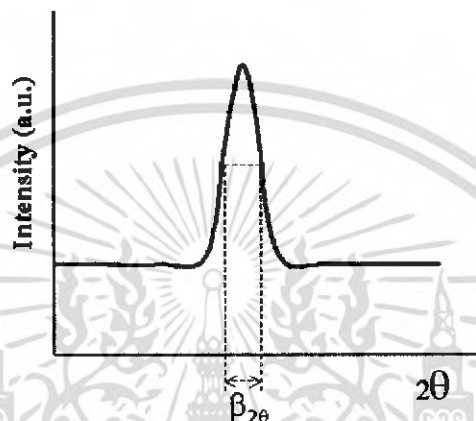
เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain) หาได้จากสมการ

$$\varepsilon = \beta_{2\theta} \cos \theta / 4 \quad (2.5)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดระดับจุลภาค



รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสมการของ Scherrer ของรังสีเอ็กซ์

การหาความชอบในการจัดเรียงระนาบของ โครงผลึกในบางทิศทาง (preferorientation)

$$TC(hkl) = (I(hkl) / I_0(hkl)) / ((1/N) \sum (I(hkl) / I_0(hkl))) \quad (2.6)$$

เมื่อ

TC = texture coefficient

I = measured intensity

I_0 = JCPDS standard

N = number of reflection

$$\text{ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation density) } \rho = 1/L^2 \quad (2.7)$$

เมื่อ L = ขนาดของเกรน

เราอาจตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก รูปแบบการเลี้ยวเบนกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากผงผลึก [powder diffraction file (PDF)] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ ซึ่งได้จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน

รังสีเอ็กซ์ โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ก่อนจะตีพิมพ์ในหนังสือหรือ CD-ROM เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานสำหรับการอ้างอิง

บัตรข้อมูล PDF ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้ คือ

1. เซตและหมายเลขไฟล์ (set and file number)
2. พิกที่มีความเข้มมากที่สุด 3 ลำดับแรก (three strongest lines)
3. พิกที่ตำแหน่งมุมต่ำที่สุด (lowest-angle line)
4. สูตรเคมีและชื่อสาร (chemical formula and name of substance)
5. ข้อมูลวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีที่ใช้ (data on diffraction method used) เช่น แหล่งกำเนิดเอ็กซ์เรย์ และฟิลเตอร์ เป็นต้น
6. ข้อมูลทางผลึกวิทยา (crystallographic data) เช่น รูปร่างผลึกและขนาดหน่วยเซลล์ เป็นต้น
7. ข้อมูลทางแสงและอื่น ๆ (optical and other data)
8. ข้อมูลของสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ (data of specimen)
9. รูปแบบการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ (diffraction pattern) จะบอกค่าความเข้มสัมพัทธ์ (I/I) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกที่มีความเข้มสูงสุด และระนาบผลึก (hkl)

2.5 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [1,5,7,8]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจะกล่าวถึงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน, ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของ แครดเมียมซัลไฟด์, สเปกตรัมการส่งของแสง และการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

2.5.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน

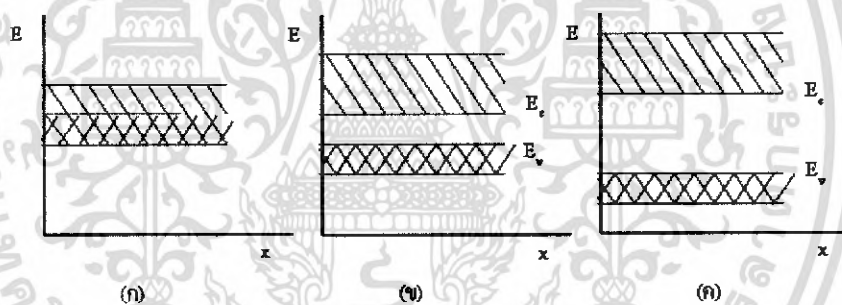
ไม่ถูกยึดอยู่ที่อะตอมหนึ่งอะตอมใดโดยเฉพาะ ซึ่งไม่เหมือนกับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ไม่เป็นอิสระ อิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดกระแสอาจถูกเรียกว่าอิเล็กตรอนนำ (conduction electron) และในผลึกของแข็งอาจพิจารณาได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ท่ามกลางบ่อศักย์ที่เป็นคาบ (periodic potential) อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างของไอออนคอร์ (ion core) มีระยะเท่ากันตลอดซึ่งเท่ากับค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีได้นั้นจะมีได้ในแถบหนึ่งแถบใดเท่านั้น คือ แถบยินยอม (allowed band) และแถบพลังงานที่จะมีได้นั้นจะถูกแบ่งกันไว้ด้วยแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งหมายถึงพลังงานในย่านนี้ อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะมีได้ แถบดังกล่าวถูกเรียกว่า “แถบต้องห้ามในโลหะอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า อิเล็กตรอนวาเลนซ์และถือว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระหรือช่องว่างแถบพลังงาน”

(forbidden band or energy gap) ภายในแถบอินซอมหนึ่ง ๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนี้จะแสดงตัว เหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระทุกประการ

2.5.2 โลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

ลักษณะ โครงสร้างของแถบพลังงานของของแข็ง สามารถบ่งบอกคุณสมบัติการนำ ไฟฟ้าของวัสดุของแข็งนั้น ๆ ได้เป็นอย่างดี สภาพความนำไฟฟ้าของสารใด ๆ จะมีค่ามากหรือน้อยก็ ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือปริมาณของความหนาแน่นของประจุพาหะที่มีอยู่

กรณีที่จะมีการนำไฟฟ้าได้แล้ว จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ช่องว่างอยู่ในแถบพลังงานและเมื่อ มีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ระดับต่าง ๆ ซึ่งอยู่ใต้ระดับพลังงานที่ว่างอยู่ ก็จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น และ เคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในสถานะที่ว่างอยู่นั้น จากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ก็จะเคลื่อนที่ตามกันไปอย่างนี้ จะ ทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนขึ้น ตัวนำที่ดีจะต้องมีพาหะซึ่งอยู่ในระดับต่าง ๆ ภายใน แถบพลังงานซึ่งประกอบด้วยแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบนำและวาเลนซ์ซ้อนเหลื่อมกันซึ่งคือ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะนั่นเอง ดังรูปที่ 2.10 (ก)



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

(ก) โลหะ

(ข) สารกึ่งตัวนำ

(ค) ฉนวน

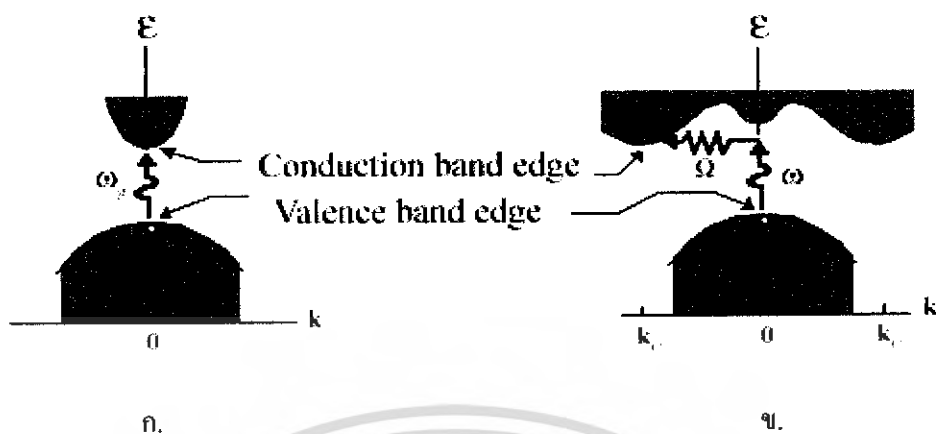
กรณีของฉนวน แถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเป็นแถบที่มี อิเล็กตรอนอยู่เต็ม และจะแยกจากแถบนำ (conduction band) ซึ่งเป็นแถบที่ว่าง โดยมีช่องว่าง แถบพลังงานซึ่งกว้างหลาย ๆ อิเล็กตรอนโวลต์ก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่แสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และที่อุณหภูมิธรรมดา ๆ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะมีโอกาสน้อยมาก ที่จะมียุทธศาสตร์เพิ่มขึ้นจนสามารถข้ามช่องว่าง แถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำได้ ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำจึงมีน้อยและจำกัด แต่ถ้า หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูง ๆ จะทำให้ความนำเพิ่มขึ้นได้

ส่วนสารกึ่งตัวนำความนำไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ระหว่างโลหะกับฉนวน และมีโครงสร้างของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.10 (ค) หากแต่ว่าช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดน้อยกว่าฉนวนมาก โดยทั่วไปมักมีค่าไม่กี่อิเล็กตรอนโวลต์ และเนื่องจากว่าช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่าของฉนวนนี้เอง จึงทำให้แม้แต่อุณหภูมิธรรมดาๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ก็สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างการนำไฟฟ้าในโลหะกับสารกึ่งตัวนำก็คือ เมื่ออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ได้รับพลังงานเพิ่มจากเค็มมากพอที่จะเข้าไปอยู่ในแถบความนำได้แล้วมันจะทิ้งให้เกิดที่ว่างในแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดการไหลของกระแสอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของประจุในแถบวาเลนซ์อีกด้วย ซึ่งกระแสนี้อธิบายได้โดยการกล่าวได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่ของโฮล และยังสามารถสรุปได้ว่าในโลหะพาหะที่ช่วยนำกระแสไฟฟ้าก็คืออิเล็กตรอนอิสระ แต่สำหรับในกรณีสารกึ่งตัวนำ นอกจากอิเล็กตรอนในแถบนำแล้ว ยังมีโฮลในแถบวาเลนซ์ช่วยในการนำไฟฟ้าได้อีกด้วย

2.5.3 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

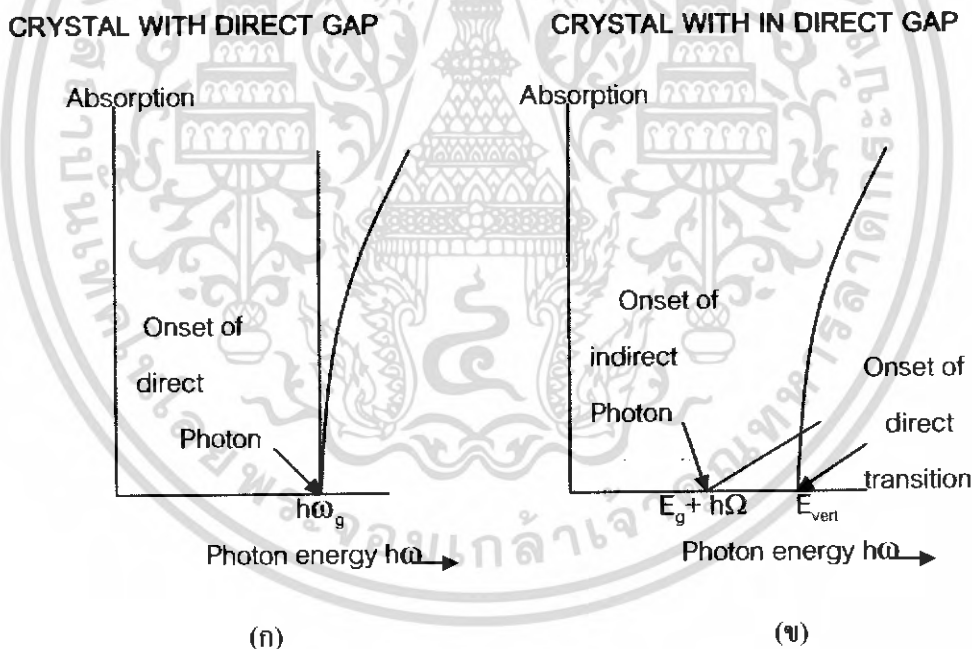
โดยทั่วไปลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบ คือ แบบตรง (direct bandgap) และแบบเฉียง (indirect bandgap) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น (wave vector; k) ค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($h\nu = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น จึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน (absorption coefficient) กับพลังงาน โฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.12 (ก) ส่วนลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้ว จะทำให้เกิดกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟตอนเกิดขึ้น $h\nu = E_g \pm \hbar\Omega$ เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นทำให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอนและสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระแสดงดัง รูปที่ 2.11 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจนได้กราฟ ดังรูป 2.12 (ข)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

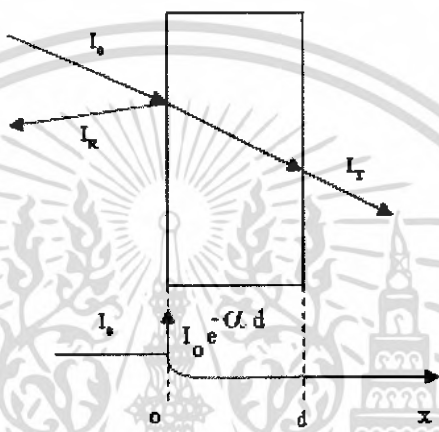


รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.6 การส่งผ่านแสง [10]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง และองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
	I_R	คือ	ความเข้มแสงสะท้อน
	I_T	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่าน
	$I_0 e^{-\alpha d}$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (transmittance)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.9)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.10)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

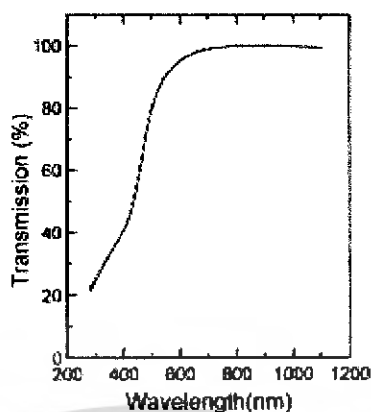
$$I_t = I_i * e^{-\alpha d} = (1-R)I_0 * e^{-\alpha d} \quad (2.11)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.12)$$

2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง [1,5,7,10,11]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสง ที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นของ แสดงถึง การลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 พลังงาน โฟตอนที่ของการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำ และจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิคมมากที่สุด



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (T) จากรูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = \frac{I_t}{I_0} = e^{-\alpha d} \quad (2.13)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T = -\frac{1}{d} \ln \frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I_t} \quad (2.14)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบน

แผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.15)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่ และสมการที่ (2.16) ใช้กับสารที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง

$$(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.16)$$

เมื่อ B คือค่าคงที่ และสมการที่ (2.16) ใช้กับสารที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง

2.7 สมบัติทางไฟฟ้า [1,5,7,8,12,13,14,15,16]

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอน โวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับ หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของสารกึ่งตัวนำ จึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.7.1 สภาพนำไฟฟ้า [12,13]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity: σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field:E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.17)$$

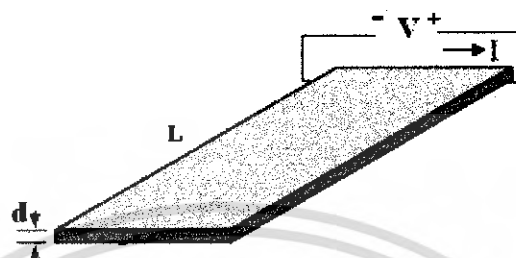
เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.15 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง

ถ้ามีแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งให้แรงดันและเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.19)$$

และ

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.20)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.17) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{L} \right) \quad (2.21)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{L}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (2.22)$$

สมการที่ (2.22) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทาน หรือสภาพนำไฟฟ้าและขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [12,13]

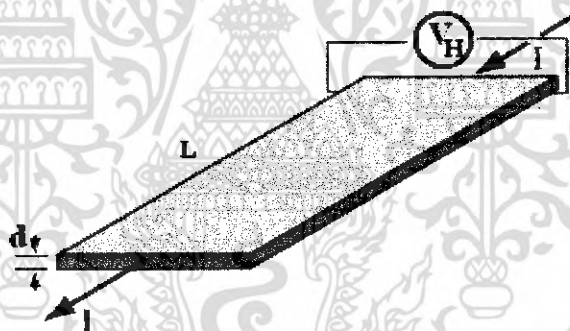
วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้

เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.7.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารแล้วถึงมาคิดความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารที่ต้องการ การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นถึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่งขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.16

จากค่าที่ทราบ คือ กระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ และพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.16 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.23)$$

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (2.24)$$

$$\rho = \frac{V A}{I l} \quad (2.25)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วย

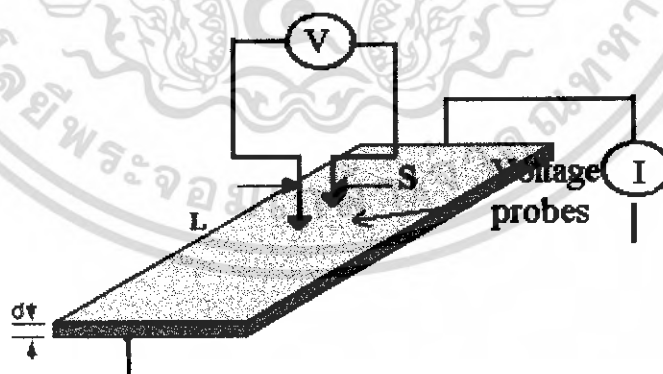
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่า บริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่ได้มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดี แสดงว่า จะต้องมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้า (หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงๆ ของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทาน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองนี้ใกล้เคียงกันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริงซึ่งหมายถึง ความต้านทานจำเพาะของสารจะมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เพราะที่ผิวสัมผัสจะดี (กรณีเป็นโอห์มมิก) หรือ ไม่ดี (ไม่เป็นโอห์มมิก) นั้นจะตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงๆ (เท่าที่จะหาได้) ถ้าทำเช่นนี้ค่าของความผิดพลาดจะน้อยมาก

2.7.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับการวัดโดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลง และสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.17 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องอีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องให้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่กำลังจะวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้า - ออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ โครงสร้างผลึกว่ามีโครงสร้างผลึกชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพด้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

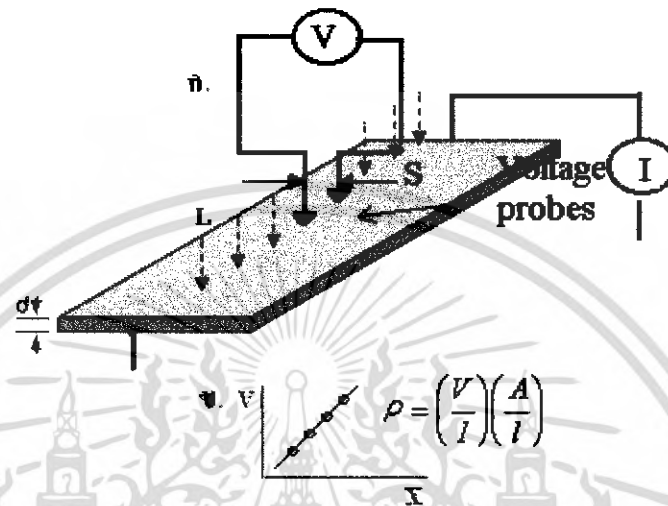
สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้ว

- วัดศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า-ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าบนสารตัวอย่างนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทังสเตน เงิน พลาตินัม เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่าง จะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่าง ว่ากำลังวัดอยู่ในระนาบหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องมีความสมบูรณ์ไม่เกิดขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ที่ผิวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลายๆ จุด และต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะสั้น ๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน

- อาจจะไปด้วยวิธีตรงที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.18(ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



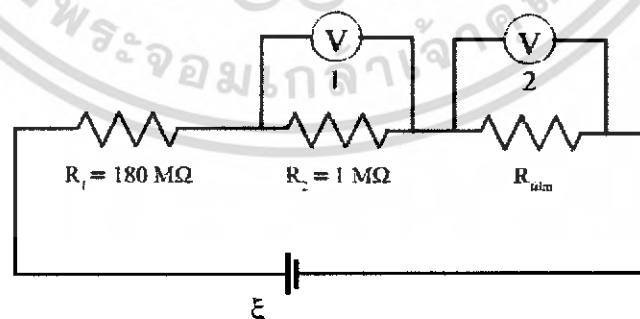
รูปที่ 2.18 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

(ก) การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.7.2.3 การวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่ใช้ในการทดลอง

2.7.2.3.1 ไม่ทำการฉายแสงให้กับฟิล์ม

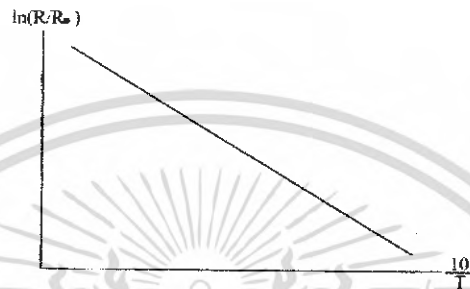


รูปที่ 2.19 แสดงรูปการวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยไม่ทำการฉายแสงให้กับฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำการจ่ายแรงดันให้กับวงจร แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อม R_2 (V_{R2}) จะทำให้เราทราบค่ากระแสที่ไหลในวงจรได้ และจะทำการกำหนด ค่ากระแส

2. หลังจากนั้นปลดมิเตอร์ในข้อ 1 ออกแล้วนำมาต่อเข้ากับฟิล์มเพื่อวัดความต่างศักย์ตกคร่อมฟิล์ม โดยขณะวัดจะทำการให้ความร้อนกับฟิล์มด้วยโดยทำการเปลี่ยนอุณหภูมิไปเรื่อยๆ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟเป็นฟังก์ชันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.20 แสดงรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(R/R_0)$ กับ $(10^3/T)$

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.26)$$

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \left(\frac{E_a}{10^3 k}\right)\left(\frac{10^3}{T}\right) \quad (2.27)$$

เมื่อ

R = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิใดๆ

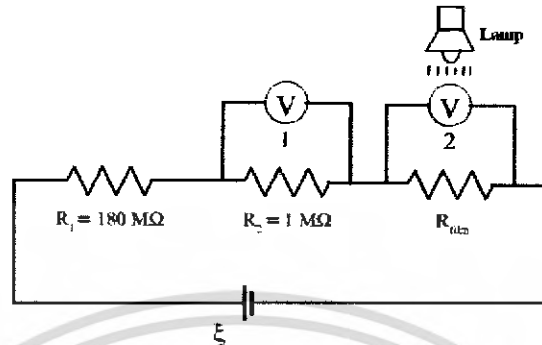
R_0 = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิห้อง

E_a = ค่าพลังงานกระตุ้น

k = ค่าคงที่ของ โบลซ์ทมานน์มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T = อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเคลวิน

2.7.2.3.2 กรณีทำการฉายแสงในฟิล์ม



รูปที่ 2.21 แสดงรูปการวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยทำการฉายแสงให้กับฟิล์ม

$$\xi = I(R_1 + R_2 + R_{film}) \quad (2.28)$$

$$I = \left(\frac{1}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \xi \quad (2.29)$$

จากการทดลองจริงจะทำการวัด V_{R_2} ซึ่งเป็นความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน $1\text{M}\Omega$ เนื่องจากฟิล์มบางมีความต้านทานสูงมากระดับหลายสิบล้าน $\text{M}\Omega$ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านวงจรในระดับที่ต่ำกว่า 10^{-6}A ดังนั้นความต่างศักย์ตกคร่อม R_2 (V_{R_2}) จะมีค่าอยู่ในระดับ mV ซึ่งวัดค่าได้ค่อนข้างแม่นยำจากการใช้มัลติมิเตอร์ ยิ่งให้กระแสไหลในวงจรต่ำเท่าไร ปัญหารอยต่อโอห์มมีระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ จะมีผลลดลง

จาก

$$\xi = I(R_1 + R_2 + R_{film}) \quad (2.30)$$

$$I = \left(\frac{V_{R_2}}{R_2} \right) \quad (2.31)$$

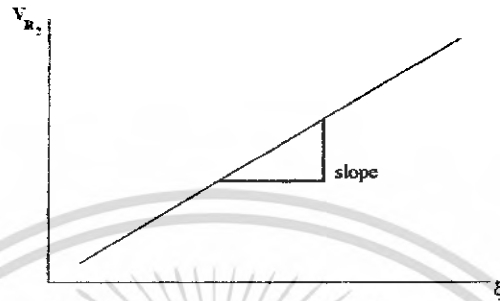
แทนสมการที่ (2.29) ลงใน (2.31) จะได้

$$V_{R_2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \xi \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำความสัมพันธ์ในสมการ (1) มาเขียนกราฟจะได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยในความสัมพันธ์

$$\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{R_2} กับ ξ

ดังนั้น

$$R_{film} = \left(\frac{R_2}{slope} \right) - (R_1 + R_2) \quad (2.34)$$

2.7.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ [14,15,16]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ นั้น มีที่โดดเด่นอยู่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ 2 แบบด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรน ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือไม่ก็เกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกัปดักประจุ, ระดับพลังงานของสารเจือ, ขนาดของเกรนและความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{-1}{2}} \exp \left[\frac{-\Phi_b}{kT} \right] \quad (2.35)$$

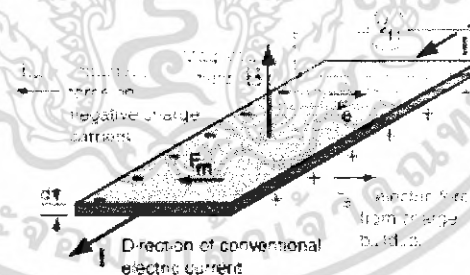
เมื่อ Φ_b คือ ค่าค่าแกงศักย์
A คือ ค่าคงที่

T	คือ	อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน
k	คือ	ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} J/ K

และในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ การนำไฟฟ้าแบบนี้โดดเด่นในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกส์อิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกับดักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{-1/2} = A \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (2.36)$$

2.7.4 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ [1,7,12,15]



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์

สำหรับโลหะ หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด n หรือ p พาหะตัวนำจะมีเพียงชนิดเดียว (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) ถ้าพาหะตัวนำมีประจุ q และสภาพเคลื่อนที่ได้ μ โดยอาศัยรูปที่ 2.23 เราพบว่า พาหะตัวนำดังกล่าวจะถูกแรงกระทำ จากทั้งสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B (ในทิศทาง $+z$) โดยอาศัยนิยามสภาพเคลื่อนที่ เมื่อคิดถึงผลของสนามแม่เหล็กร่วมด้วย เราสามารถเขียนความเร็วลอย

เลื่อนได้เป็น

$$\vec{v} = \pm\mu(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.37)$$

โดยที่เครื่องหมายบวก ใช้สำหรับโฮล และเครื่องหมายลบใช้กับอิเล็กตรอน

สำหรับในพิกัดฉาก $x y z$ เราสามารถเขียน $\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$

โดยที่

$$v_x = \pm\mu(E_x + v_y B_z) \quad (2.38)$$

$$v_y = \pm\mu(E_y + v_x B_z) \quad (2.39)$$

$$v_z = \pm\mu E_z \quad (\because B_x = B_y = 0) \quad (2.40)$$

เนื่องจาก ความหนาแน่นกระแส $\vec{J} = nq\vec{v}$ ดังนั้น ความหนาแน่นกระแส ในแต่ละแกนพิกัด (component) เขียนได้เป็น

$$J_x = \pm\mu(nqE_x + J_y B_z) \quad (2.41)$$

$$J_y = \pm\mu(nqE_y + J_x B_z) \quad (2.42)$$

$$J_z = \pm\mu nqE_z \quad (2.43)$$

ถ้าจ่ายกระแสให้กับวัสดุตัวนำ ตามรูปที่ 2.23 โดยต่อขั้วของแหล่งจ่ายไฟคร่อมด้าน 1 และ 2 จะทำให้กระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำดังกล่าวในทิศทาง $+x$ ดังนั้น current density ในแนว y และ จึงเป็น ศูนย์ กล่าวคือ $J_y = J_z = 0$ ดังนั้น

$$E_y = \frac{J_x B_z}{nq} \quad (\text{V/m}) \quad (2.44)$$

สมการที่ (2.41) แสดงให้เห็นว่าเกิดสนามไฟฟ้าในแนว y คร่อม ด้าน 3 และ 4 ขึ้นโดยสนามไฟฟ้า E_y นี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะ โดยขนาดของแรงเท่ากับ แรงกระทำที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก B_z แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อที่จะให้เห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลองพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เมื่อวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.23 โดยผ่านกระแสดังรูป อิเล็กตรอนอิสระจะถูกแรงกระทำเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น $F_{B_y} = -qv_x B_z$ ทำให้ด้าน 4 ของสารกึ่งตัวนำมีประจุบวก และด้าน 3 มีประจุลบ ดังแสดงใน รูปที่ 2.23 ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ตามขวางในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage : V_H) และมี

สนามไฟฟ้า E ในทิศทาง $-y$ สนามนี้ทำให้เกิดแรงกระทำขนาด qE ในทิศ $+y$ ($F_E = qE_y$) หักล้างแรงจากสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ

$$F_y + F_{-y} = 0 \quad (2.45)$$

$$qE_y - qv_x B_z = 0 \quad (2.46)$$

$$\therefore E_y = \frac{qv_x B_z}{q} = \frac{nq v_x B_z}{nq} = \frac{J_x B_z}{nq} \quad (2.47)$$

กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient : R_H) เขียนได้เป็น

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} \quad (2.48)$$

เพื่อความสะดวกในการหาค่า R_H เราจึงจำเป็นต้องเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าที่วัดได้จากการทดลอง V_H, t (ความหนาของวัสดุที่นำมาศึกษา) , I และ B_z

เนื่องจาก $V_H = V_3 - V_4 = WE_y$ (เมื่อ W คือความกว้างของวัสดุที่นำมาศึกษา) และ $J_x = \frac{I}{W_t}$ (ตามนิยามของค่าความหนาแน่นกระแสในแนวแกน x)

$$\therefore R_H = \frac{V_H t}{IB_z} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.49)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.37) และ (2.38) เราพบว่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะตัวนำ (p) ดังนี้

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.50)$$

ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ทำให้เราได้ทราบถึงค่าความหนาแน่นของพาหะประจุของพาหะ รวมถึงสภาพคล่องของพาหะ (Hall mobility : μ_n) ตามสมการ

$$\mu_n = |R_H| \sigma \quad (m^2(V.s)^{-1}) \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า

สำหรับในกรณีที่วัสดุตัวนำมีพาหะตัวนำทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ได้ดังนี้

เราสามารถเขียนความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน และ โฮลในแนวแกน y ได้เป็น

$$J_y = n_p e v_{py} - n_n e v_{ny} \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.52)$$

เมื่อ V_p และ V_n คือ ความเร็วลอยเลื่อนของโฮลและอิเล็กตรอนในแนวแกน y สามารถเขียน J_y ได้ดังนี้

$$\therefore v_y = \pm \mu (E_y - V_x B_z) \quad (2.53)$$

จากสมการที่ (2.53)

$$\begin{aligned} \therefore J_y &= n_p e \mu_p (E_y - V_x B_z) + n_n e \mu_n (E_y - V_x B_z) \\ J_y &= (n_p \mu_p + n_n \mu_n) e E_y - n_p e \mu_p V_x B_z - n_n e \mu_n V_x B_z \\ \therefore v_x &= \pm \mu (E_x - V_y B_z) \end{aligned} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.54)

$$\begin{aligned} \therefore J_y &= (n_p \mu_p + n_n \mu_n) e E_y - n_p e \mu_p B_z (\mu_p) (E_x + V_y B_z) + n_n e \mu_n B_z (\mu_n) (E_x + V_y B_z) \\ &= (n_p \mu_p + n_n \mu_n) e E_y - n_p e \mu_p^2 B_z E_x - n_p e \mu_p^2 B_z^2 V_y + n_n e \mu_n^2 B_z E_x + n_n e \mu_n^2 B_z^2 V_y \end{aligned}$$

(กำหนดให้ ขนาดของ B มีค่าน้อย ๆ จะทำให้เทอมที่ 3 และ 5 เป็น (0))

$$\therefore J_y = (n_p \mu_p + n_n \mu_n) e E_y - (n_n \mu_n^2) e B_z E_x \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.55)$$

จากนั้นเราสามารถพิจารณาเงื่อนไข $J_y = 0$ (เพราะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างด้าน 3 และ 4 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าหักล้างกับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กและทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่)

โดยอาศัยนิยามของ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z}$$

โดย σ หาได้จากสมการ

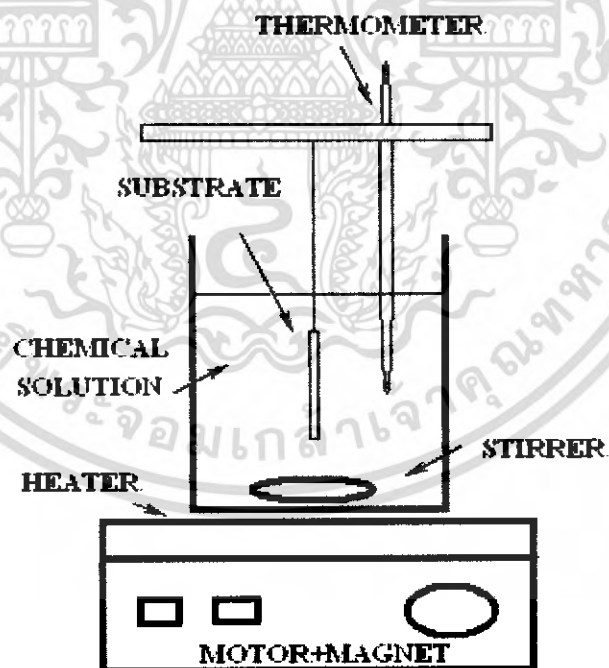
$$\sigma = n_n e \mu_n + n_p e \mu_p \quad (\Omega \cdot m)^{-1}$$

และ $\frac{E_y}{E_x E_z}$ หาได้จากสมการที่ (2.44) เมื่อ $J_y = 0$

$$\text{โดยที่} \quad \frac{E_y}{E_x E_z} = \frac{n_p \mu_p^2 - n_n \mu_n^2}{(n_n \mu_n + n_p \mu_p)}$$

$$\therefore R_H = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z} = \frac{n_p \mu_p^2 - n_n \mu_n^2}{e(n_n \mu_n + n_p \mu_p)} \quad (2.56)$$

2.8 วิธีอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition : CBD) [1,7,8]



รูปที่ 2.24 แสดงภาพจำลองเครื่องมือและอุปกรณ์ของเทคนิควิธีอบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคของ CBD เป็นเทคนิคที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางในวัสดุพวกสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่นการปลูกฟิล์มบางที่ใช้ในการผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เทคนิค CBD เป็นเทคนิคที่ได้เปรียบเทคนิคอื่นๆคือ ไม่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนไม่สูงมาก เทคนิคนี้สามารถที่จะปลูกฟิล์มได้ที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักและเป็นกระบวนการที่ง่าย โดยทำการประยุกต์ใช้กับฐานรองที่มีขนาดใหญ่ ในเรื่องของความหนาของชั้นฟิล์มที่ทำการปลูกสามารถควบคุม โดยการปรับช่วงเวลาในกระบวนการ (เวลาในการอบสารละลาย หรือ ทำการเพิ่มหรือลดจำนวนครั้งในการอบสารละลายเคมี) ให้เหมาะสมกับความหนาของฟิล์ม โดยสัมพันธ์กับ ค่า pH ของสารละลาย, อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของสารเคมีมีความเกี่ยวข้องพันกันด้วย และควรคำนึงถึงเรื่อง โฮโมเจนีซิตี (homogeneity) และ สโตยชิโอเมตรี (stoichiometry) ของผลิตภัณฑ์กับค่าผลผลิตการละลาย (solubility product ; K_{sp}) แต่ในกระบวนการนี้ จะมีความยุ่งยากในเรื่องการควบคุมการตกตะกอนจากสารละลายของสารประกอบบนฐานรองรับให้เหมาะสม

ข้อเสียที่สำคัญของกระบวนการ CBD คือ ขอบเขตของปฏิกิริยา เฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) บนผิวหน้าฐานรองรับถูกจำกัดด้วยปัจจัย 2 ประการคือ 1.การเกิดปฏิกิริยา เฮเทอโรจีเนียส ที่สมบูรณ์ในสารละลาย (สังเกตจากขนาดของตะกอนในสารละลาย) 2.สารละลายที่นำมาทำกระบวนการนี้จะทำการตอบสนองที่ดีกับฐานรองของเราหรือไม่ (สังเกตที่ฟิล์มสามารถปลูกได้บนฐานรองรับหรือไม่)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้มีการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม (CdO:Al) โดยวิธีการอบสารละลายเคมี และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางในกรณีที่มีการแอนนัล รวมถึงกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือ ค่าต่างๆ โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ศึกษาการส่งผ่านของแสง (transmittance) เพื่อหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) หาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้นเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ โดยวิธีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม

อุปกรณ์หลัก คือ แท่นยึดแผ่นรองรับทำจากเทฟลอน (teflon) ซึ่งเจาะร่องไว้ 8 ร่องและเจาะรูตรงกลางสำหรับเสียบแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวตั้งและใส่แท่งแก้วดันเพื่อใช้เป็นแกนยึด โดยแท่งแก้วดันถูกยึดอยู่กับขาตั้งและจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) อยู่บนเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Heating Stirrer) ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิและความเร็วในการกวนสารละลายได้ โดยปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ประมาณ $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรับความเร็วในการกวนสารละลายให้เหมาะสม โดยที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ สารตั้งต้นต่างๆจะถูกเทลงใน บีกเกอร์ที่เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) จนมีปริมาตรของสารละลายทั้งหมดเป็น 150 ml

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการอบสารละลายเคมี

- เตาแอนนัล
- เตาอบ
- แท่งแม่เหล็ก (magnetic Stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องกวนสารละลายแม่เหล็กที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ (Magnetic Heating Stirrer)
- บีกเกอร์ขนาด 200 ml
- เทอร์โมมิเตอร์
- แท่นยึด (Teflon holder)
- แผ่นกระจกสไลด์ 12x25 mm²
- เครื่องชั่งดิจิตอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)
- สารตั้งต้น
 1. แคลเซียมอะซิเตตไดไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
 2. อะลูมิเนียมไนเตรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
 3. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)
 4. กรดอะซิติก (CH_3COOH)
 5. กรดไนตริก (HNO_3)
- เครื่องล้างตัวอย่างด้วยอุลตราโซนิก
- กระดาษวัดค่า pH

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

- เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกโตรมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์ มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ทางแสงในย่านความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลต-ตา มองเห็น-อินฟราเรด (UV-VIS- Spectrophotometer)
- แหล่งกำเนิดกระแสคงที่ ของ Keithley รุ่น 236 source measure unit
- มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic
- มัลติมิเตอร์รุ่น 8842A ของบริษัท Fluke
- เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมหัววัดของ Phywe
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงค่าสูงของ Electronic Measurement Inc.
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ [1,7,8]

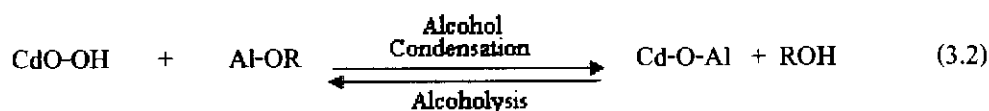
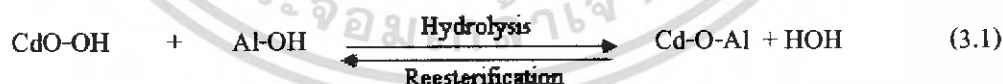
ในการเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้วมีขั้นตอนในการเตรียม ดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและล้างด้วยน้ำปอดประจุ
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene ;TCE)
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน (acetone)
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล (ethanol)
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรดกัดแก้วหรือกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เจือจางความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

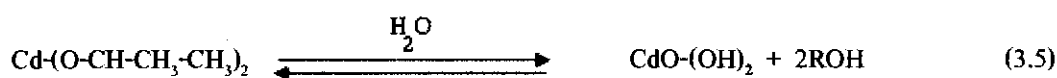
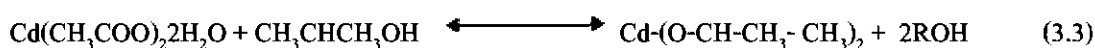
หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้ว ก็จะได้แผ่นรองรับที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้ว เพื่อนำไปใช้สำหรับการเคลือบเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีต่อไป

3.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [17]

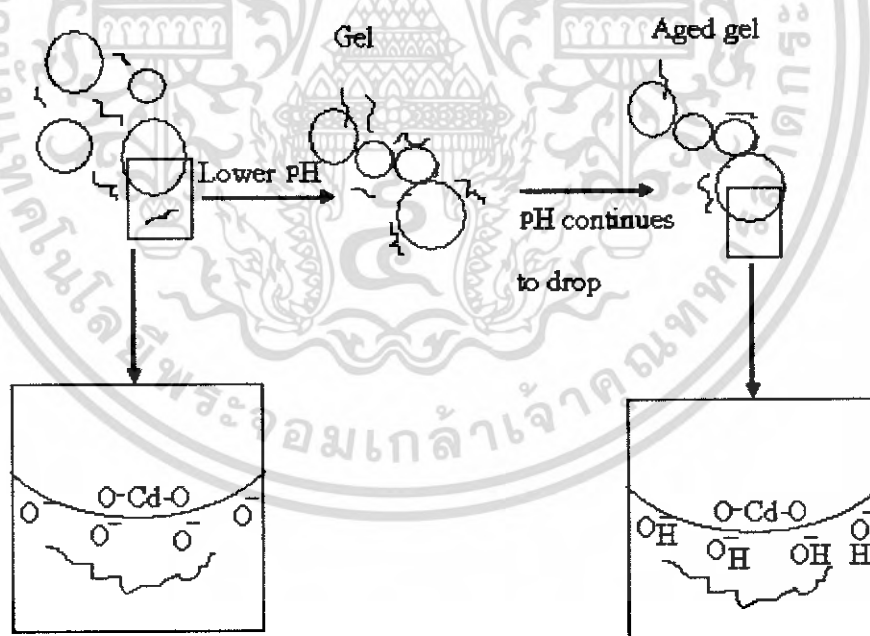
ฟิล์มบาง CdO:Al เกิดจากโลหะแอลกอฮอล์ (metal alkoxide) $M(OR)_x$ โดยหมู่ R คือหมู่แอลกอกซี (alkoxy) ซึ่ง $M(OR)_x$ ละลายในตัวทำละลายในตัวทำละลายและเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือ แอลกอฮอล์ไลซิส (alcoholysis) เป็นผลให้เกิดโครงสร้างของ โลหะออกไซด์ (metal oxide) ดังสมการ



ฟิล์มบาง CdO:Al เกิดจาก กระบวนการของปฏิกิริยา ดังนี้

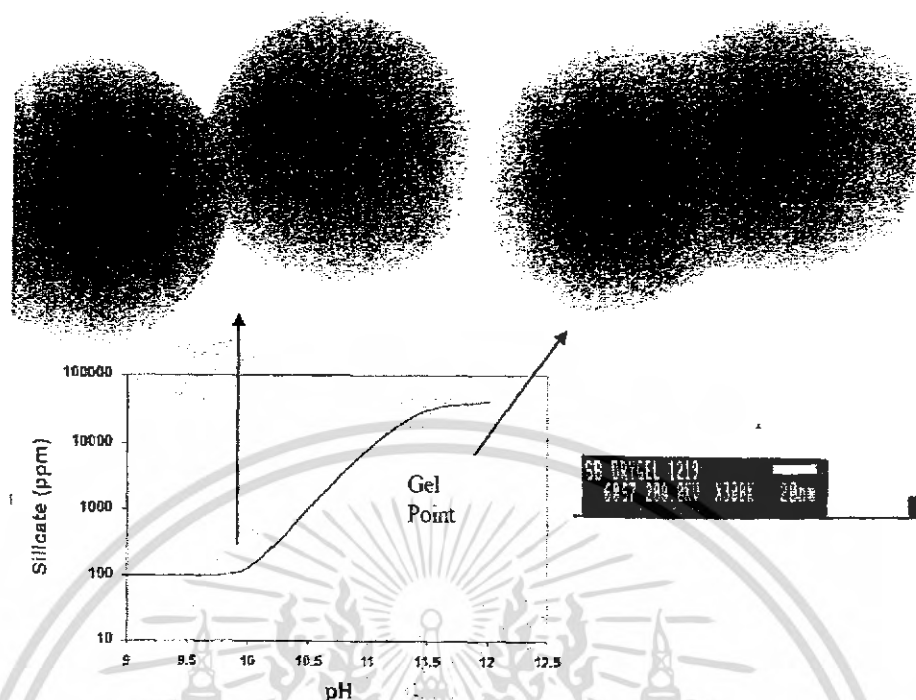


กลไกการรวมตัวของโพลิเมอร์สามารถควบคุมได้ด้วยค่า pH ซึ่งเทคนิคการอบสารละลายเคมีต้องควบคุมและลดการรวมตัวของโพลิเมอร์ด้วยการลดค่า pH (~2-5) และควบคุมการเกิดตะกอนด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการรวมตัวจนทำให้เกิดการเป็น เจล ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงกลไกการรวมตัวของโพลิเมอร์จากการควบคุมด้วยค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงถึงความแตกต่างของอิเล็กตรอนไมโครกราฟจากตะกอนของกลไกการรวมตัวทางโพลิเมอร์ ของ ซิลิกา เจล จำพวก โลหะออกไซด์ จากความสัมพันธ์ของค่า pH

จากรูปที่ 3.2 เมื่อ pH มากกว่า 10 จะเริ่มเกิดเป็น ซิลิกาเจลเป็นผลให้ประจุลบ มีความเสถียร และเมื่อค่า pH มากกว่า 11 เป็นผลทำให้อนุภาคของตะกอนจะจับกันก่อนการตกตะกอนจากการละลายซิลิกา หลังจากนั้นจะได้เป็น เจลของซิลิกา

ดังนั้นเทคนิคการอบสารละลายเคมีต้องควบคุมและลดการรวมตัวทางโพลิเมอร์ด้วยการลดค่า pH (~2-5) และควบคุมการเกิดตะกอนด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อไม่ทำให้เกิดเป็นเจลมากเกินไป

3.4 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในวิธีการอบสารละลายเคมี [4]

$CdO:Al$ ที่ใช้วิธีการอบสารละลายทางเคมี (chemical bath deposition method) สามารถเตรียมได้โดย ใช้สารตั้งต้น แคดเมียมอะซิเตตไดไฮเดรต ($Cd(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) เข้มข้น 0.3M นำมาละลายในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ($CH_3CH_2CH_2OH$) โดยทำการกวนด้วยเครื่อง และผสม อะลูมิเนียมไนเตรด ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) เพื่อทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือ ค่าต่างๆ

3.5 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม (CdO:Al)

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdO:Al โดยวิธีการอบสารละลายเคมี จะต้องใช้สารเคมีดังนี้ แคดเมียมอะซิเตดไดไฮเดรต ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.3 โมล , อะลูมิเนียมไนเตรด ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) เป็นการเจือด้วยอะตอมของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือ ค่าต่างๆ ดังนี้ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10%, ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ($\text{CH}_3\text{CHCH}_3\text{OH}$) เป็นตัวทำละลายและกรดครอะซิก (CH_3COOH) เป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น แคดเมียมอะซิเตดไดไฮเดรต ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.3M
2. ชั่งอะลูมิเนียมไนเตรด ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือ ค่าต่างๆ ดังนี้ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10%
3. ชั่ง ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ($\text{CH}_3\text{CHCH}_3\text{OH}$) ปริมาตร 150 ml ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส
4. ละลายแคดเมียมอะซิเตดไดไฮเดรต ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และอะลูมิเนียมไนเตรด ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ลงในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ($\text{CH}_3\text{CHCH}_3\text{OH}$) เปิดสวิทซ์เครื่องกวนสารละลาย ซึ่งสามารถปรับความเร็วในการหมุนแท่งแม่เหล็กและควบคุมอุณหภูมิที่ 55°C
5. ทำการเติมกรดอะซิก (CH_3COOH) ด้วยปริมาตร 2 มิลลิลิตร ควบคุมให้ได้ pH=4
6. นำกระจกสไลด์ที่ขีดด้วยเทฟลอน ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายที่เตรียมไว้ ทำการอบสารละลายเคมีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาที จะพบว่าฟิล์มบางเคลือบติดอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์นอกจากนี้ยังมีตะกอนของแคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางและตกตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์
5. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาแอนนิลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที
6. นำกระจกสไลด์มาเป่าให้แห้งด้วยความร้อนจากไดร์เป่าผม
7. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
8. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการส่งผ่านแสง ในช่วงความยาวคลื่น 350-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษา ลักษณะ โครงสร้างของแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
9. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปถ่ายภาพหน้าของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM
10. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าความต้านทานของฟิล์ม บางด้วยวิธีสองขั้วเชิง ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH ที่มีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ที่ความเข้มแสงประมาณ 950 ลักซ์ และกรณีที่ไม่มีการฉายแสง

เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่างๆ

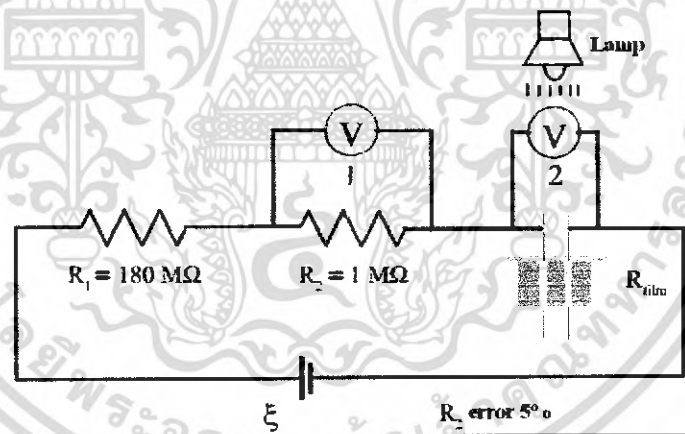
11. วัดค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะโดยวิธีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

3.6 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น [1,7,8]

3.6.1 อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แบตเตอรี่ 9 โวลต์ จำนวน 2 ก้อน
3. อิเล็กโตรมิเตอร์
4. มิลลิแอมป์มิเตอร์
5. หลอดฮาโลเจน 300 วัตต์
6. ลักซ์มิเตอร์

3.6.2 วิธีวัดความต้านทานของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.3 แสดงหลักการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

จากสมการ

$$\xi = I(R_1 + R_2 + R_{film})$$

$$I = \left(\frac{1}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \xi \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

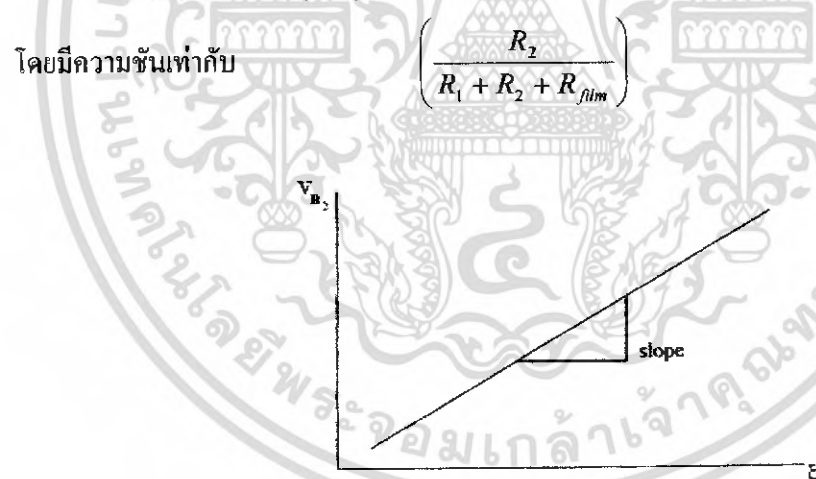
จากการทดลองจริงจะทำการวัด V_{R_2} ซึ่งเป็นความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน $1\text{ M}\Omega$ เนื่องจากฟิล์มบางมีความต้านทานสูงมากระดับหลายสิบล้าน $\text{M}\Omega$ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านวงจรในระดับที่ต่ำกว่า 10^{-6} A ดังนั้นความต่างศักย์ตกคร่อม R_2 (V_{R_2}) จะมีค่าอยู่ในระดับ mV ซึ่งวัดค่าได้ค่อนข้างแม่นยำจากการใช้มัลติมิเตอร์ ยิ่งให้กระแสไหลในวงจรต่ำเท่าไร ปัญหารอยต่อโอห์มมิก ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ จะมีผลลดลง จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{R_2} &= IR_2 \\ I &= \frac{V_{R_2}}{R_2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

แทนสมการ (3.9) ลงใน (3.8) จะได้

$$V_{R_2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \xi \quad (3.10)$$

นำความสัมพันธ์ในสมการ (3.10) มาเขียนกราฟจะได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{R_2} กับ ξ

ดังนั้น

$$R_{film} = \frac{R_2}{\text{Slope}} - (R_1 + R_2) \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \frac{\rho}{d} \quad (3.12)$$

$$R_{film} = \frac{\rho}{d} \frac{l}{w} \quad (3.13)$$

$$R_s = R_{film} \frac{l}{w} \quad (3.14)$$

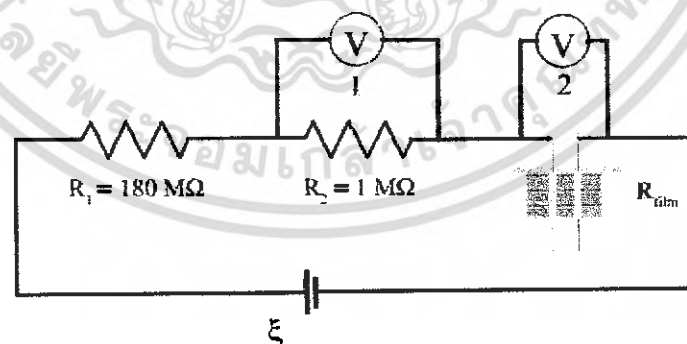
เมื่อ

l	คือ	ความยาวของฟิล์ม
d	คือ	ความหนาของฟิล์ม
w	คือ	ความกว้างของฟิล์ม
ρ	คือ	สภาพต้านทานไฟฟ้า

3.7 วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ [1,7,8]

3.7.1 อุปกรณ์

1. ตัวอย่างฟิล์มบางที่ทำรอยต่อด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าเต็มตามแบบที่ทำการวัดความต้านทานสองขั้ว
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
3. มิลลิโอมิเตอร์
4. เตาให้ความร้อนแก่ฟิล์มบาง
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ Programmable controller ยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP 21
6. เทอร์โมมิเตอร์ Type K ยี่ห้อ DP-50A



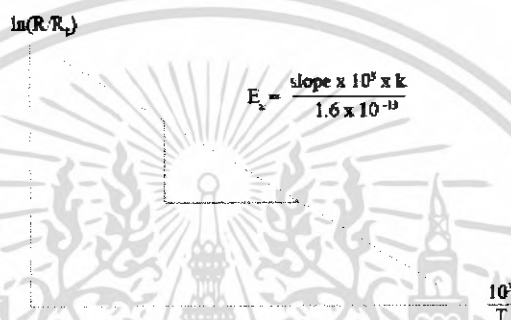
รูปที่ 3.5 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการจ่ายแรงดันให้กับวงจร แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อม R_2 (V_{R_2}) จะทำให้เราทราบค่า กระแสที่ไหลในวงจรได้ แล้วจะใช้ค่ากระแสที่นี้ทำการวัดค่าความต้านทานต่อไป

2. หลังจากนั้นปลดมิเตอร์ในข้อ1 ออกแล้วนำมาต่อเข้ากับ ฟิล์มเพื่อวัดความต่างศักย์ตกคร่อมฟิล์ม โดยขณะวัดจะทำการให้ความร้อนกับฟิล์มด้วยโดยทำการเปลี่ยนอุณหภูมิไปเรื่อย ๆ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟเป็นฟังก์ชันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$ กับ $\left(\frac{10^3}{T}\right)$ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น

หาค่าความต้านทานของฟิล์มบางจาก

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3.15)$$

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \left(\frac{E_a}{10^3 k}\right)\left(\frac{10^3}{T}\right) \quad (3.16)$$

$$\therefore E_a = \frac{\text{slope} \times 10^3 \times k}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

k = ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

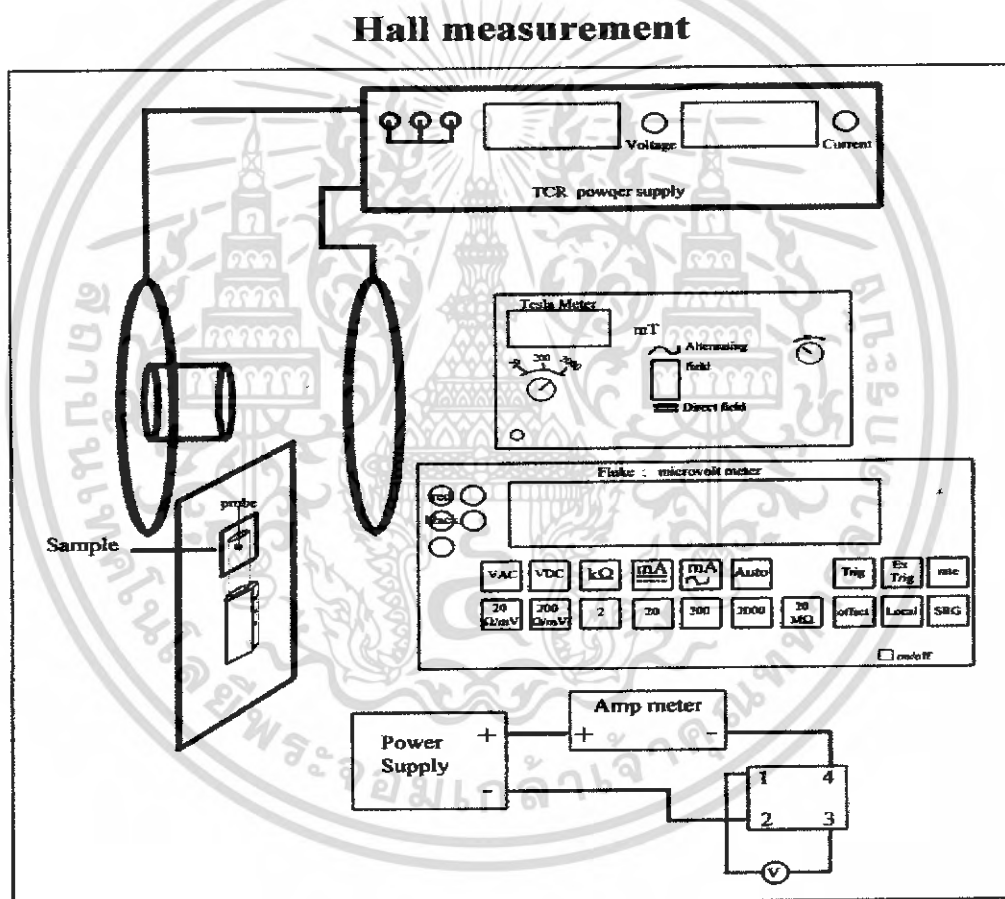
E_a = ค่าพลังงานกระตุ้น

R = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิใดๆ

R_0 = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิห้อง

T = อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเคลวิน

3.8 การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

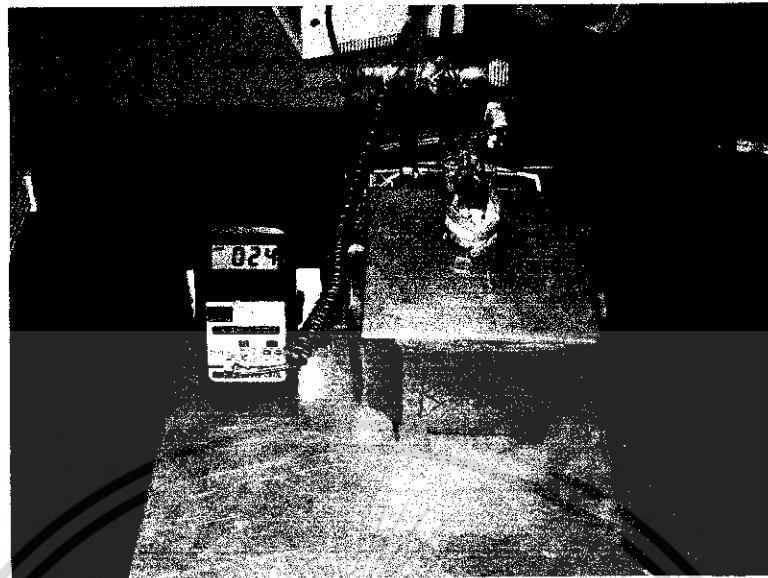
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1 อุปกรณ์

- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ
- มัลติมิเตอร์รุ่น 8842A ของบริษัท Fluke
- เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมหัววัดของ Phywe
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงค่าสูงของ Electronic Measurement Inc.
- มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic

3.8.2 วิธีการทดลอง

1. เปิดแหล่งจ่ายไฟให้หมุนปุ่มแรงดันไฟฟ้า ที่ค่ามากที่สุดและหมุน กระแสไปค่าน้อยสุด
2. เปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที
3. เมื่อทำการทดลองให้นำโพรบ และ แผ่นกระจกสไลด์เข้าไปแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้า สูงสุดเพื่อให้ได้สนามแม่เหล็กสูงสุด ให้มากกว่า 470 mT เพราะจะทำให้การวัด ตั้งแต่ 410-470 mT
4. ต่อดวงจรมีรูปที่ 3.7
5. จ่ายกระแสจาก แหล่งจ่ายไฟให้กับแผ่นกระจกสไลด์ คงที่ค่าหนึ่ง บันทึกค่า I_0 กับ V_0 แล้วจ่ายกระแสให้กับขดลวด
6. บันทึกผลการทดลอง

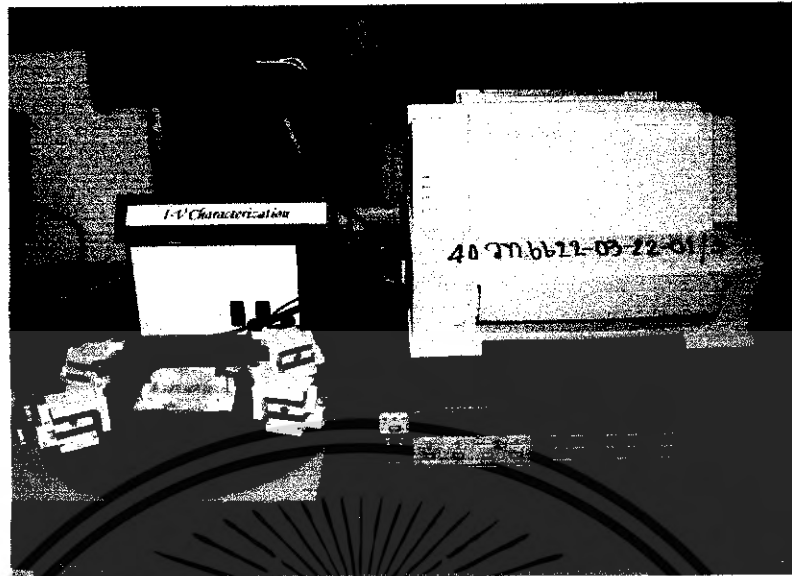


รูปที่ 3.8 แสดงชุดอุปกรณ์วัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องซังคิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์วัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น



รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์วัดค่าของซอลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

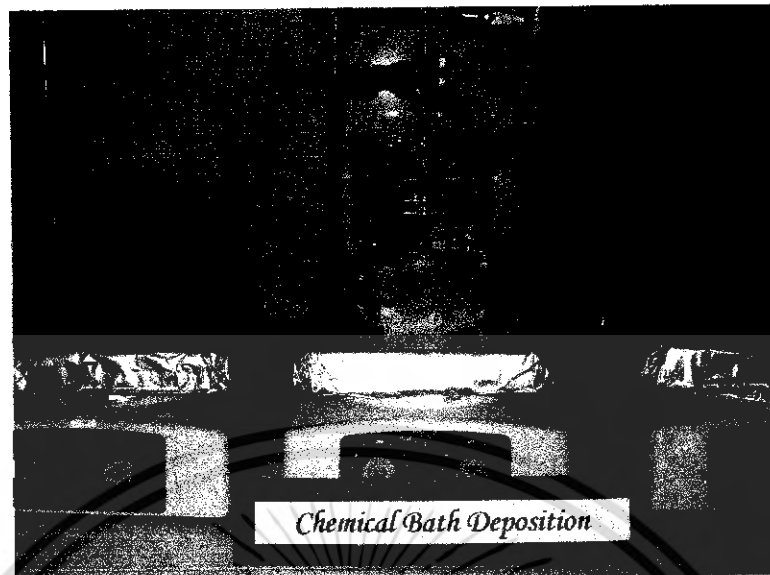


รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องส่งตัวอย่างด้วยอุตราไวซนิก

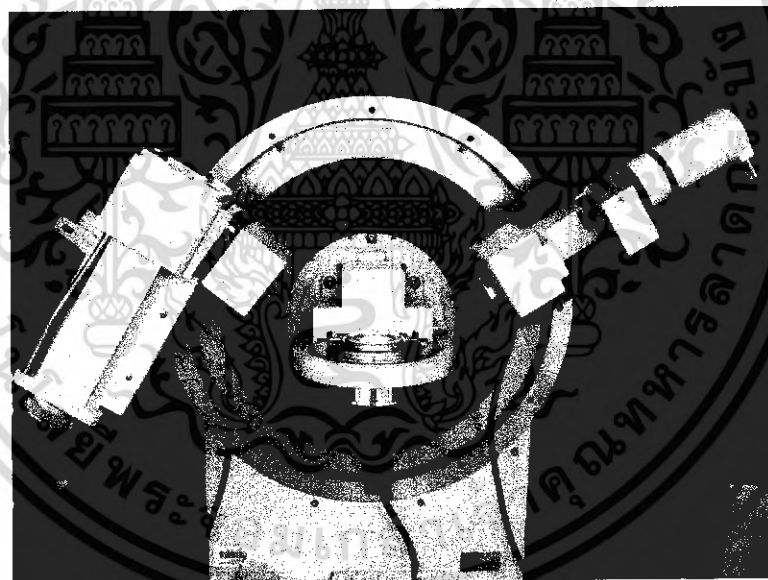


รูปที่ 3.13 แสดงเตาแอนนีลในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี



รูปที่ 3.15 แสดงเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

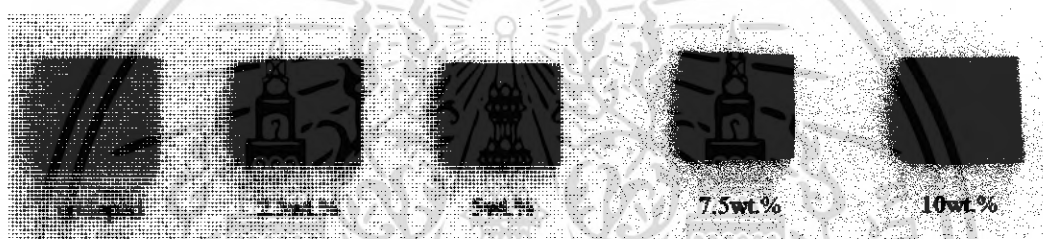
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 फिल्मบาง CdO:Al ที่เตรียมได้โดยวิธีอบสารละลายเคมี

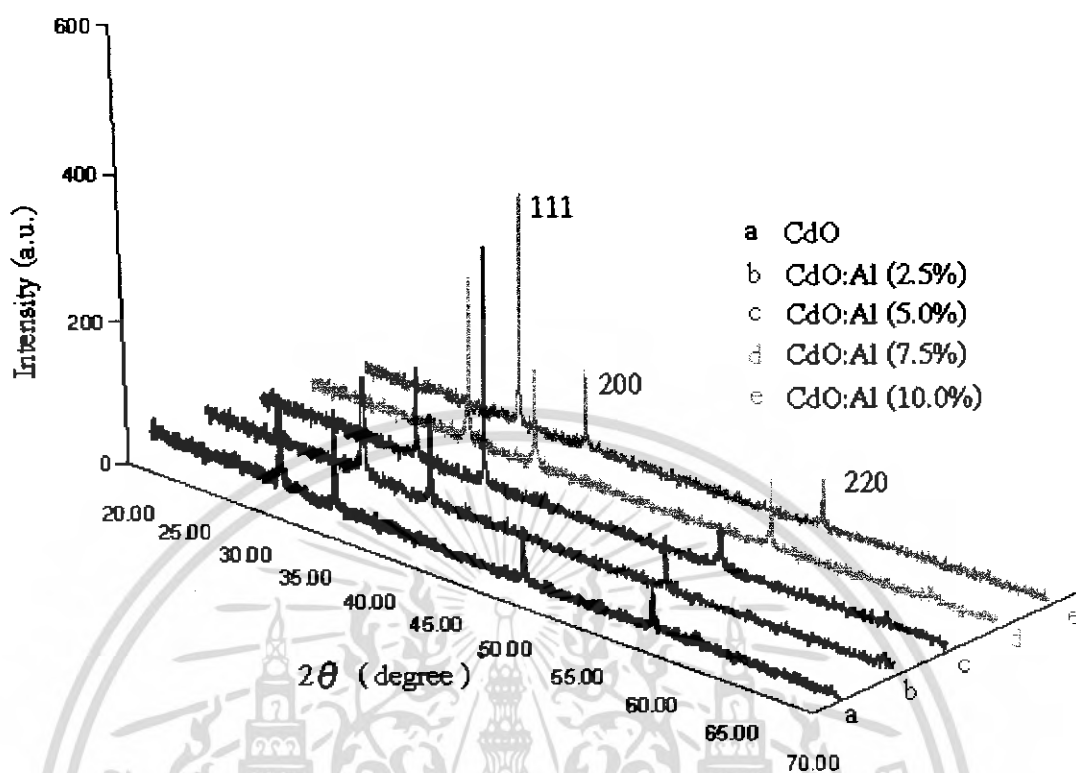
แผ่นฟิล์ม CdO ที่ไม่ได้เจือด้วยอลูมิเนียม (Al) จะมีสีน้ำตาลอ่อนแต่เมื่อทำการเจืออลูมิเนียม (Al) เข้าไปแล้วจะมีสีเหลืองเข้มขึ้นเมื่อเจือในสัดส่วนที่มากขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง พบว่าสารละลายที่ได้มีคุณสมบัติในการยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ง่ายขึ้น เพราะเกิดปฏิกิริยาโฮโมจีเนียส (homogeneous reaction) มากขึ้น ทำให้สารเป็นเนื้อเดียวกันและมีตะกอนลดลง



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง CdO:Al (%) ที่เตรียมได้โดยวิธีอบสารละลายเคมี

4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ของ CdO:Al (%) และต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อดูลักษณะของผลึกที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพิกมตรฐาน ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdO:Al (%)

จากรูปที่ 4.2 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้นจากผลการวิเคราะห์จะพบพีกหลัก 3 พีก คือ (111) , (200) และ (220) ซึ่งสามารถหาขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ขนาดของเกรน (grain size) [1,7,8,9]

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะเวลากว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

ความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain) [1,7,8,9]

$$\varepsilon = \beta_{2\theta} \cos \theta / 4 \quad (4.2)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดระดับจุลภาค

สำหรับการหาขนาดของ grain และ strain คือ

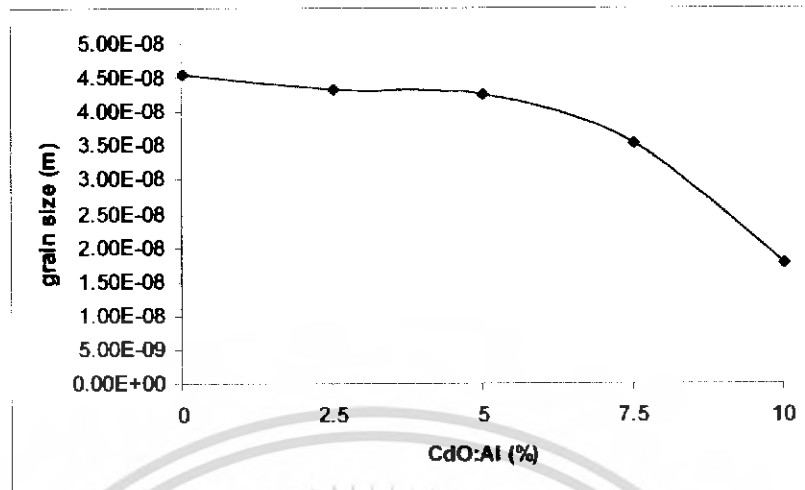
$$\beta_{2\theta} \cos \theta / \lambda = 1/L + \varepsilon \sin \theta / \lambda$$

เมื่อกำหนดค่าคงที่ของโครงผลึก และ ขนาดเกรนของฟิล์มบาง CdO:Al (%) แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก และ ขนาดของเกรน ของฟิล์มบาง CdO:Al (%)

CdO:Al (%)	a_0 (Å)	grain size (nm)
0.0%	4.660	45.50
2.5%	4.123	43.30
5.0%	3.956	42.60
7.5%	4.129	35.40
10.0%	3.956	17.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับ CdO:Al (%)

ผลการหาความชอบในการจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึกในบางทิศทาง (preferorientation) [1,7,8,9]

$$TC(hkl) = (I(hkl) / I_0(hkl)) / ((1/N) \sum (I(hkl) / I_0(hkl))) \quad (4.3)$$

เมื่อ TC(hkl) = ค่าสัมประสิทธิ์โครงสร้างผลึกในบางทิศทาง (texture coefficient)

I = ค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนจากฟิล์มบาง (measured intensity)

I_0 = ค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบฟิล์มบางจากฟิล์มบาง (JCPDS standard)

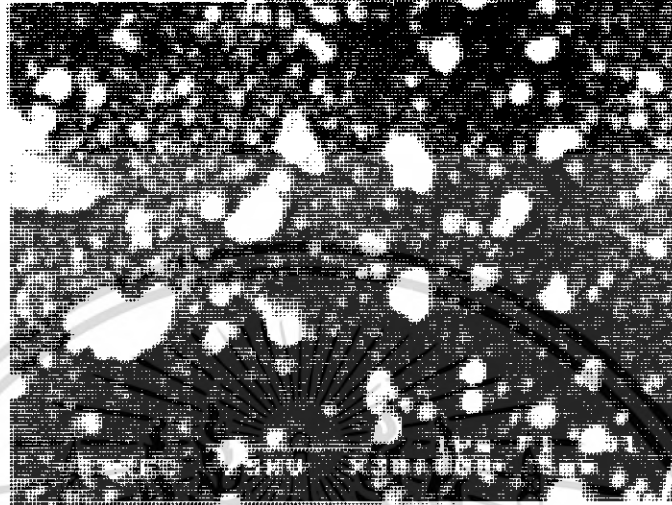
N = จำนวนรีฟเลกชันของฟิสิกการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (number of reflection)

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า TC(hkl) ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdO:Al (%)

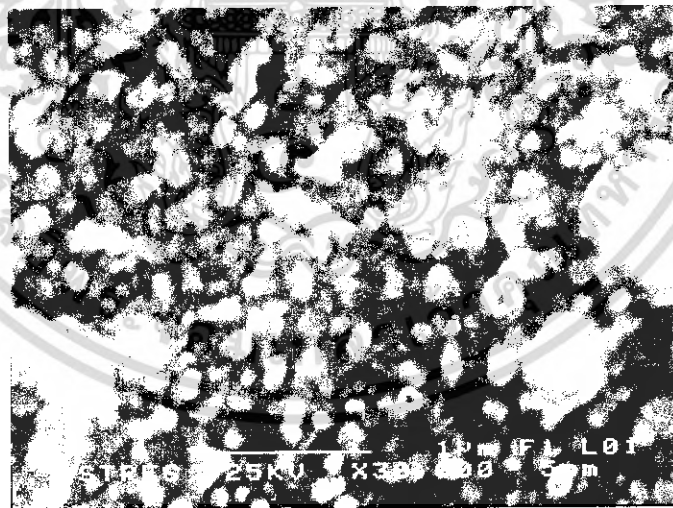
เปอร์เซ็นต์ของสารเจือ	TC(hkl)
0.0%	0.008
2.5%	0.009
5.0%	0.014
7.5%	0.012
10.0%	0.017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาลักษณะ ผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



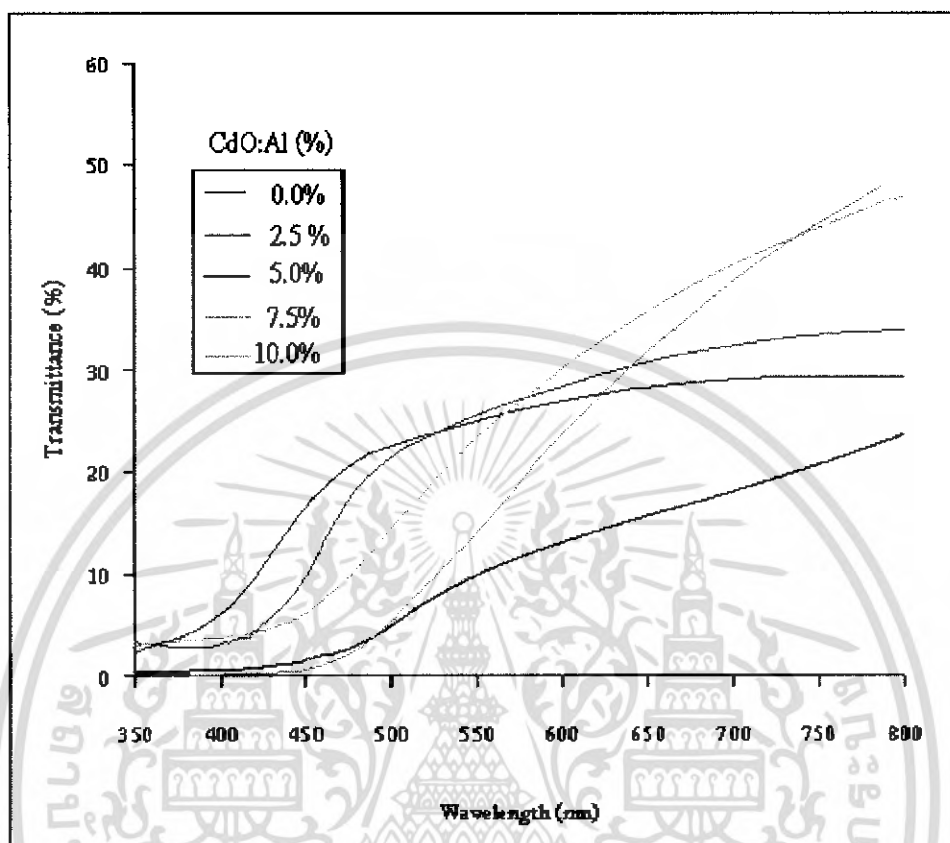
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง แสดงภาพถ่าย ผิวหน้าฟิล์มบาง CdO ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า เมื่อแอนนัลในอากาศ (in air) ที่อุณหภูมิ 350 °C โดยมีขนาดของเกรน อยู่ที่ 66 nm



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง แสดงภาพถ่าย ผิวหน้าฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า เมื่อแอนนัลในอากาศ (in air) ที่อุณหภูมิ 350 °C โดยมีขนาดของเกรนที่ 35 nm

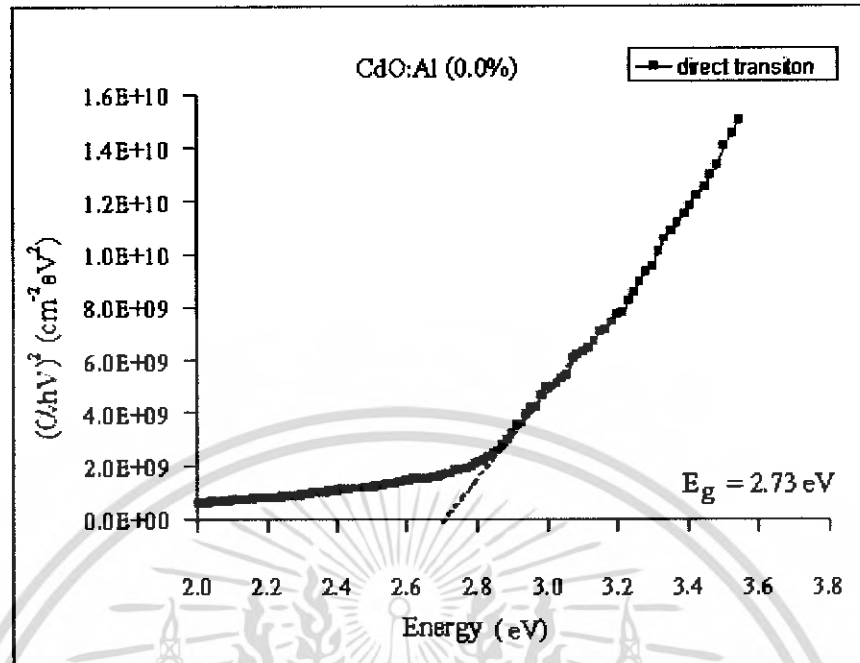
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdO:Al (%)

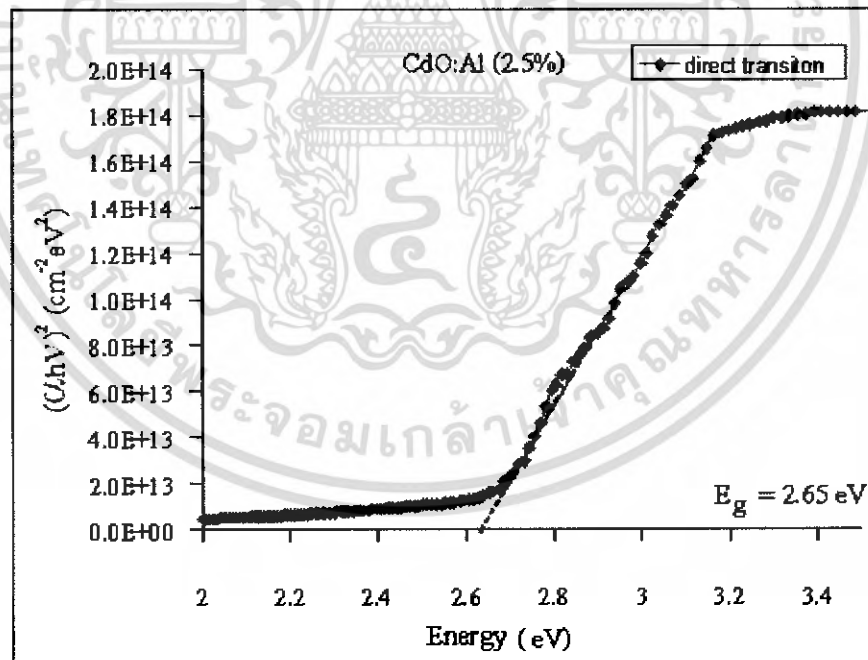


รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdO:Al (%) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ JASCO 7800 ที่ช่วงความยาวคลื่น 300 – 1000 นาโนเมตร เขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง CdO เจือด้วยอะตอมของธาตุอะลูมิเนียม (Al) เพื่อหาค่า E_g ดังรูปที่ 4.7

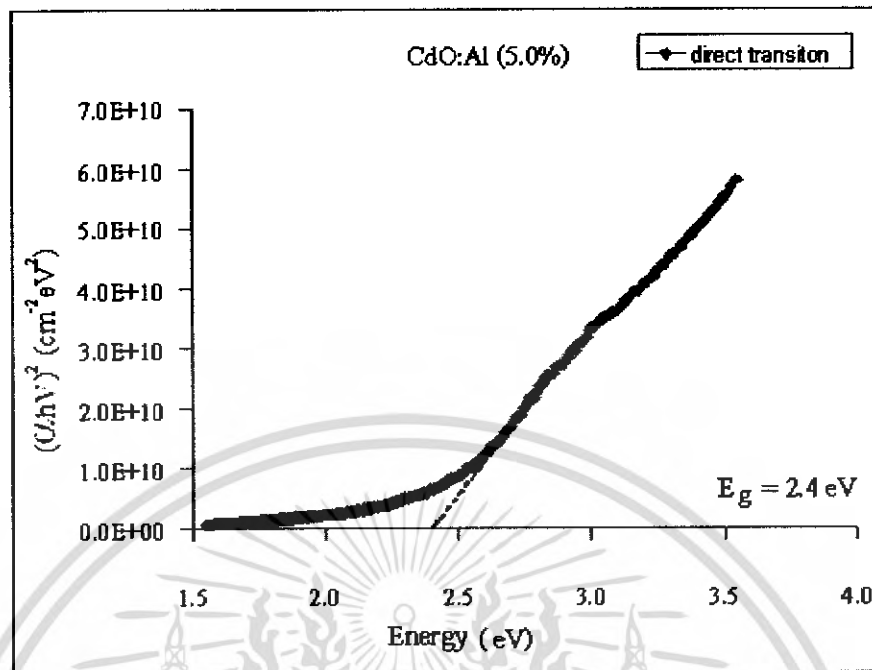


รูปที่ 4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO

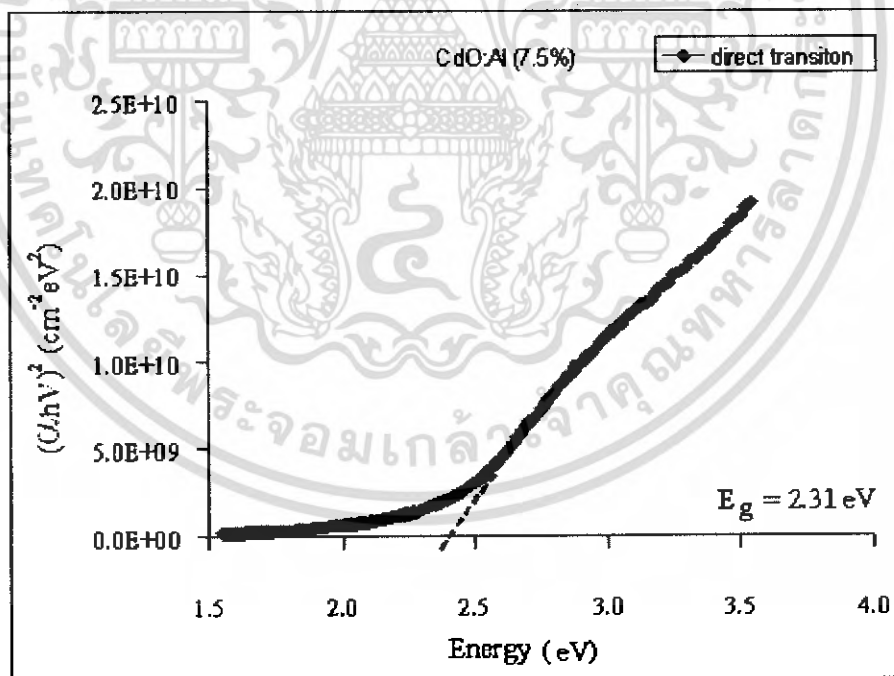


รูปที่ 4.8 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (2.5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

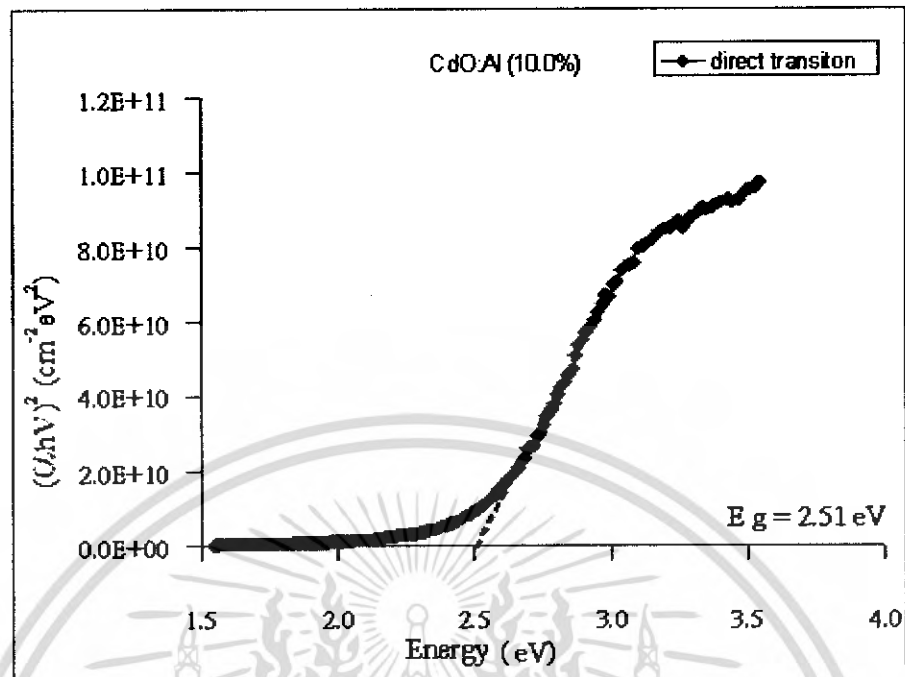


รูปที่ 4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (5.0%)

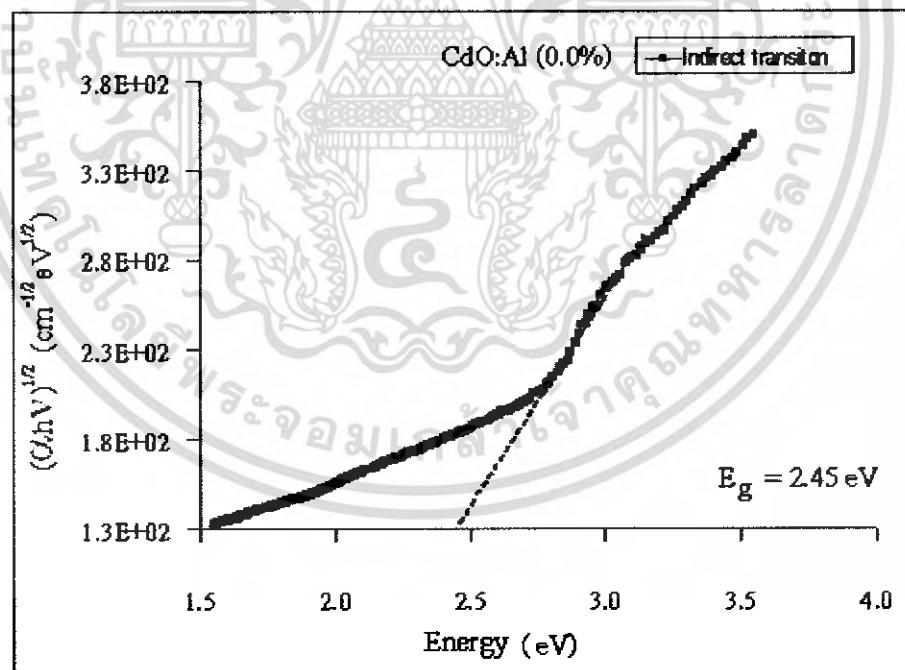


รูปที่ 4.10 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

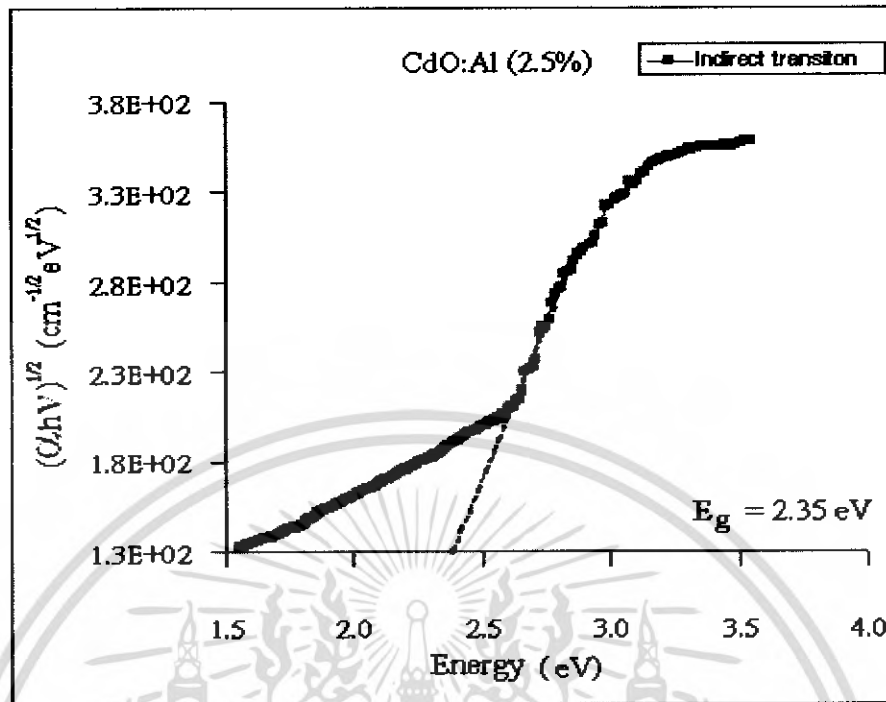


รูปที่ 4.11 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง CdO:Al (10.0%)

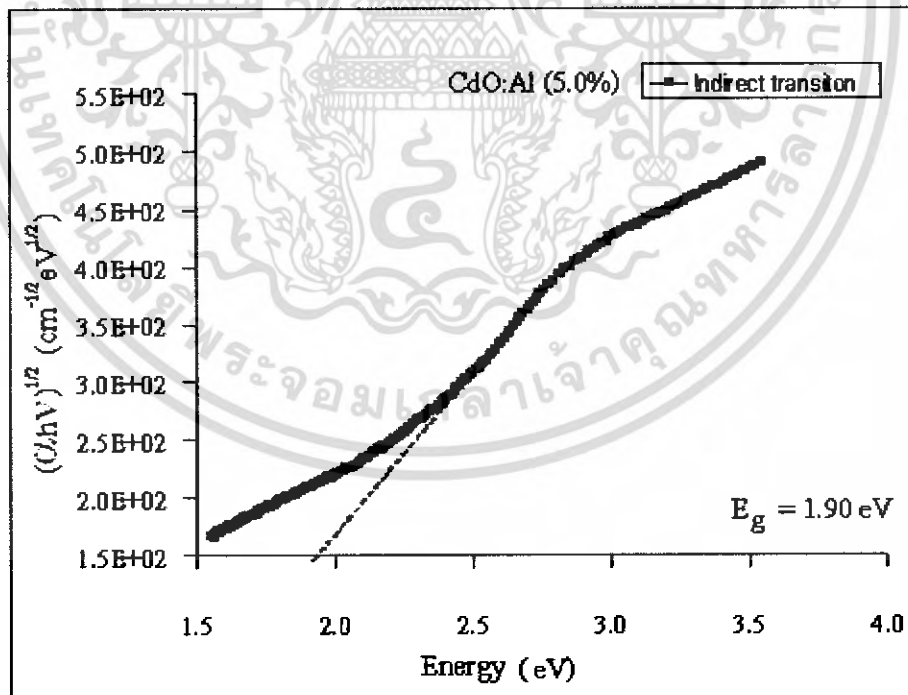


รูปที่ 4.12 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

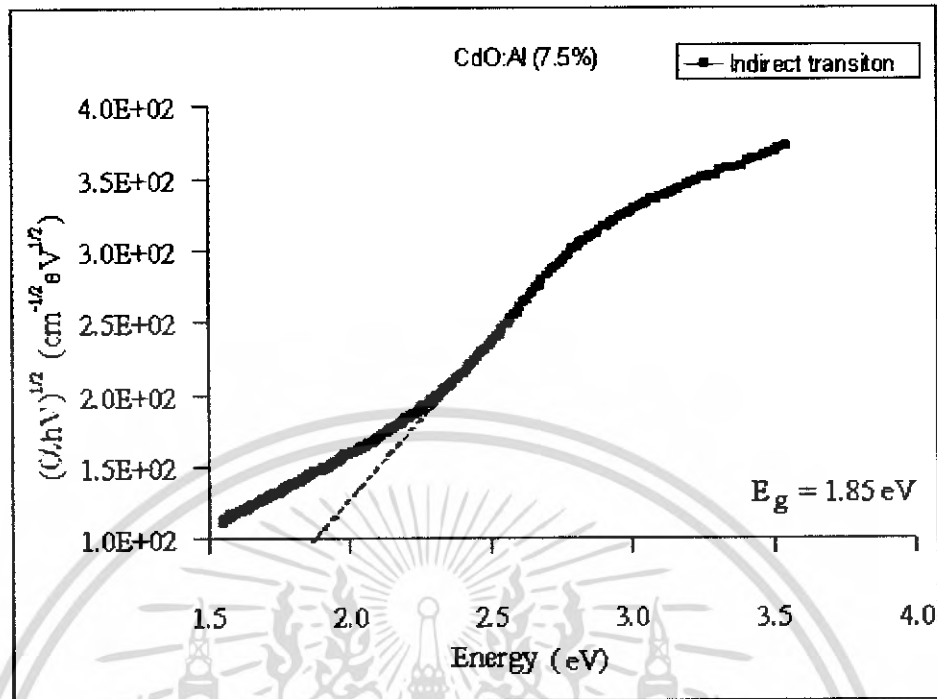


รูปที่ 4.13 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบอ้อมของฟิล์มบาง CdO:Al (2.5%)

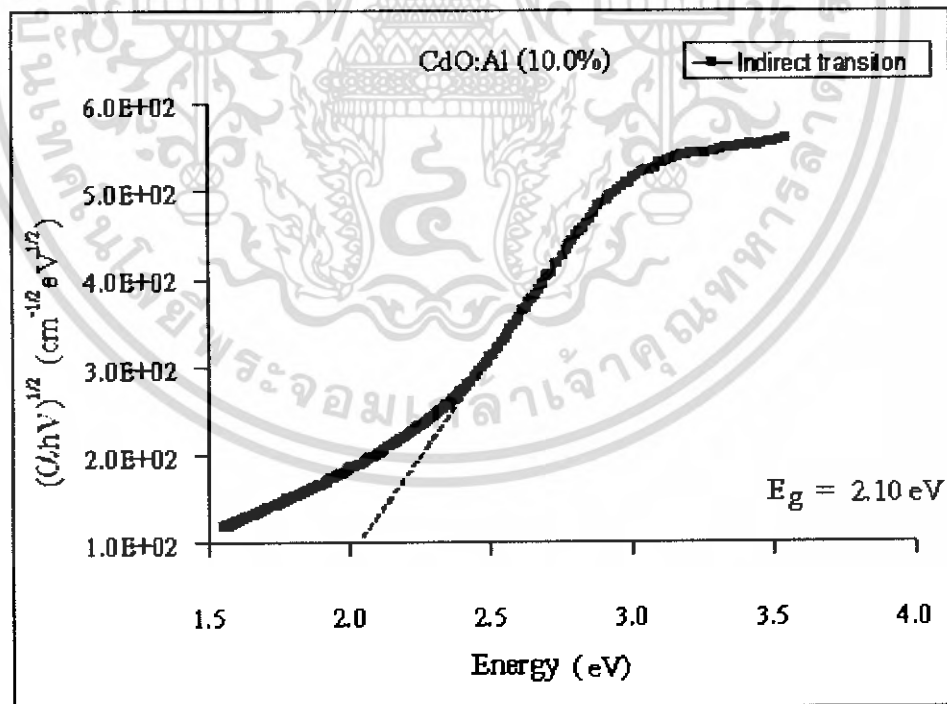


รูปที่ 4.14 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบอ้อมของฟิล์มบาง CdO:Al (5.0%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบอ้อมของฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%)



รูปที่ 4.16 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบอ้อมของฟิล์มบาง CdO:Al (10.0%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

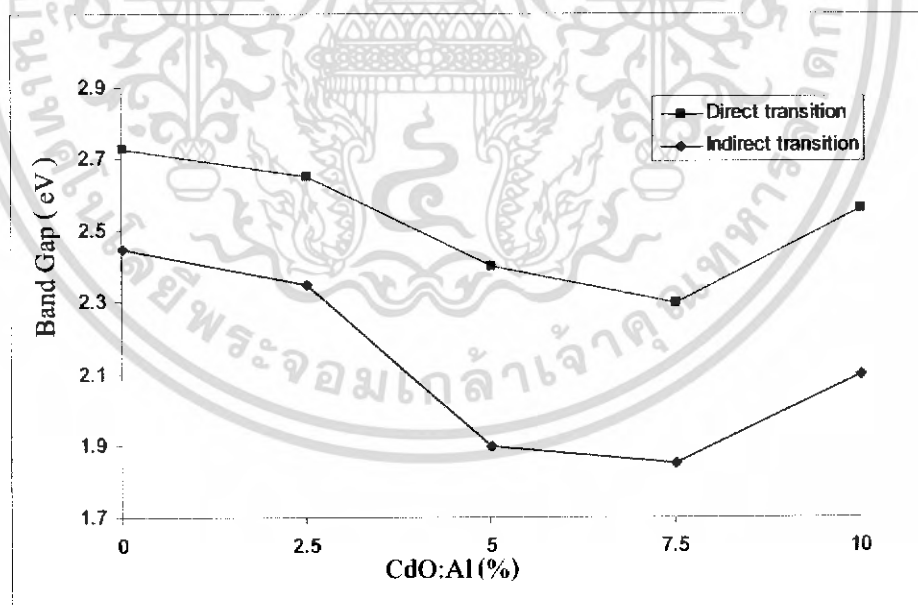
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียง: E_g (eV) ของฟิล์มบาง CdO:Al (%)

ปริมาณของสารเจือ CdO:Al (%)	ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน: E_g (eV)	
	Indirect gap	Direct gap
0.0	2.45	2.73
2.5	2.35	2.65
5.0	1.90	2.40
7.5	1.85	2.30
10.0	2.10	2.56

สามารถหาค่าพารามิเตอร์โบว์ริงได้จากสมการ [1,7,8]

$$E_g(x) = E_g(\text{CdO}) + E_g(\text{CdO}) - E_g(\text{CdO}) - b)x + bx^2 \quad (4.4)$$

เมื่อ $E_g(\text{CdO})$ และ b คือค่า พารามิเตอร์โบว์ริง (bowing parameter) ค่าบนเส้นทึบแสดงให้เห็นค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากการทดลองสำหรับฟิล์มบาง CdO



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียงของฟิล์มบาง CdO:Al (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdO:Al

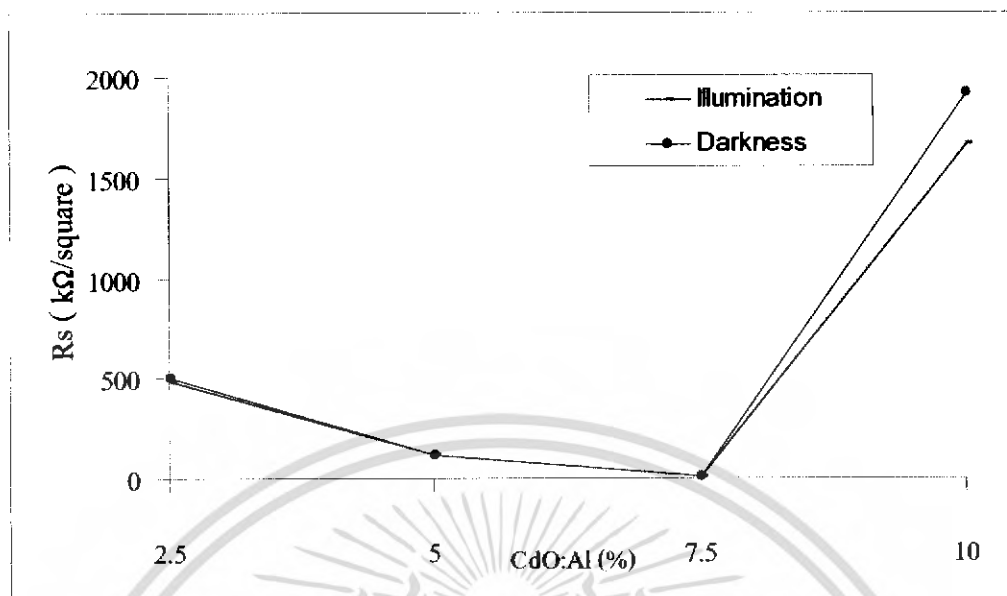
ทำการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdO เจือด้วยอะตอมของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือค่าต่างๆในกรณีไม่มีการฉายแสง เมื่อมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH จะทำให้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และจะส่งผลให้ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdO:Al มีความต้านทานแผ่นที่ลดลง แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงความต้านทานแผ่นในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงของฟิล์ม CdO:Al (%)

CdO:Al (%)	R_s (Ω /square)		
	Darkness	Illumination	การตอบสนองต่อแสง
0.0%	1776×10^6	1588×10^6	1.12
2.5%	500.00	482.00	1.03
5.0%	115.00	112.00	1.02
7.5%	6.68	5.58	1.19
10.0%	1914.00	1661.00	1.15

4.6 ความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

จากตารางที่ 4.4 การวัดค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdO เจือด้วยอะตอมของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือค่าต่างๆ สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ดังรูปที่ 4.18

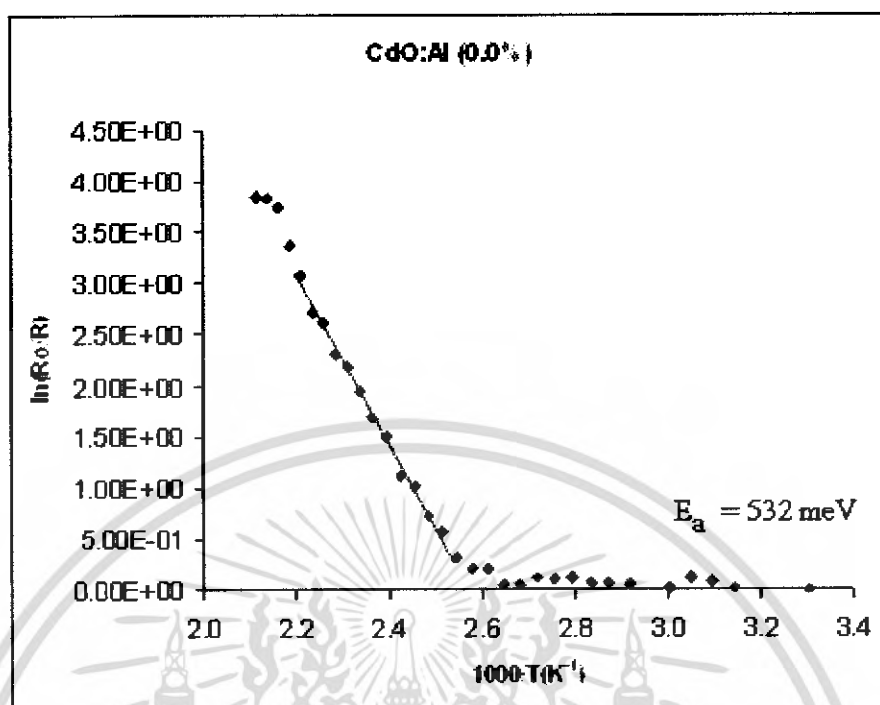


รูปที่ 4.18 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางฟิล์มบาง CdO:Al (%) ในกรณีไม่ฉายแสง และมีการฉายแสง

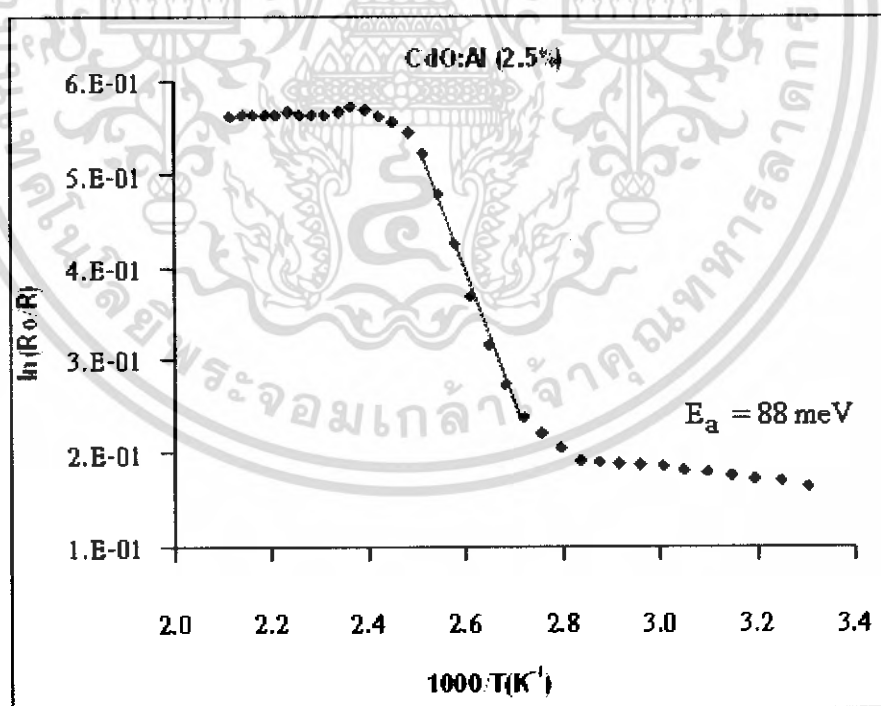
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของรูปที่ 4.18 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdO:Al (%) ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

CdO:Al (%)	Activation Energy (meV)
	E_a
0.0%	532
2.5%	88
5.0%	79
7.5%	62
10.0%	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

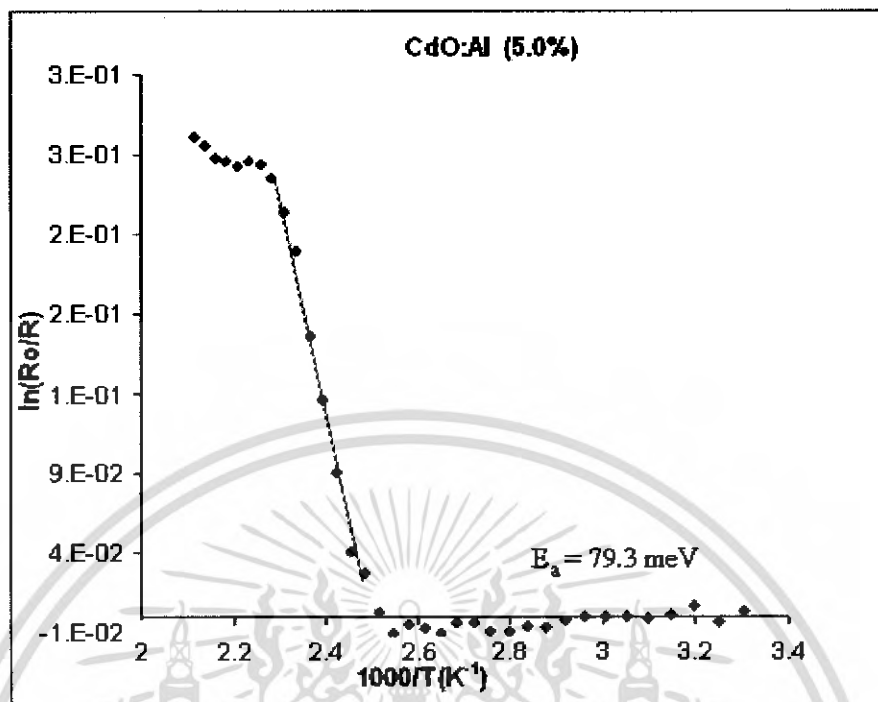


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบางฟิล์มบาง CdO:Al (0.0%)

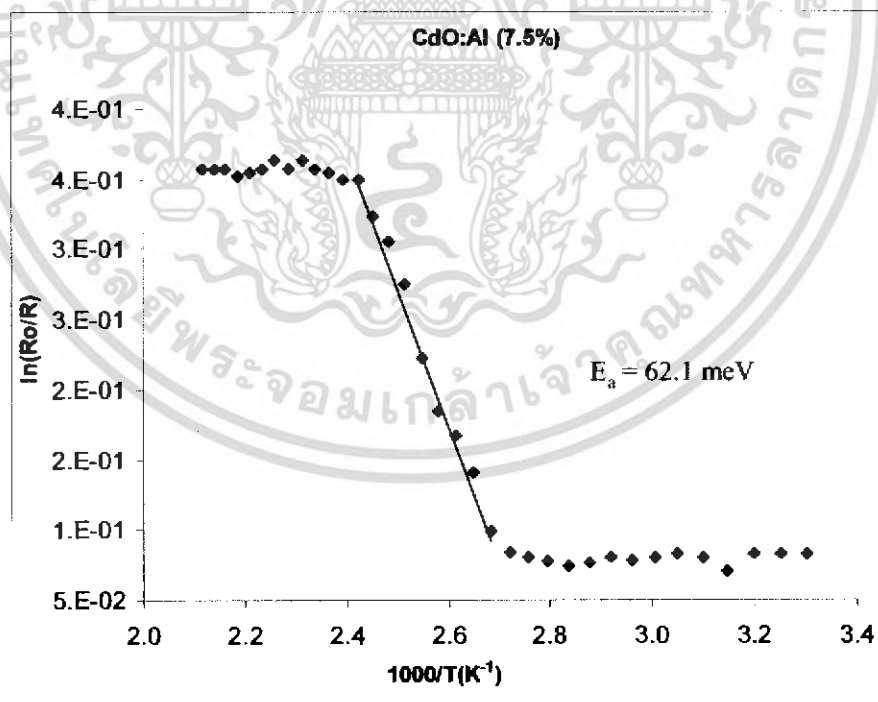


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบางฟิล์มบาง CdO:Al (2.5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

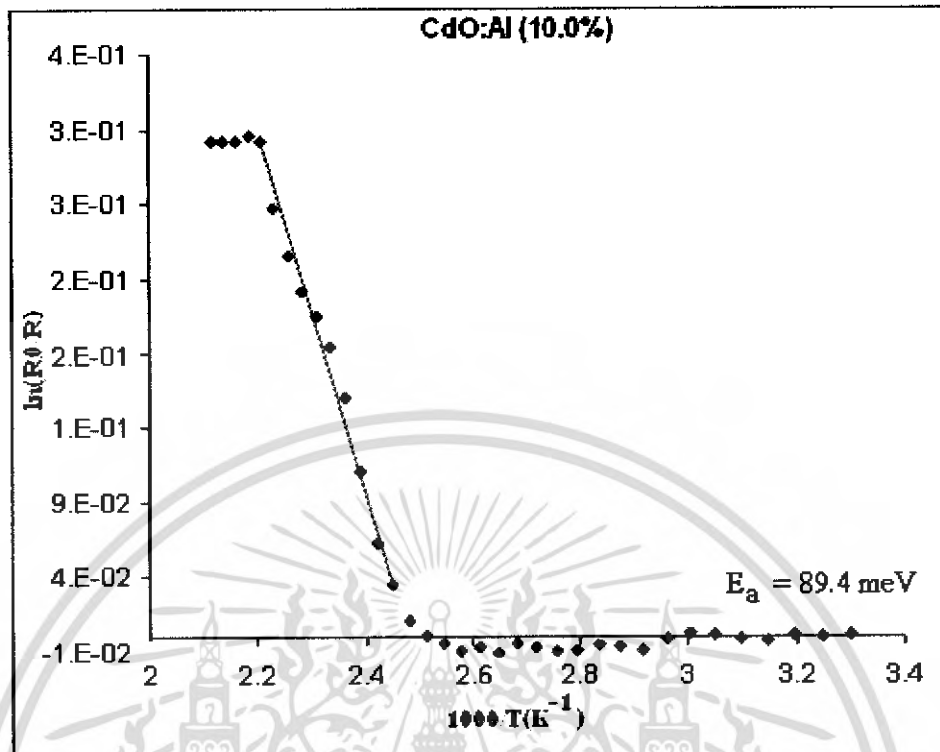


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_o/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (5.0%)



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_o/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (7.5%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

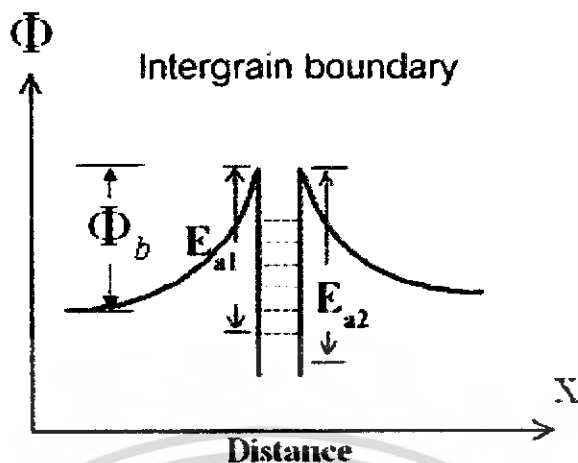


รูปที่ 4.23 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบาง ฟิล์มบาง CdO:Al (10.0%)

อธิบายได้ว่า เมื่อ E_g มีค่าเดียว เป็นค่าพลังงานที่บริเวณขอบของเกรน เมื่อเกรนเล็กลง ค่าของค่าพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า อธิบายได้จากสมการที่ 4.5

$$\sigma = AT^{-\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (4.5)$$

เมื่ออุณหภูมิมีค่ามากขึ้น ค่าพลังงานจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นแต่เมื่อ E_g มีมากกว่า 1 ค่า อธิบายว่าอาจเกิดจากการที่มีระดับพลังงานย่อยตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนถูกจับไว้โดยกับดัก ซึ่งระดับพลังงานย่อยนี้มีอยู่สองระดับ ดังนั้นเมื่อเราให้พลังงานความร้อนแก่ฟิล์มบางอิเล็กตรอนสามารถกลับขึ้นมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.24 แผนภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง CdO:Al ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ ϕ_b คือความสูงของกำแพงศักย์ และ x คือระยะทาง

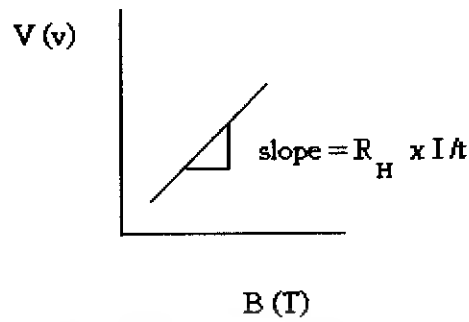
4.7 การวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ [1,5,7,8]

การวัดสามารถทำได้อย่างแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วไฟฟ้าสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

จาก
$$\therefore R_H = \frac{V_H t}{IB_z} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (4.7)$$

จากการทดลอง จำยกระแสคงที่และวัดความต่างศักย์ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V และ B ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับสนามแม่เหล็ก

t คือ ความหนาของฟิล์มบาง

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มบาง

สามารถหาค่า μ_H สภาพคล่องฮอลล์ (mobility) , n ปริมาณพาหะข้างมาก (carrier concentration) และ R_H สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) ได้จากสมการ

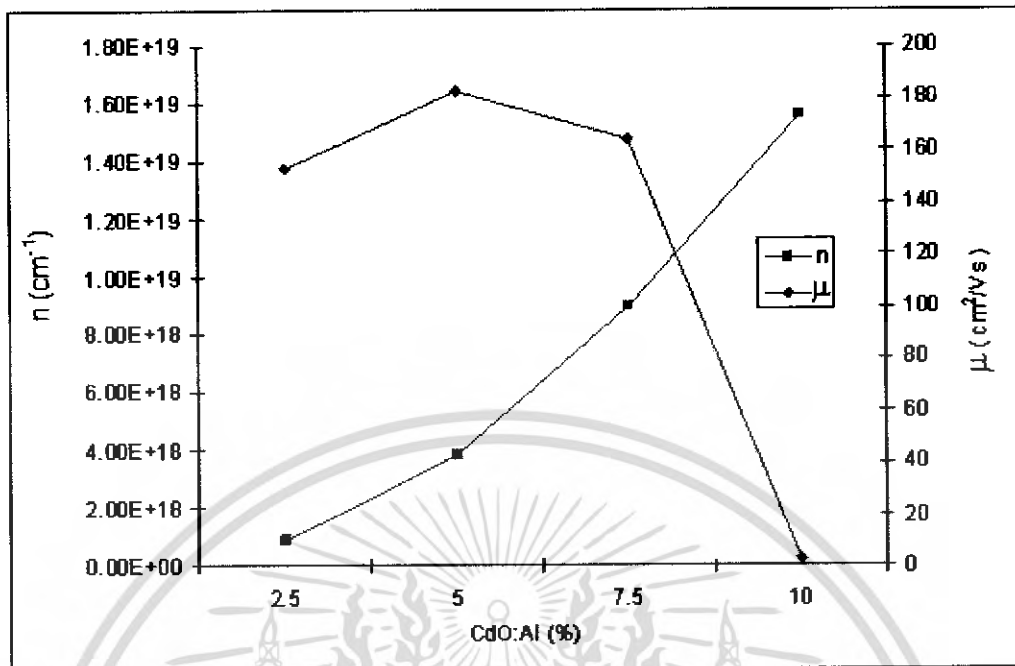
$$R_H = 1/nq \quad (4.8)$$

$$\mu_H = |R_H| \sigma \quad (\text{m}^2(\text{V.s})^{-1}) \quad (4.9)$$

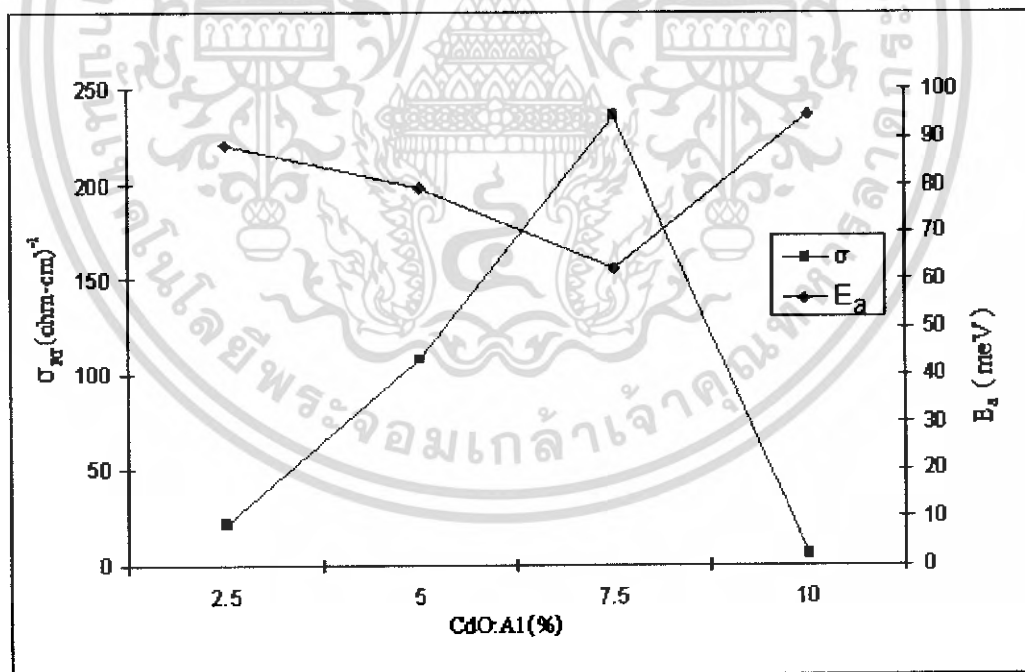
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdO:Al (%) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

CdO:Al (%)	μ_H (cm^2/Vs)	n (cm^{-3})	ρ
2.5	153.00	8.66×10^{17}	4.73×10^{-2}
5.0	182.00	3.81×10^{18}	9.23×10^{-3}
7.5	164.00	8.98×10^{18}	4.25×10^{-3}
10.0	2.79	1.56×10^{19}	1.72×10^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า สภาพคล่องฮอลล์ และปริมาณพาหะข้างมากของฟิล์มบาง CdO:Al (%)



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกระตุ้นกับสารเจือที่อุณหภูมิต่างๆกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษนี้ เป็นการประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO:Al (%) โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี เตรียมโดยใช้สารตั้งต้น แคลเมียมอะซิเตตไดไฮเดรต ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.3M นำมาละลายในไอโซ-โพรพิลแอลกอฮอล์ ($\text{CH}_3\text{CHCH}_3\text{OH}$) โดยทำการกวนด้วยเครื่องกวนสาร และผสมอะลูมิเนียมไนเตรด ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) เพื่อทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ที่อัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของสารเจือ ค่าต่างๆ ค่า pH ของสารละลายจะถูกควบคุมอยู่ที่ประมาณ 4 โดยเติมกรดอะซิติก (99.95% CH_3COOH) อย่างเหมาะสมสารละลายจะถูกทำการกวนด้วยเครื่องกวนสาร โดยทำการกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ และให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 55°C ทำการอบสารละลายเคมีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 40 นาที นำฟิล์มบางที่ได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 350°C ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จะได้ฟิล์มที่มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแกมเหลือง ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางมีความเรียบสม่ำเสมอไม่หลุดลอกออกง่าย

หลังจากขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางจะบ่งชี้ลักษณะพิเศษด้วยเทคนิคที่หลากหลายลักษณะของโครงสร้างจะถูกทำให้กระจ่างด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในการศึกษาทางแสงจะทำโดยการวัดความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วง 300-800 nm โดยใช้เครื่อง UV-VIS- Spectrophotometer คุณสมบัติทางด้านการนำไฟฟ้าจะถูกวัดด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น โดยใช้ แหล่งกำเนิดกระแสแสงที่ (Keithley รุ่น 326) ค่าพาหะประจุข้างมาก, สภาพคล่องพาหะ, ชนิดของพาหะประจุนับได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์

ผลการวิเคราะห์ห้องประกอบ

เมื่อศึกษาโครงสร้างผลึกทางจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง สังเกตพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ face-centered cubic (fcc) ปรากฏพิค ระนาบการเลี้ยวเบนที่ (111) , (200) และ (220) จากการเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนมีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ CdO (JCPDS 75-591) จึงแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวของผลึกที่ดี

ผลการศึกษามบติทางแสง

เมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาการส่องผ่านแสง พบว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของสารเจือ โดยมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วง 10-65% ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปอาจเกิดจากสาเหตุดังนี้

ก. แถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน

ข. ดิสออร์เดอร์ (disorder) ซึ่งมีสาเหตุมาจากอะตอมต่างๆอยู่ผิดตำแหน่ง ส่งผลให้เกิดส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail)

ค. ผลของขนาดของควอนตัม (quantum size effect) หรือขนาดของเกรน

พบที่ขนาดช่องว่างแถบพลังงานแถบตรงมีค่าในช่วง 2.3-2.7 eV และที่เปอร์เซ็นต์การเจือที่ 7.5% มีค่าแถบพลังงานช่องว่างน้อยที่สุดที่ 2.3 eV เนื่องจากฟิล์มบางมีขนาดของเกรนใหญ่ผลของขนาดควอนตัมไม่ปรากฏออกมาให้เห็น จึงเป็นไปตามเหตุผลดังข้อ ก. นอกจากนั้นขนาดช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงมีค่าอยู่ในช่วง 1.85-2.45 eV และที่เปอร์เซ็นต์การเจือที่ 7.5% มีค่าแถบพลังงานช่องว่างน้อยที่สุดที่ 1.85 eV จึงเป็นไปตามเหตุผลดังข้อ ค. เช่นกัน

ผลการศึกษามบติทางไฟฟ้า

ผลการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น พบว่าเมื่อทำการเจือมากขึ้นแนวโน้มของความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มที่จะลดลงจนถึง เปอร์เซ็นต์การเจือที่ 10% มีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้คือ การที่อะตอมอยู่ผิดที่ แวแกนซีของอะตอม และผลของควอนตัมและขนาดของเกรนถ้าเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนของเขตของเกรนจะลดลงทำให้อิเล็กตรอนและโฮลไหลได้สะดวกขึ้น เป็นต้น

ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางจะมีค่าลดลง เมื่อมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนแสดงว่าพาหะอิสระซึ่งในที่นี้คืออิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีแสงมากระตุ้นให้หลุดออกจากกับดักอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามการตอบสนองต่อแสงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อทำการเจือที่ 7.5% ส่วนหางของแถบพลังงานมากขึ้นทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจากกับดักอิเล็กตรอน (ซึ่งเป็นระดับพลังงานลึก) เคลื่อนย้ายไปในแถบนำได้มากขึ้น

ผลจากความวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่างๆพบว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) ของฟิล์ม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนของสารเจือแตกต่างกัน สามารถวัดที่อุณหภูมิในช่วง 303-473 K เขียนกราฟระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $1000 / T$ ที่ เปอร์เซ็นต์การเจือค่าต่างๆ พบว่าค่า พลังงานกระตุ้น (E_g) จะอยู่ในช่วง 532 - 62.1 meV พบว่าฟิล์มบาง CdO ที่ไม่ได้ทำการเจือ จะมีค่า E_g สูงที่สุดและเมื่อทำการเจือ Al เข้าไปแล้วจะมีค่า E_g ลดลง โดยอัตราส่วนการเจือที่ 7.5 % จะมีค่า E_g น้อยที่สุด และ E_g มีค่าสูงขึ้นที่อัตราส่วนการเจือ 10 % โดยค่า E_g นั้นจะแปรผกผันกับค่า สภาพนำไฟฟ้าอธิบายได้จาก การเพิ่มพาหะ

ประจุอิสระของ CdO เมื่อ ทำการเจือด้วยอะตอมของ Al เพราะ Al มีอิเล็กตรอนวงนอกมากกว่า Cd อยู่ 1 ตัว เมื่อ Al เข้าไปแทนที่ Cd หรือเข้าไปแทนที่ช่องว่างในโครงผลึก ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ Al จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังนั้นค่า E_g จะมีค่าน้อย แต่เมื่อใดที่ทำกรเจืออะตอมของ Al มากเกินไปจะทำให้ไปทำลายโครงผลึกได้เพราะ เป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระทำให้สภาพนำไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้ค่า E_g มีค่าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง CdO เมื่อ ทำการเจือด้วยอะตอมของ Al ที่ค่าต่างๆ พบว่ามีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n จากผลการวัดสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถคำนวณหาค่าพาหะประจุข้างมากได้จากสมการระหว่าง $R_H = 1/ne$ ซึ่ง e คือประจุของอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องฮอลล์ ของความหนาแน่นพาหะ (n) จะถูกคำนวณจากความสัมพันธ์ $\mu = \sigma/ne$ เมื่อทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของอะตอมของสารเจือ Al พาหะประจุข้างมากจะมีค่าเพิ่มขึ้นและถ้าเปอร์เซ็นต์ของการเจือมีค่าน้อยอัตราการเพิ่มของพาหะประจุข้างน้อยลงด้วย จึงเป็นเหตุให้การเจืออะตอม Al ที่ 10% มีค่าพาหะประจุข้างมากมากที่สุดแต่จะมีค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ) น้อยที่สุดเนื่องจากทำการเจืออะตอม Al มากเกินไป ทำให้พาหะประจุเกิดความหนาแน่นเกินไปจึงเกิดการกระเจิงกันของพาหะประจุส่งผลให้สภาพคล่องการไหลของพาหะประจุลดลง และที่การเจืออะตอมของ Al ที่ 5% มีค่า μ มากที่สุด เนื่องจากทำการเจือในอัตราส่วนที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไข

1. ในการเตรียมฟิล์มบาง CdO:Al ด้วยวิธีการอบสารละลายสารเคมี สารละลายเคมี CdO:Al ที่ได้อยู่ในกลุ่มของโลหะแอลกอฮอล์ (metal alkoxide) ซึ่งเป็นสารประเภทเจต จึงมีการปรับประยุกต์การเกิดปฏิกิริยาเคมีให้เหมาะสมกับกรรมวิธีการประดิษฐ์ฟิล์มบาง โดยการควบคุมค่า pH และ อุณหภูมิ
2. ในการเตรียมฟิล์มบาง CdO:Al ด้วยวิธีการอบสารละลายสารเคมี ความเข้มข้นของสารตั้งต้น , อัตราการเกิดปฏิกิริยา , ความหนาของฟิล์ม , ผลของการแอนนีสในบรรยากาศของก๊าซอื่นๆ , เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีส เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางควรทำการวิจัยและศึกษาคต่อไป
3. การเตรียมฟิล์มบางที่ได้จากอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 350°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที ควรมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของฐานรองรับที่เปลี่ยนไปด้วย
4. เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางเรียบร้อยแล้วควรนำไปศึกษาและคุณสมบัติอย่างรวดเร็ว หรือก่อนนำไปศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง ควรเก็บฟิล์มบางไว้อย่างมิดชิด ป้องกันอุณหภูมิ ความชื้น และการทำปฏิกิริยากับอากาศที่อาจมีผลทำให้คุณสมบัติของฟิล์มบางเปลี่ยนไป

เอกสารอ้างอิง

1. งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. Yakup Hames. , S. Eren San b. “ CdO/Cu2O solar cells by chemical deposition ” *SolarEnergy* . 77 (2004): 291–294
3. Dewei Ma , Zhizhen Ye, Lei Wang , Jingyun Huang ,Binghui Zhao “ Deposition and characteristics of CdO films with absolutely (200)-preferred orientation ” *Materials Letters* .58 (2003): 128-131
4. R. Maity, K.K. Chattopadhyay “Synthesis and characterization of aluminum-doped CdO thin films by sol-gel process” *Solar Energy Materials & Solar Cells* . 81 (2004) :279–289
5. Kittel,C. 1971. **Introduction of Solid State Physics**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc.:pp 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
6. www.webelement.com
7. จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
8. จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
9. Cullity,B.D. 1956. **Elements of X-rays Diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company Inc.:pp 9-14.; Kittel, 1971
10. สิงหเดช แดงจวง. 2539. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. Abelas, F., in **Optical of Solids** PP.23-40, North-Holland, London, 1972
12. อารีย์ วิเชียรฉาย. 2543. **เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ**. เอกสารประกอบการเรียน. คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrumentation**. New York.:Mc-GrawHill:Bombary.
14. Gacia-Cuencu, M.V.; Morenza, J.L.; Bertran, E. and Lousa, A. 1987. Electrical condition in polycrystalline CdS films:II. Comparison of theory and experiment. **J.Phys.D:Appl.Phys.** 20:958- 962.
15. Garadkar, K.M.; Hankare, P.P. and Patil R.K. 1999. Effect of indium doping on structural, optical and electrical properties of $Cd_{0.95}Hg_{0.05}S$ thin films. **Mater.Chem.Phys.** 58.:64-70.
16. Ramaiah, K.S. 1999. Electrical properties of indium doped CdS thin films. **J.Mater.Sci.Mater.Elec.** 10:291-294.
17. Suhas Bhandarkar. Sol-Gel processing for Optical Comunication Technology. **J.Am.Ceram.Soc.** 87[7] 1180-1199 (2004)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

Pattern : 78-653		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Cd O		2 θ	I	h	k	l
		32.803	100	1	1	1
		38.059	86	2	0	0
Cadmium Oxide		54.917	46	2	2	0
		65.462	29	3	1	1
		68.788	13	2	2	2
		81.401	5	4	0	0
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 128.41				
S.G. : Fm3m (225)		Volume [CD] = 105.49				
a = 4.72500		Dx = 8.085				
Z = 4		Mcor = 10.97				
Pattern : 75-591		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Cd O		2 θ	I	h	k	l
		33.020	100	1	1	1
		38.313	84	2	0	0
Cadmium Oxide		55.300	45	2	2	0
		65.936	28	3	1	1
		69.273	12	2	2	2
		82.036	5	4	0	0
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 128.41				
S.G. : Fm3m (225)		Volume [CD] = 103.48				
a = 4.69485		Dx = 8.242				
Z = 4		Mcor = 10.98				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชินรัตน์ อ่อนหวาน เกิดเมื่อ 4 ตุลาคม พ.ศ.2525 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสตรีรัตนบุรี และได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมในปีการศึกษา 2545

นายศรุต ไพโหล เกิดเมื่อ 8 มิถุนายน พ.ศ.2525 เป็นคนสกลนครโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสกราชวิทยานุกูล และได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมในปีการศึกษา 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้