

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี



เลขานุ.....  
เลขทะเบียน.....**62303**  
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ส.ค. 2549

b.....	11620080
i.....	

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Preparation of CdS Thin Films by  
Dip Coating Method**



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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี	
นักศึกษา	นายปิยะพล	รงค์วิไล
	นายปฐมพล	กิตติวงษ์ชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ชูตินัย แก้วแดง	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ	

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อ. สุรศักดิ์	พิพัฒนศาสตร์	 อ. สุรศักดิ์ พิพัฒนศาสตร์
กรรมการ	อ. ศ.ทิพวรรณ	คล้ายบุญมี	
กรรมการ	รศ. จามนิตย์	วงษ์เจริญ	 รศ. จามนิตย์ วงษ์เจริญ
กรรมการที่ปรึกษา	รศ. ชูตินัย	แก้วแดง	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	 ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)  
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี	
นักศึกษา	นายปิยะพล	รงควิไลต
	นายปฐมพล	กิตติวัจชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ฐิตินัย	แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ชัยสิงห์	ภูริภรณ์เกียรติ

บทคัดย่อ

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้เจืออะลูมิเนียมและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่ความเข้มข้น 10 และ 20% โดยน้ำหนัก โดยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี จากการศึกษา XRD พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก ความหนาและอุณหภูมิในการแอนนัลที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานและสภาพต้านทานของฟิล์มลดลง การเจืออะลูมิเนียมจะส่งผลต่อสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยจากการศึกษานี้พบว่าค่าของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นแต่สภาพต้านทานจะลดลง ค่าของช่องว่างแถบพลังงานซึ่งหาได้จากกราฟการส่งผ่านแสงโดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.27 ถึง 2.39 อิเล็กตรอนโวลต์ และสภาพต้านทานของฟิล์มอยู่ ในช่วง  $10^3$  ถึง  $10^4$  โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Special Project Title** Preparation of CdS Thin Films by Dip Coating Method

**Name** Mr. Piyaphol Rongkavilit  
Mr. Pratompon kittiwangchai

**Department** Applied Physics Faculty of Science

**Program** Applied Physics-Science and Industry Instrumentation

**Academic Year** 2005

**Special Project Advisor** Assoc.Prof. Dr. Thitinai Gaewdang

**Special Project Co-advisor** Assist.Prof. Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat



**ABSTRACT**

Pure CdS thin films and CdS thin films doped with aluminum 10% and 20% by weight have been deposited by dip coating method on glass substrates. X-ray diffractometric studies suggest that microstructure of films is homogeneous with a cubic structure. Effect of annealing temperatures are found to produce bandgap and resistivity decreases. Aluminum doping has an effect on optical and electrical properties of CdS films: energy gap increases but resistivity decreases. Values of bandgap that obtained from optical transmission measurements are in the range 2.27 to 2.39 eV, and values of resistivity are in the range  $10^8$  to  $10^9$   $\Omega$ -cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ในการศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และขอขอบคุณ ศูนย์ เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใน การให้นำปลอดประจวบใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง อิเล็กโตร มิเตอร์ และยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ (UV-visible spectrometer JASCO 7800) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลต และย่านตามองเห็นในการวัดการส่งผ่านแสง ของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้อง ดิจิตอล และจัดสรรเงินของภาควิชาเพื่อใช้ในการจัดทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณรวิชัย ขาวประเสริฐ คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะ และคุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม ที่อาคาร ฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิริขัตตครุฑ คุณจิตติกร จรรยาธรรม คุณประชาชน ประจวบโชค นักศึกษาปริญญาโท คุณรุกฤษฎ์ เกิดแสง นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ

วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณฉัฐพร พรหมรส ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงาน โครงการพิเศษด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 เครื่องมือ จุ่มเคลือบสารละลายเคมี	4
2.1.1 การควบคุมเครื่องมือที่ใช้หลักการของ DC Motor	6
2.1.1.1 มอเตอร์ชนิดกระแสตรง	6
2.1.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์	10
2.1.2.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	10
2.1.2.2 การจัดตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	10
2.1.2.3 ตำแหน่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51และหน้าที่การทำงาน	11
2.2 สารกึ่งตัวนำ	13
2.2.1 โครงสร้างของผลึก	13
2.2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ	13
2.2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	13
2.2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	15
2.2.1.2 ดัชนีมิลเลอร์	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.1.2.1 คำนีมีลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายใน โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	16
2.2.1.2.2 คำนีมีลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายใน โครงสร้างผลึกเฮกซะ โกนอล โคลสแพค	17
2.2.1.3 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง	17
2.2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวเคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	18
2.2.1.3.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	19
2.2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	19
2.2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	20
2.2.1.5.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	20
2.2.1.5.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์	21
2.2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	21
2.2.2.1 การเกิดสีของผลึก	22
2.2.2.2 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์	24
2.2.2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	26
2.2.2.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	27
2.2.2.5 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	29
2.2.2.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	30
2.2.2.7 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	31
2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้า	33
2.2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์และโฮล	33
2.2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	34
2.2.3.2.1 วิธีวัดโดยตรง	34
2.2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	35
2.2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจําเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น	39
2.2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยใช้วิธีขั้วความร้อน	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
3.1 เตรียมการสร้างเครื่องมือสำหรับการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี	42
3.1.1 สร้างบอร์ดการควบคุมเครื่องมือ	42
3.1.1.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	42
3.1.1.2 บอร์ดควบคุมมอเตอร์กระแสตรง	44
3.2 วิธีการทดลอง	45
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	45
3.2.2 การเตรียมแผ่นสไลด์	46
3.2.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	46
3.2.4 วิธีการวัดความต้านทานแผ่นฟิล์มโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	50
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	51
4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค โดยการถ่าย SEM	54
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	55
4.5 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแผ่น	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	75
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 หน้าที่พิเศษของพอร์ต 3	12
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมีในบีกเกอร์ที่มีปริมาณของ สารละลายเท่ากับ 150 ml	45
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม เมื่อไม่ได้มีการ แอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	69
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และ แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	74

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงถึงกระบวนการ การจุ่มเคลือบสารละลายเคมี	4
รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องมือการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี	5
รูปที่ 2.3 แสดงถึงการเกิดแรงบิดในตัว DC มอเตอร์	7
รูปที่ 2.4 แสดงการหมุนของมอเตอร์ในทิศทางเมื่อกลับขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์	7
รูปที่ 2.5 แสดงวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง	8
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรขับแบบ H – Bridge	9
รูปที่ 2.7 ตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	10
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	13
รูปที่ 2.8 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมของ CdS	
(ก) พันธะโควาเลนต์และพันธะเตตระฮีดรอน	
(ข) โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	14
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ของ CdS	15
รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงระนาบของอะตอม	
(ก) ภายในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	
(ข) ภายในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	15
รูปที่ 2.11 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	16
รูปที่ 2.12 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลอสแพค	17
รูปที่ 2.13 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี	
(ก) ชนิดชอตตี้	
(ข) ชนิดเฟรนเคิล	18
รูปที่ 2.14 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	19
รูปที่ 2.15 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	20
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ	
(ก) ฉนวน	
(ข) สารกึ่งตัวนำ	
(ค) ตัวนำ	22
รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเท่ากับ d	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0^{\circ}\text{K}$ )	
(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	25
รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอน ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0^{\circ}\text{K}$ )	
(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานตรง	
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	26
รูปที่ 2.20 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลต์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน – ออร์บิต	26
รูปที่ 2.21 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน – ออร์บิต	27
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	32
รูปที่ 2.23 แสดงการวัดค่าความต้านทาน ไฟฟ้าจำเพาะ โดยวิธีวัด โดยตรง	34
รูปที่ 2.24 แสดงการวัดค่าความต้านทาน ไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	35
รูปที่ 2.25 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
(ก) แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีการเลื่อนขั้วไฟฟ้า	37
รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	
(ก) โครงสร้างภายในของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	
(ข) ส่วนประกอบหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นที่สมบูรณ์	38
รูปที่ 2.27 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน	41
รูปที่ 3.1 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	48
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อมีการแอนนیلที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	50

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	50
รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	50
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C	52
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	
1) ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่ไม่ได้มีการเติมกรดสเตียริก	
2) ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่มีการเติมกรดสเตียริก	53
รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า	54
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่กำลังขยาย 60,000 เท่า	54
รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายด้านตัดขวางของกระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่ เพื่อวัดความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ซึ่งมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร	55
รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	56

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส และแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	57
รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการเติมกรดสเตียริกและไม่ได้เติมกรดสเตียริก เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส	57
รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการเติมกรดสเตียริกและไม่ได้เติมกรดสเตียริก เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส	58
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการเติมกรดสเตียริกและไม่ได้เติมกรดสเตียริก เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส	58
รูปที่ 4.15(ก)-(ค) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียม ซัลไฟด์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส และแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	60
รูปที่ 4.16(ก)-(ค) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียม ซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส และ แอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน บริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	63
รูปที่ 4.17(ก)-(ค) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียม ซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส และ แอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน บริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	66

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ	70
รูปที่ 4.19 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ	70
รูปที่ 4.20 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ	71
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	72
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	72
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	73
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	73

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือ สามารถแสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ (thermo electric effect) สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนกับตัวนำและสามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้โดยการเจือสิ่งเจือปนของธาตุที่เหมาะสมลงไป จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เราสามารถนำมาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มากมาย เช่น ไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) วงจรรวม (integrated circuit) และเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง พื้นที่ที่มีแสงตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ทันทีและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (dc current) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมสามารถทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่สิ้นสุด มีอายุใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี

ฟิล์มบาง CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct gap) มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง คือ ประมาณ 2.42-2.53 eV ซึ่งมีศักยภาพในการประดิษฐ์เป็น ไดโอดเปล่งแสงหรือเลเซอร์ไดโอด ในย่านแสงสีเขียวมทั้งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> ให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงกว่า 16% ซึ่งฟิล์มบางของ CdS จะทำหน้าที่เป็นหน้าต่าง (window) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพของฟิล์มบางของ CdS จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอย่างหนึ่ง

การเตรียมฟิล์มบาง CdS สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี เช่น วิธีการสปัตเตอร์ริง, วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ, วิธีการระเหยสารเคมี, วิธีการสปร์ย์ไพโรไลซิส และวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (dip coating method) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบสารละลายเคมีเป็นวิธีที่มีข้อดี คือ

สามารถเตรียมสารได้โดยใช้กรรมวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมากนักและยังสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าวิธีอื่นๆจึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

การเตรียมโดยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมีนั้นฟิล์มบาง CdS ขบวนการจุ่มเคลือบผิวจะแยกออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การจุ่ม การทำปฏิกิริยาระหว่างการจุ่ม การนำออก การระเหย การถ่ายสารละลายออก ซึ่งในวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมีสารจะจุ่มเข้าไปแบบช้า ๆ และนำออกจากถังบรรจุสารละลาย การเคลือบของสารละลายจะสมบูรณ์ได้โดยการควบคุมความเร็วให้คงที่และลดการสั่นไหวเนื่องจากการจุ่ม

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสร้างระบบวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating Method) ที่สามารถควบคุมอัตราการขึ้นลงของตัวยึดแผ่นฟิล์มบางได้
2. เพื่อศึกษาการควบคุมอัตราการขึ้นลงของตัวยึดแผ่นฟิล์มบาง ด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์
3. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วย วิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating Method)
4. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)
5. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแสงโดยวัดการส่งผ่านแสง (Optical transmission)
6. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบาง (sheet resistance) โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และวิธีแวนเดอร์วาลส์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้เราจะทำการสร้างระบบเครื่องมือ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating Method) ที่ใช้วิธีนี้เตรียมเนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงมากจนเกินไป และให้ประสิทธิภาพที่สูง จากนั้นนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ ได้แก่ สมบัติเชิงไฟฟ้า, สมบัติเชิงแสง และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อจะได้นำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน มีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating Method)
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ และสร้างระบบเครื่องมือควบคุม การจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
3. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS ด้วยขบวนการจุ่มเคลือบผิวด้วยสารละลายเคมี ซึ่งจะขั้นตอนออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การจุ่ม, การเริ่ม, การสะสม, การระเหย, การถ่ายสารละลายออก
4. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
5. ทำการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการวัดการส่งผ่านแสง
6. ทำการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบาง (sheet resistance) โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และวิธีแวนเดอร์วาลส์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating Method)
2. ทำให้ทราบถึงการสร้างระบบเครื่องมือ จุ่มเคลือบในสารละลายเคมี (Dip Coating Method) ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง
3. ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS
4. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นบัพเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

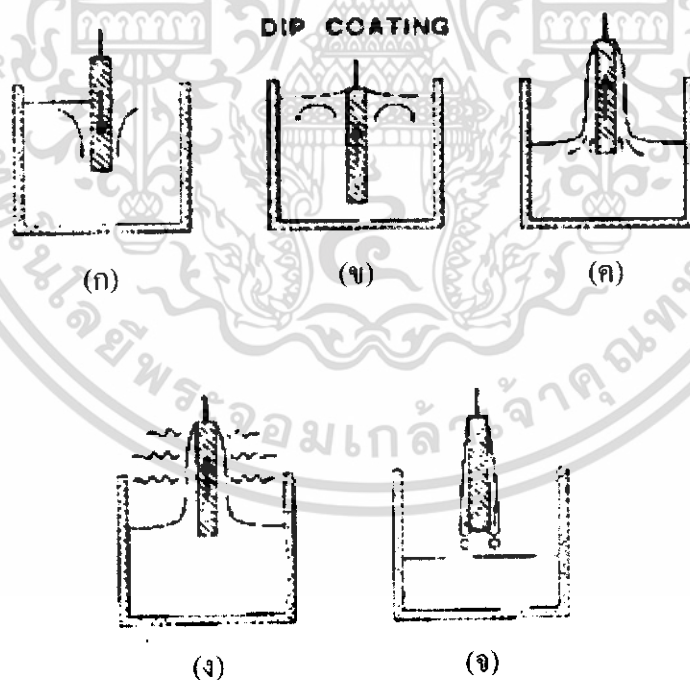
### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1. เครื่องมือ จุ่มเคลือบสารละลายเคมี[9]

เทคนิคการจุ่มเคลือบสารละลายเคมี แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียม หรือเลือกชิ้นงาน
2. ล้างชิ้นงาน
3. การสร้างตัวเป็นชั้นฟิล์ม
4. การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นในขณะที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิ

กระบวนการจุ่มเคลือบสารละลายเคมี สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ การจุ่มสาร เปิดเครื่อง การฉาบ การทำให้ระเหยเป็นไอ และการระบายออก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงถึงกระบวนการ การจุ่มเคลือบสารละลายเคมี

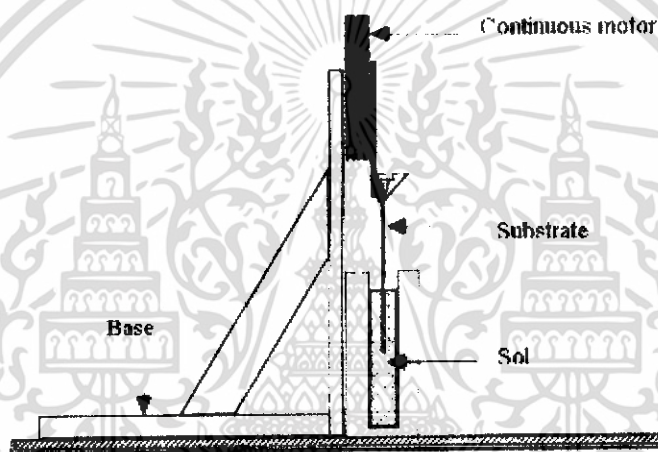
- |                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| (ก) การจุ่ม             | (ง) การระบาย           |
| (ข) การทำให้ระเหยเป็นไอ | (จ) การถ่ายสารละลายออก |
| (ค) การตั้งแผ่นฐานรอง   |                        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ การจุ่ม การทำปฏิกิริยา การดึงแผ่นฐานรอง การระเหย และการถ่ายสารละลายออก

ในวิธีการจุ่มเคลือบสารละลายเคมี ชิ้นงานจะค่อยถูกจุ่ม และดึงขึ้นมาจากที่บรรจุสารละลาย ด้วยความเร็วคงที่ เพื่อให้ได้การฉาบที่เหมือนกัน

การฉาบ จะดำเนินการโดยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมอัตโนมัติ การทดลองที่จัดขึ้นมาทั้งหมดจะถูกทำในห้องทดลองของเราและจะถูกทดลองอยู่บนโต๊ะที่ลดการสั่นสะเทือน เพื่อให้แน่ใจว่า ผิวหน้าของของเหลว จะไม่ถูกรบกวน ซึ่งจะทำให้ได้ความหนาที่เป็นเนื้อเดียวกัน ในการฉาบแต่ละครั้ง



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องมือการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 การควบคุมเครื่องมือที่ใช้หลักการของ DC Motor

สามารถควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้เทคนิค PWM ( Pulse Width Modulations )

#### 2.1.1.1 มอเตอร์ชนิดกระแสตรง(DC Motor)

DC มอเตอร์เป็นทรานส์ดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของ DC มอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ แรงบิดของเพลลาของ DC มอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการนี้แสดงได้ในรูปที่ 2.3 ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านี้อยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\Phi I \quad (1)$$

เมื่อ  $T$  คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร

$\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

$I$  คือ กระแสเป็นแอมแปร์

$K$  คือ ค่าคงตัว

ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์ที่เต็งตกร้อมตัวขดลวดเอง ความต่างศักย์นี้จะเป็นส่วนกับความเร็วมอเตอร์และต้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ย้อนกลับกับความเร็วมอเตอร์คือ

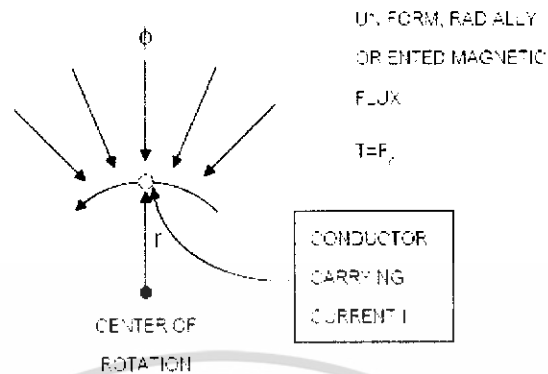
$$E = K\Phi\omega \quad (2)$$

เมื่อ  $E$  คือ ความต่างศักย์ย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็นโวลต์

$\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

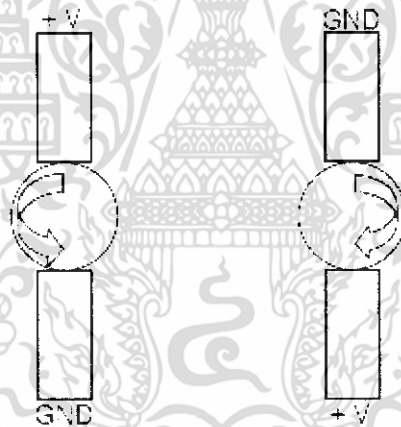
$\omega$  คือ ความเร็วมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที

สมการ (1) – (2) เป็นสมการที่แสดงถึงหลักการทำงานพื้นฐานของ DC มอเตอร์



รูปที่ 2.3 แสดงถึงการเกิดแรงบิดในตัว DC มอเตอร์

การทำให้มอเตอร์กระแสตรงทำงาน ก็เพียงเราเปลี่ยนความต่างศักย์แล้วทำให้กระแสไหลผ่านมอเตอร์กระแสตรง โดยการหมุนจะหมุนเป็น ตามเข็มนาฬิกา หรือ ทวนเข็มนาฬิกา ก็จะขึ้นอยู่กับว่าเปลี่ยนความต่างศักย์ที่เป็นบวกให้กับขั้วไหน.

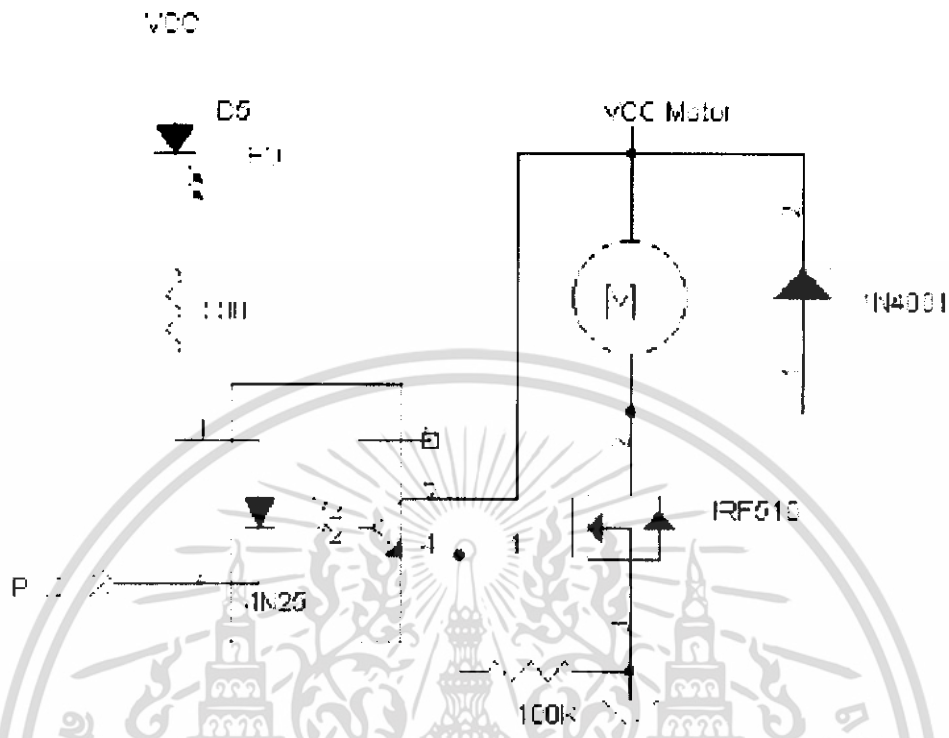


รูปที่ 2.4 แสดงการหมุนของมอเตอร์ในทิศทางเมื่อกลับขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

(ก) ทวนเข็มนาฬิกา

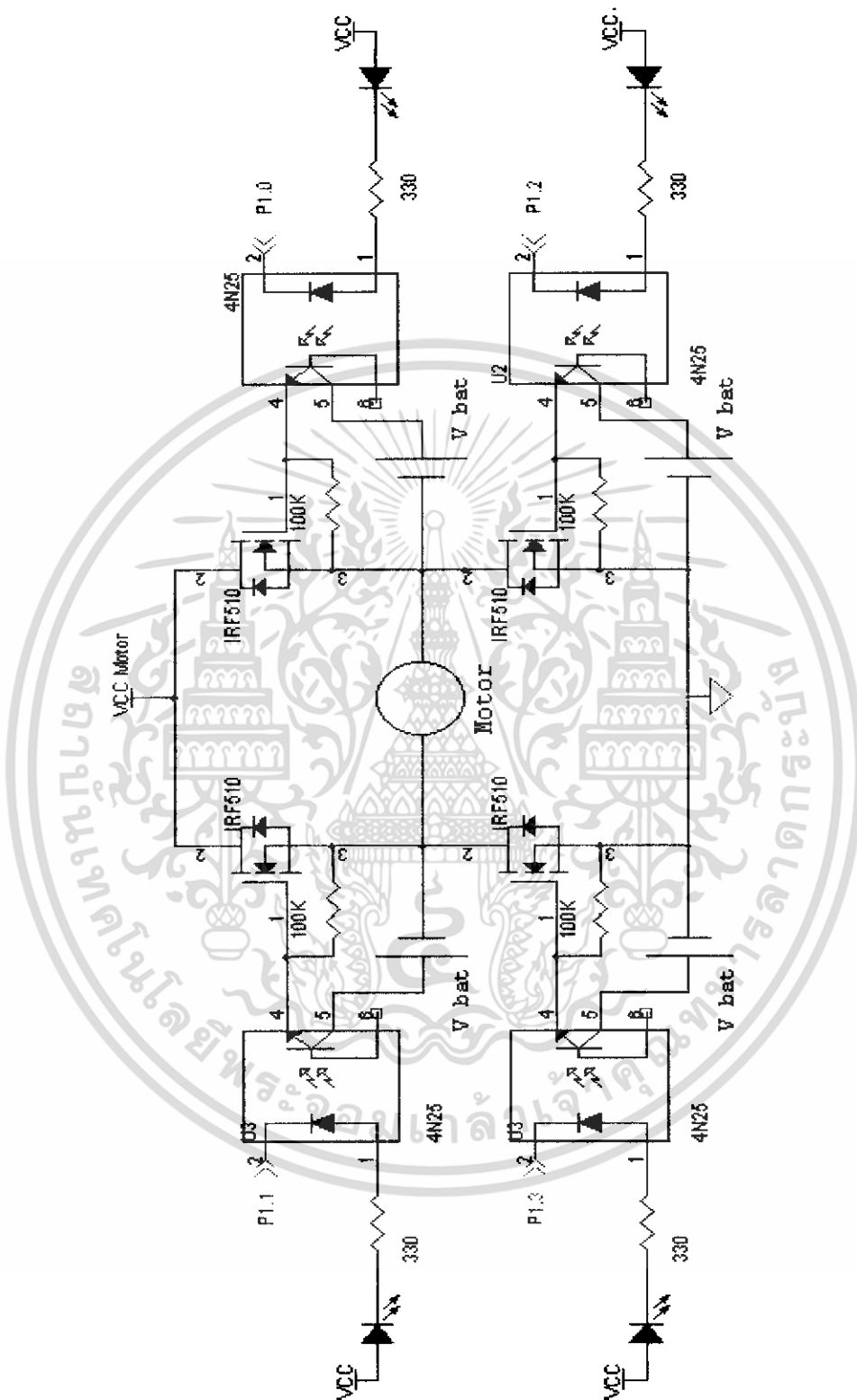
(ข) ตามเข็มนาฬิกา

ในการควบคุมเราสามารถใช้อุปกรณ์สวิตช์โดยใช้ Power BJT หรือ Power MOSFET เป็นตัวสวิตช์เพื่อสั่งให้มอเตอร์ทำงาน



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง

จากวงจรรูปที่ 2.4 จะพบว่าการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ถ้าเราต้องการให้มอเตอร์หมุน ก็เพียงทำให้มีความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน 100 K ที่ต่ออยู่ระหว่างขา GATE และขา SOURCE ซึ่งในวงในรูปที่ 2.4 นี้การหมุนของมอเตอร์จะหมุนได้ในทิศทางเดียว เราต้องการให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ทั้ง ตามเข็มนาฬิกา หรือ ทวนเข็มนาฬิกา เราอาจใช้วงจรที่เป็น H-Bridge ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรขับแบบ H - Bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.1.2.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

1. เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต
2. มีหน่วยความจำภายในแบบแฟลชขนาด 4 กิโลไบต์ หรือ 8 กิโลไบต์ ที่โปรแกรมภายในวงจรสามารถเขียนและลบได้ถึงพันครั้ง
3. มีสายสัญญาณสำหรับต่อกับอินพุต/เอาต์พุตได้ 32 เส้น (แบบ 2 สองทิศทาง)
4. มีหน่วยความจำชั่วคราว (ROM) ภายในขนาด 128 ไบต์ หรือ 256 กิโลไบต์
5. ใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ 0 Hz จนถึง 24 Hz
6. มีวงจรตั้งเวลาและนับสัญญาณเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 2 หรือ 3 ชุด
7. มีวงจรรับสัญญาณอินเตอร์รัป (interrupt) ได้ไม่ต่ำกว่า 6 ชนิด
8. สามารถต่อขยายหน่วยความจำภายนอกได้สูงสุด 64 กิโลไบต์

### 2.1.2.2 การจัดตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ทุกเบอร์นั้นจะมีโครงสร้างและการทำงานพื้นฐานเหมือนกันดังตัวอย่างนี้ เช่น แบบดิป (DIP) ซึ่งมีทั้งหมด 40 ขา ได้แบ่งการใช้งานออกเป็นอินพุต/เอาต์พุต (Input/Output Port) ขาสัญญาณควบคุม ขาสัญญาณกำหนดตำแหน่งหน่วยความจำ และขาสัญญาณข้อมูล ดังรูปที่ 2.7

T2	P1.0	1	40	Vcc
only T2EX	P1.1	2	39	P0.0 AD0
	P1.2	3	38	P0.1 AD1
	P1.3	4	37	P0.2 AD2
	P1.4	5	36	P0.3 AD3
	P1.5	6	35	P0.4 AD4
	P1.6	7	34	P0.5 AD5
	P1.7	8	33	P0.6 AD6
	RST	9	32	P0.7 AD7
RXD	P3.0	10	31	EA' Vpp
TXD	P3.1	11	30	ALE PROG'
INT0'	P3.2	12	29	PSEN'
INT1'	P3.3	13	28	P2.7 A15
T0	P3.4	14	27	P2.6 A14
T1	P3.5	15	26	P2.5 A13
WR'	P3.6	16	25	P2.4 A12
RD'	P3.7	17	24	P2.3 A11
XTAL2	18	23	P2.2 A10	
XTAL1	19	22	P2.1 A9	
Vss	20	21	P2.0 A8	

รูปที่ 2.7 ตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.3 ตำแหน่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 และหน้าที่การทำงาน

1. P0.0-P0.7 (ขาที่ 32-39) พอร์ต 0 ทำหน้าที่เป็นสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ 2 ทิศทาง สามารถรับข้อมูลอินพุตและส่งข้อมูลเอาต์พุตได้ มีขนาด 8 บิต การตั้งค่าให้พอร์ต 0 รับข้อมูลอินพุตทำได้โดยการส่งค่าสัญญาณ 1 ไปยังบิตที่ต้องการให้รับข้อมูลอินพุต วงจรภายในจะทำให้บิตนั้นมีค่าความต้านทานสูงและสามารถรับข้อมูลอินพุตได้และยังใช้เป็นขาสัญญาณกำหนดตำแหน่งหน่วยความจำ (A0-A7) และขาสัญญาณข้อมูล (D0-D7) โดยการใช้ตัวแยกสัญญาณ (D-latch 74LS373) ทำหน้าที่เป็นมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) โดยเลือกช่วงเวลาของสัญญาณกำหนดตำแหน่งหน่วยความจำและสัญญาณข้อมูลออกจากกัน

ในขณะที่ใช้เป็นอินพุตและเอาต์พุต วงจรภายในจะไม่วงจรเพิ่มกระแสไฟฟ้า (Pull up) จึงจำเป็นต้องต่อวงจรเพิ่มกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป

2. P1.0-P1.7 (ขาที่ 1-8) พอร์ต 1 ทำหน้าที่เป็นสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ 2 ทิศทาง สามารถปรับได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต มีขนาด 8 บิต สามารถอ้างอิงถึงการทำงานได้ที่ละบิต และวงจรภายในมีตัวต้านทานเพิ่มกระแสไฟฟ้า (Pull up) ในกรณีที่ต้องการให้รับข้อมูลอินพุตก็สามารถทำได้เหมือนพอร์ต 0

3. P2.0-P2.7 (ขาที่ 21-28) พอร์ต 2 ทำหน้าที่เป็นสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ทั้ง 2 ทิศทาง คือ เป็นได้เป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุต มีขนาด 8 บิต สามารถใช้เป็นขาสัญญาณที่กำหนดตำแหน่งหน่วยความจำ (A8-A15) และมีวงจรเพิ่มกระแสไฟภายใน การกำหนดให้เป็นขาอินพุตทำได้โดยการส่งข้อมูลสถานะ 1 ไปยังบิตที่ต้องการให้เป็นอินพุต ก็จะสามารถทำการรับค่าข้อมูลอินพุตได้

4. P3.0-P3.7 (ขาที่ 10-17) พอร์ต 3 ทำหน้าที่เป็นสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ภายนอกอินพุตและเอาต์พุต 2 ทิศทาง มีขนาด 8 บิต คุณสมบัติทั่วไปจะเหมือนกับพอร์ตอื่นๆ แต่จะมีคุณสมบัติที่ต่างออกไป คือ ใช้ทำหน้าที่พิเศษเป็นสัญญาณควบคุมการทำงานต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 หน้าที่พิเศษของพอร์ต 3

บิตของพอร์ต	สัญญาณ	หน้าที่การทำงาน
P3 0	RXD	รับข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม ( serial input port )
P3 1	TXD	ส่ง ข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม ( serial output port )
P3 2	$\overline{INT0}$	รับสัญญาณอินเตอรัปต์หมายเลข 0 ( external interrupt 0 )
P3 3	$\overline{INT1}$	รับสัญญาณอินเตอรัปต์หมายเลข 1 ( external interrupt 1 )
P3 4	T0	ใช้ตั้งเวลานับเวลาตัวที่ 0 ( Timer 0 external input )
P3 5	T1	ใช้ตั้งเวลานับเวลาตัวที่ 1 ( Timer 1 external input )
P3 6	$\overline{WR}$	เป็นสัญญาณเขียนข้อมูลหน่วยความจำหรืออุปกรณ์ภายนอก ( external data memory write strobe )
P3 7	$\overline{RD}$	เป็นสัญญาณอ่านข้อมูลหน่วยความจำหรืออุปกรณ์ภายนอก ( external data memory read strobe )

5.  $\overline{PSEN}$  (Program Store Store Enable ขาที่ 29) ขาที่ทำงานที่สภาวะลอจิกเป็น “0” ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องอ่านค่าจากหน่วยความจำภายนอกที่เป็นข้อมูล โดยโปรแกรมจะเก็บในหน่วยความจำถาวร (ROM, EPROM, EEPROM) ส่วนมากใช้ต่อเป็นขาเลือกทำงาน (Enable:OE) แต่ถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้หน่วยความจำภายใน ขานี้ก็จะไม่ได้ใช้งานและมีค่าลอจิกเป็น “1”

6. ขา ALE (Address Latch Enable ขาที่ 30) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสัญญาณกำหนดตำแหน่งกับสัญญาณข้อมูล โดยใช้การเลือกเส้นทาง (data select หรือ multiplex) โดยปกติเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานจะส่งสัญญาณกำหนดตำแหน่งออกมาก่อน พร้อมกับส่งสัญญาณให้ขา ALE ทำงาน เพื่อเลือกให้สัญญาณกำหนดตำแหน่ง (A0-A7) ผ่านไอซี (74LS373) ที่ทำหน้าที่เลือกเส้นทางถ้าส่งสัญญาณข้อมูลออกมา ไอซี (74LS373) จะไม่ทำงาน ข้อมูลก็จะถูกส่งไปที่สายสัญญาณข้อมูล

7. ขา  $\overline{EA}$  (External Access ขาที่ 31) ทำหน้าที่เลือกการทำงานของหน่วยความจำ ถ้ามีค่าลอจิกเป็น “1” หมายถึง ใช้ข้อมูลจากหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ถ้ามีค่าลอจิกเป็น “0” หมายถึง ใช้ข้อมูลจากหน่วยความจำภายนอก

8. ขา RST (Reset ขาที่ 9) ทำหน้าที่เริ่มต้นการทำงานใหม่ของไมโครคอนโทรลเลอร์ การทำงานที่ค่าลอจิก “1” นี้จะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มต้นทำงานที่ตำแหน่ง 0000 เพื่ออ่านข้อมูลโปรแกรมและจัดระบบการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ขาสัญญานาฬิกา ( ขาที่ 18-19 ) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดสัญญาณนาฬิกาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เป็นฐานเวลาในการทำงาน โดยจะใช้แผ่นผลึก (crystal) ที่มีความถี่ตั้งแต่ 0-24 เมกกะเฮิร์ตซ์ ( MHz ) ร่วมกับตัวเก็บประจุขนาด 20-33 pF

10. แหล่งจ่ายไฟ (Power supply) ขาที่ 20 จะเป็นขากราวด์ (Ground) และขาที่ 40 จะเป็นแหล่งจ่ายไฟบวกให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟขนาดไม่เกิน 5 โวลต์

## 2.2. สารกึ่งตัวนำ

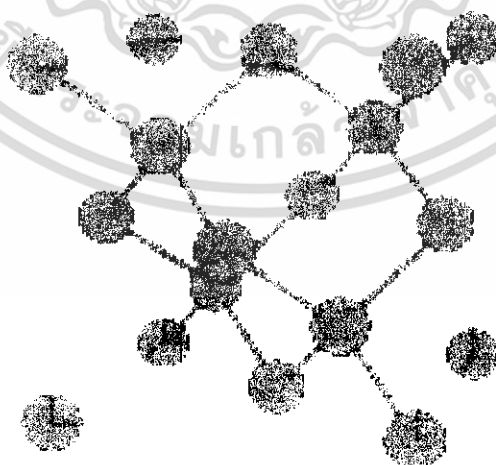
สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า, คุณสมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น

### 2.2.1 โครงสร้างของผลึก

#### 2.2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ [1-3]

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงผลึกนั้นจากการศึกษาเราพบว่าโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำเคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะ โครงสร้างอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite)

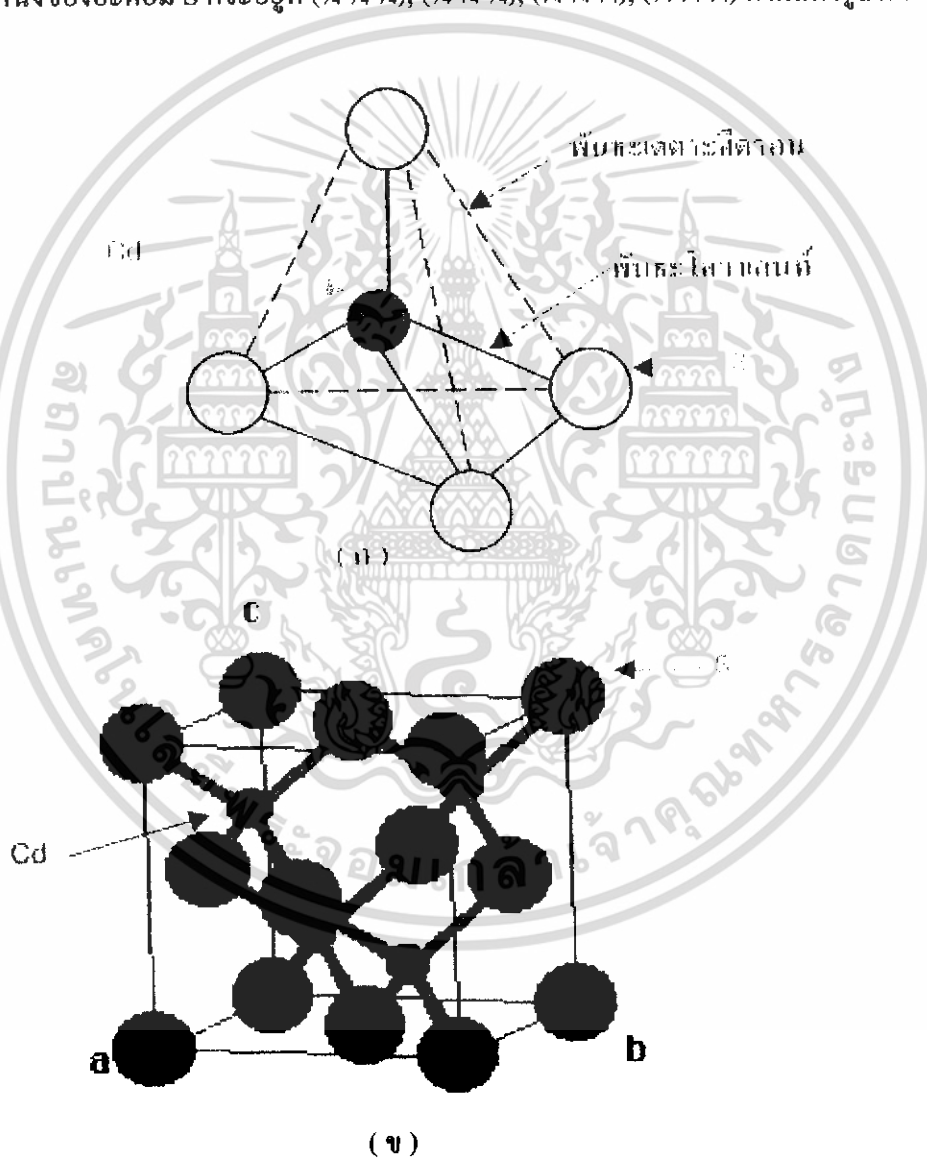
#### 2.2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ [1-3]



รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างนี้จะมีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชรดังรูปที่ 2.7 โดยพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์และมีพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) แต่จะมีโครงผลึกพื้นฐาน (basis lattice) ที่  $(000)$  และ  $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$  เป็นอะตอมของธาตุต่างชนิดกันดังนั้น โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จึงเกิดจากการนำโครงสร้างแบบเพชเชนเตอร์คิวบิกสองโครงสร้างมาซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  คมแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์โดยที่หนึ่งหน่วยของเซลล์จะมี 8 อะตอมซึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด แต่ละตำแหน่งของอะตอม S ก็จะมีอยู่ที่  $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$ ,  $(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4})$ ,  $(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4})$ ,  $(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4})$  ดังแสดงรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.8 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมของ CdS

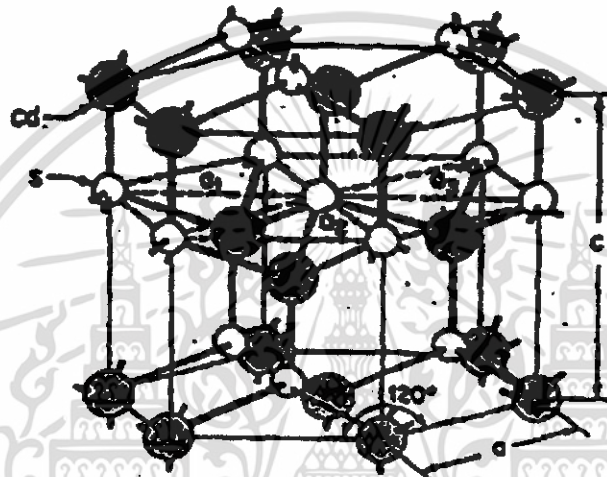
(ก) พันธะ โควาเลนต์และพันธะเตตระฮีดรอน

(ข) โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

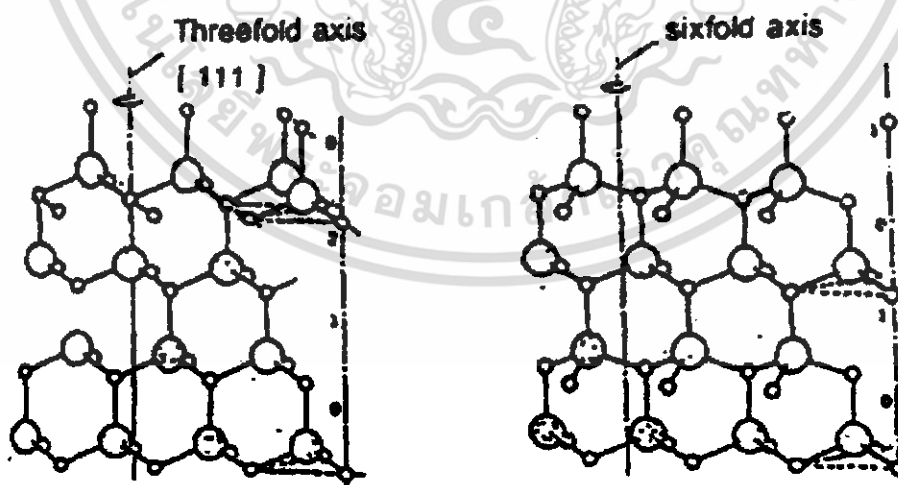
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ [1-3]

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นี้มีพันธะเคมีของอะตอมในโครงผลึกเหมือนกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของระนาบของกลุ่มพันธะเตตระฮีดรอนของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไปดังรูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกนี้เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกบ่อแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal close-packed) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $5/8$  ตามแนวแกนซี (c-axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม



รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของ CdS



รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงระนาบของอะตอม

(ก) ภายในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

(ข) ภายในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.2 ดัชนีมิลเลอร์ [1-3]

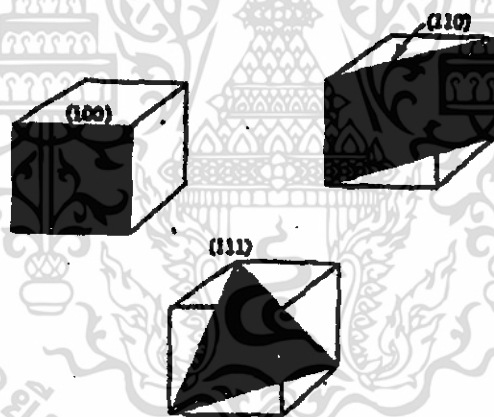
การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะบอกเป็นรูปของค่าดัชนีมิลเลอร์ ค่าดัชนีหาได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษอังกฤษที่ชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยมีการแยกดัชนีมิลเลอร์เป็น 2 ประเภทนี้คือ

#### 2.2.1.2.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างแบบคิวบิก [1-3]

การบอกระนาบต่างๆที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะลอกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ  $h,k,l$  โดยใช้เครื่องหมาย  $(h,k,l)$

$$h:k:l = 1/p : 1/q : 1/r \quad (2.1)$$

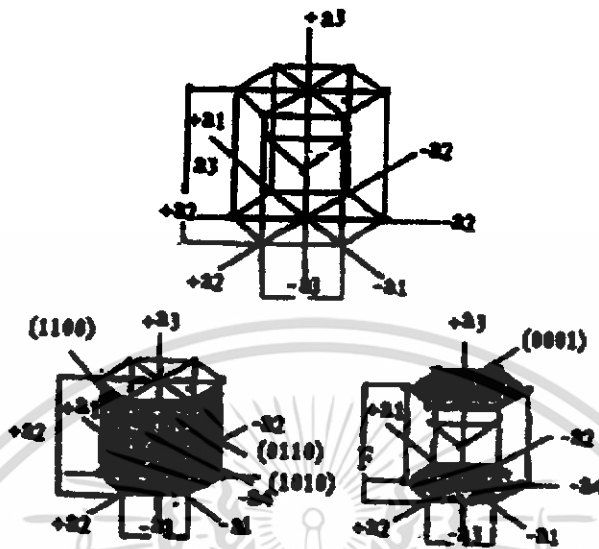
เมื่อ  $p,q$  และ  $r$  คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก  $a,b,c$  ตามลำดับ นั่นคือ  $h,k,l$  จะเป็นตัวเลขเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับระยะตัดแกนผลึก  $a,b,c$  ตามลำดับ ซึ่งก็คือ ดัชนีมิลเลอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.11 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2.2 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอลโคลสแพค [1-3]



รูปที่ 2.12 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค

ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค ดัชนีที่ใช้เรียกระนาบดัชนีมิลเลอร์ของบราว ใช้สัญลักษณ์  $h, k, l$  ซึ่งหาได้จากเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน  $a_1, a_2, a_3$  และ  $c$  ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับดังรูปที่ 2.6 โครงสร้างของหน่วยเซลล์ระนาบฐานมี 2 ระนาบ คือ ระนาบฐานบนและระนาบฐานล่างแกน  $a_1, a_2, a_3$  จะเป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐานที่ทำมุม  $120^\circ$  ซึ่งกันและกัน และระยะตัดแกน  $a_1 = a_2 = a_3 = a$  และแกนที่ 4 คือ แกน  $c$  เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบทั้ง 2 ซึ่งตัดแกน  $c$  ห่างกันเป็นระยะ 1 หน่วย ส่วนของระยะตัดแกนทั้ง 4 จะมีอัตราส่วนของจุดตัดแกนต่างๆเป็น  $(1/00 \ 1/00 \ 1/00 \ 1/1)$  ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์บราว ก็คือ  $(0 \ 0 \ 0 \ 1)$  ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แต่เมื่อพิจารณาถึงความสมมาตรของรูปทรงปริซึมของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีแกน  $a_1 = a_2 \neq a_3$  จึงนิยมใช้ดัชนีมิลเลอร์เพียง 3 ค่า คือ  $(h, k, l)$  ที่หาได้จากเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะระนาบที่พิจารณาตัดแกน  $a_1, a_2, a_3$  ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับเพื่อใช้สำหรับบอกระนาบต่างๆที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

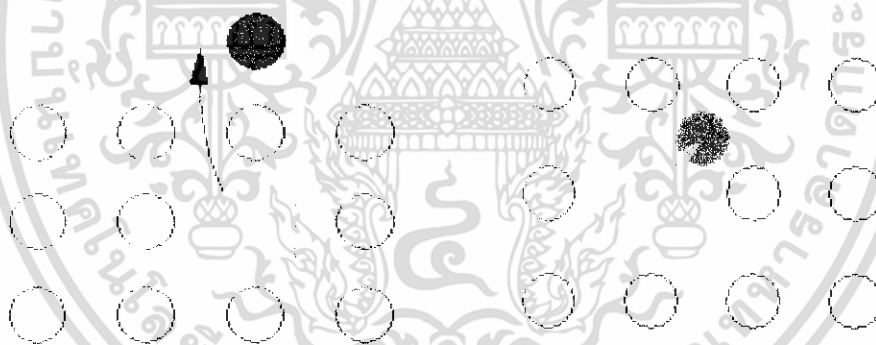
2.2.1.3 โครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคในผลึกจริง (real crystal) [1-3]

ผลึกจริงเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงผลึก (defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากผลึกอุดมคติ ข้อบกพร่องของผลึกมีหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนเคนซี

(vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซัสดิวชันนัล (substitution defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่บริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึก อีกทั้งยังมีเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงข้อบกพร่องของผลึกแบบแวแคนซีและขอบเขตรอยต่อของเกรน

### 2.2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึกจะแบ่งเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตกี (schottky defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ในที่บริเวณที่เป็นผิวหน้า (surface) ของโครงผลึกและข้อบกพร่องชนิดเฟรนเคิล (frenkel defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหายไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี

(ก) ชนิดชอตกี

(ข) ชนิดเฟรนเคิล

### 2.2.1.3.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน [1-3]



รูปที่ 2.14 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน คือ บริเวณที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและแนวพรหมแดนระหว่างเกรนต่างๆที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันเรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรนดังแสดงในรูปที่ 2.14 ผลึกที่มีหลายเกรนเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (poly crystalline) เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆไปจากกรณีผลึกในอุดมคติ ได้แก่ ขอบเขตรอยต่อของเกรนจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสกัดกั้นการไหลของกระแสหรือขอบเขตรอยต่อของเกรนก็อะตอมโมเลกุลหรือไอออนของสารบางตัวไว้ ก็อาจมีผลทำให้เกิดการนำกระแสได้มากขึ้น เป็นต้น

#### 2.2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [1-3]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง  $0.2 - 2 \text{ \AA}^{\circ}$  ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับหรือน้อยกว่าขนาดของค่าคงที่โครงสร้างผลึก (lattice constant) คือให้  $\lambda \leq 2d$  หรือความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (inter-atomic spacing) คือ ให้  $\lambda \approx 10^{-8} \text{ cm}$  หรือ  $\lambda \approx 1 \text{ \AA}^{\circ}$  ตกกระทบผลึกที่ทำหน้าที่คล้ายเกรตติ้ง จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบริก (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เรียกว่า “กฎของแบรกก์” ดังสมการ

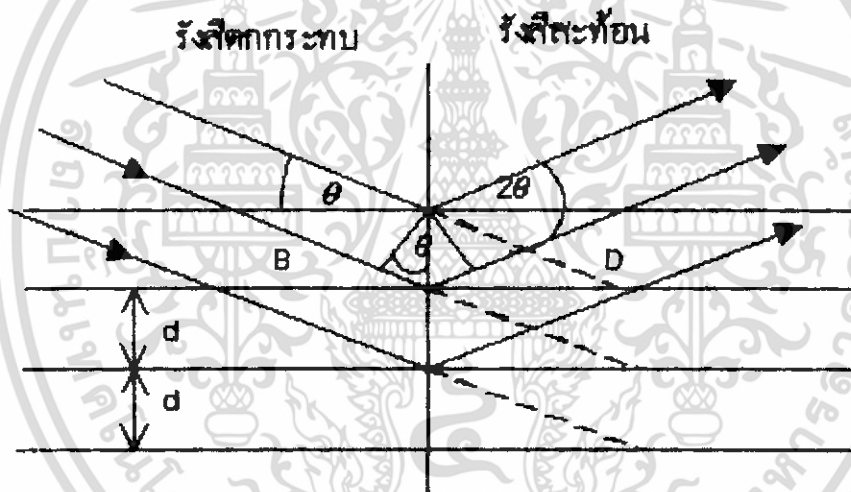
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.2)$$

โดย

$$\lambda(\text{Å}) = 12.4/\mathcal{E}(\text{keV}) \text{ และ } \mathcal{E} = h\nu = hc/\lambda$$

เมื่อ	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
	$d_{hkl}$	คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
	$\theta$	คือ มุมที่รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อน ทำกับระนาบของผลึก
	$n$	คือ อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
	$h$	คือ ค่าคงตัวของพลังค์ ( plank constant )
		$h = 6.62 \times 10^{-27} \text{ erg sec} = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$



รูปที่ 2.15 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

### 2.2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ใน โครงสร้างผลึก สามารถนำไปคำนวณหา ค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

#### 2.2.1.5.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ [1-3]

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จัดอยู่ในรูปผลึกแบบคิวบิก ( cubic ) โดยที่  $a = b = c$  และ  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{d_{hkl}^2 a^2} \quad (2.3)$$

เมื่อแทนสมการ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (2.4)$$

โดยที่  $a$  = ค่าคงที่ของโครงผลึก

#### 2.2.1.5.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ [1-3]

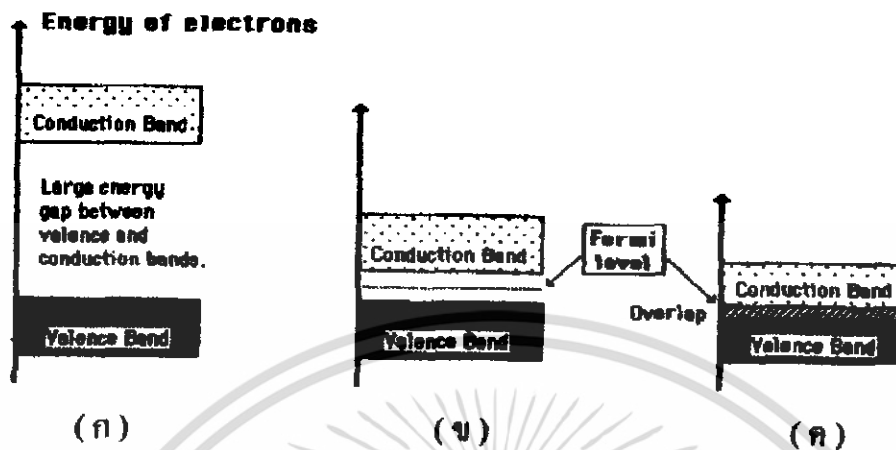
โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ จะถูกจัดอยู่ในระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าต่าง ๆ คือ  $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$1 = \frac{4[h^2 + h^k + k^2] + l^2}{3a^2 c^2} \quad (2.5)$$

#### 2.2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [1,2,4,5]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของการเกิดสีของผลึก ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์ของ โครงสร้างแถบพลังงานของ Cds ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) ของสารกึ่งตัวนำและนำมาทำการคำนวณขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)

### 2.2.2.1 การเกิดสีของผลึก [1-2]



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ

- (ก) ฉนวน
- (ข) สารกึ่งตัวนำ
- (ค) ตัวนำ

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่างๆ เป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ซึ่งจะประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตดู ลอมบ์ ยึดเหนี่ยวเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อยและแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำ อิเล็กตรอนอิสระบางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยเรียก บริเวณนี้ว่า “บริเวณต้องห้าม (forbidden ferion หรือ forbidden gap)” ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้าง ของช่องว่างนั้นว่าช่องแถบพลังงาน (energy : $E_g$ ) ขนาดของ  $E_g$  นำมาใช้แบ่งแยกสารชนิดต่างๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี  $E_g > 3eV$  สารกึ่งตัวนำจะมี  $E_g < 3eV$  และตัวนำมีแถบวาเลนซ์และแถบนำ ซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า  $E_g$  นั้นเอง

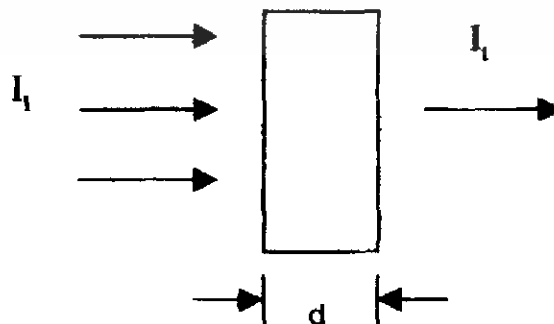
นอกจากนี้ค่า  $E_g$  ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่เมื่อให้พลังงาน โฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E_g$  ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน ออกจากผลึกทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdS จะมีสีเหลืองส้ม เนื่องจากมีค่า  $E_g = 2.42 \text{ eV}$  อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึงสีน้ำเงิน หรือเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาทั้งหมดและเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ  $E_g$  มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านแสงสีน้ำเงินแต่พลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านแสงสีเหลืองเป็นต้นไปจะถูกส่งผ่านออกมาจากผลึก ด้วยเหตุนี้เราจึงมองเห็นผลึก CdS มีสีเหลืองเป็นต้น ถ้าพิจารณาฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนา  $d$  เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ  $I_0$  แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น  $I_t$  ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ต่อจากนั้นเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient:  $\alpha$ ) ได้จากสมการที่ (2.6) และสามารถหาค่า  $E_g$  ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานโฟตอนได้ นอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานด้วยซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันมากดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $I_0$  = ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากตัวอย่าง  
 $I_t$  = ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่าง  
 $\alpha$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
 $d$  = ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $d$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธีทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังกล่าวมาข้างต้น คือ การสร้างสถานะพื้นฐานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (color centers) ขึ้นมาภายในช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง คือ

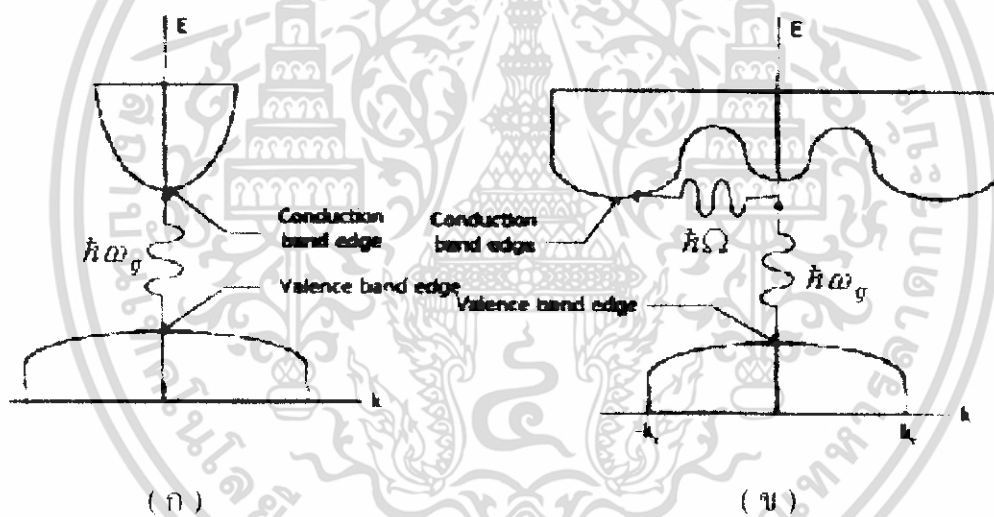
1. การเจืออะตอมของธาตุบางชนิดเข้าไปในผลึก เช่น ผลึก  $Al_2O_3$  เป็นผลึกไม่มีสี เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ  $Cr^{3+}$  จะเข้าไปแทนที่ไอออน  $Al^{3+}$  ทำให้เกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีแดงเข้มหรือที่เราเรียกว่า ทับทิม (ruby) แต่เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ti เพียงแค่ 0.5% ไอออน  $Ti^{3+}$  จะเข้าไปแทนที่ไอออน  $Al^{3+}$  ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีน้ำเงินหรือที่เราเรียกว่า แซฟไฟร์ ได้แก่ มรกต บุษราคัม นิล เป็นต้น
2. การระดมยิง (bombard) ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้เกิดสถานะพลังงานที่เป็นกับดัก (trap state) ของอิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมากขึ้นบนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้นกล่าวคือเมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราเห็นผลึกมีสีได้

#### 2.2.2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน [1,2,5]

โดยทั่วไปลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมี 2 แบบ คือ แบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ก) และ (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่น (wave vector:  $k$ ) ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากันถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $h\nu_0 = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลาย โฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.19(ก) ส่วนลักษณะ โครงสร้างแบบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้กระบวนการการสร้าง โฟตอนเกิดขึ้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

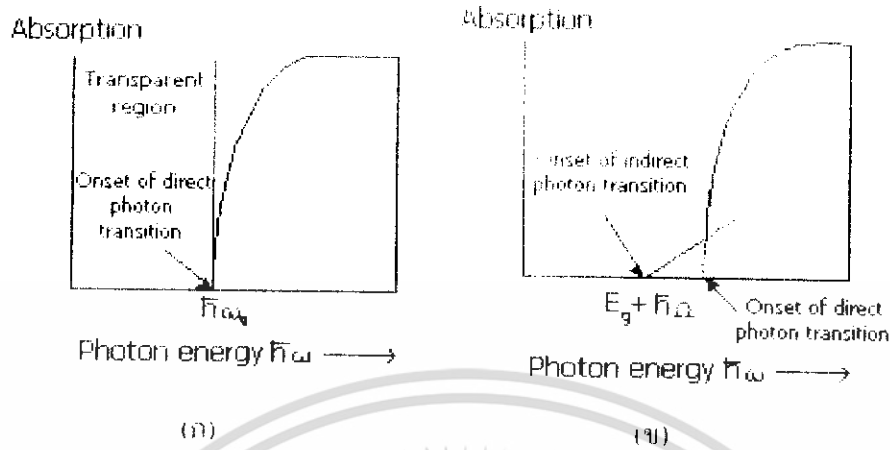
$\Omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟตอนนั้นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน ( $E_g + \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (Evert) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) และเมื่อเขียนกราฟแสดงดังรูปที่ 2.19(ข) ส่วนกระบวนการทำลายล้างโฟนอนมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงซึ่งโครงสร้างผลึกจะดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเกิดการสั่นและสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิเล็กตรอนจะดูดกลืนโฟนอนแล้วก็จะตามด้วยกระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟนอนซึ่งจะมีค่าเท่ากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระต่อไป



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำของสารกึ่งตัวนำ (  $T = 0^{\circ} K$  )

- (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



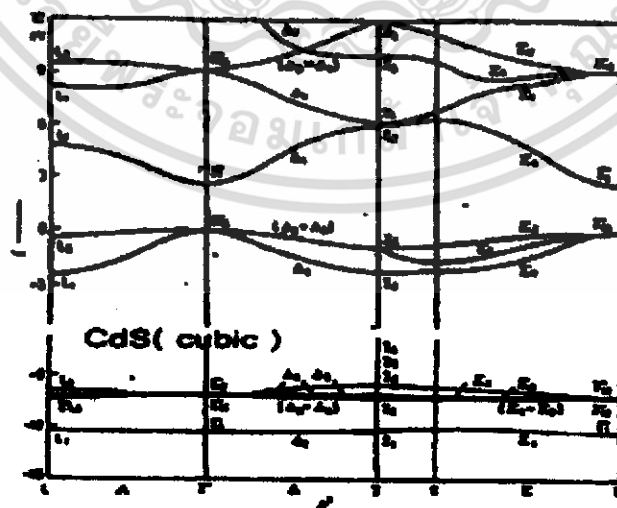
รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0^{\circ}\text{K}$ )

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานตรง

(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.2.2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [1,2,4,5]

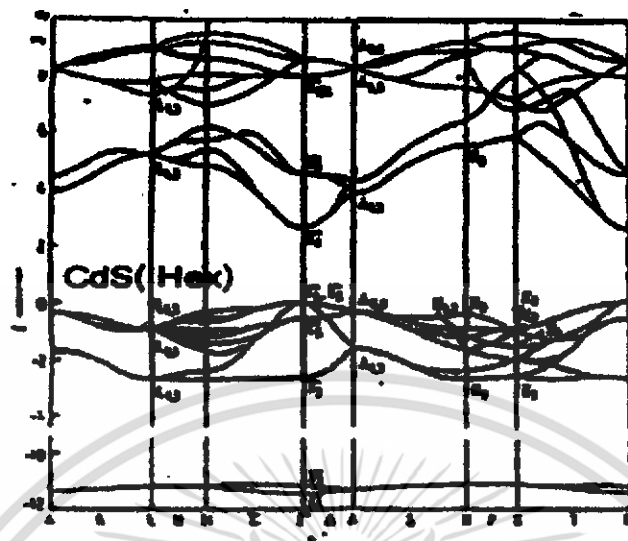
CdS มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ มีการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ในเวกเตอร์ค่าเดียวกันหรือที่ตำแหน่ง  $\Gamma$  ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และแบบเวรีทไซท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.50 และ 2.501 eV ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.20 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน - ออร์บิต ( spin-orbit coupling )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวริทไซต์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน – ออร์บิต

#### 2.2.2.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [4-5]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีสภาพของแม่เหล็ก ( $\mu$ ) = 1 จะได้สมการคลื่นเป็น

$$E = E_0 \exp [I (k \cdot r - \omega t)] \quad (2.7)$$

$$H = H_0 \exp [I (k \cdot r - \omega t)] \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด  $E_0$

H คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด  $H_0$

$K = k_1 + ik_2$  เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดยที่  $k_1$  คือ เวกเตอร์จริง  $k_2$  คือ เวกเตอร์จินตภาพ หรือ  $k^*k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$

E คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

C คือ ค่าความเร็วแสง

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากในอากาศ เนื่องจากแสงได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางมีผลทำให้ความเร็วคลื่นและความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - ik \quad (2.9)$$

โดยที่  $n$  = ดัชนีหักเห

$K$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( extinction coefficient )

สำหรับคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

$$\begin{aligned} |K_1| &= n\omega / c \\ |K_2| &= n\omega / c \end{aligned} \quad (2.10)$$

แทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศ  $x$  เป็น

$$E_x = E_{0x} \exp[i(n\pi/c - t)] \exp(-\omega kx/c) \quad (2.11)$$

$E_x$  คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง  $x$

$E_0$  คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดในทิศทาง  $x$

จากสมการที่ (2.11) แสดงถึงคลื่นแสงผ่านตัวกลางในทิศทาง  $x$  ด้วยความเร็ว  $c/n$  ซึ่ง  $E$  จะลดลงด้วยปริมาณ  $\exp(-\omega kx/c)$  และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$I \propto E E^* \quad (2.12)$$

ดังนั้นจะได้

$$I \propto E_0^2 \exp(-2 \pi kx/c)$$

หรือ

$$I = I_0 \exp(-4 \pi kx/\lambda)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.13)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ  $4\pi kx/\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ; ( $\text{cm}^{-1}$ )

$I$  คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง  $x$  ; ( $\text{w}/\text{cm}^2$ )

$I_0$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบ ; ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ ; (nm)

จากสมการที่ (2.13) เขียนใหม่ได้เป็น (2.14)

$$\alpha = 1/I (dI/dx) \quad (2.14)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.14) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

### 2.2.2.5 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [1,2,4,5]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยการพิจารณาจากโครงสร้างแถบพลังงานเป็นหลักในกรณีที่มีอิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปในแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งเรียกว่าการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก). โดยสารกึ่งตัวนำ CdS มีการย้ายสถานะพลังงานแบบอ้อม และการย้ายสถานะพลังงานแบบต้องห้าม โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออปติคอลเมทริกซ์อิลิเมนต์

(optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่กล่าวคือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้ามและถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดอ้อม

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งแบบอ้อมและแบบต้องห้ามได้ ดังนี้ คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดอ้อมแบบตรง

$$\begin{aligned} (\alpha h\nu) &= (sc\hbar/m)(2\mu/\hbar^2)^{3/2} |H_{cv}(0)|^2 (h\nu - E_g)^{1/2} \\ &= A (h\nu - E_g)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$\begin{aligned}(\alpha_{hv}) &= (sc\hbar/n)(2\mu/\hbar^2)^{5/2}|H_{cv}(0)|_{k=0}(h\nu-E_g)^{3/2} \\ &= A A (h\nu - E_g)^{3/2}\end{aligned}\quad (2.16)$$

โดยที่  $\mu$  คือ มวลลดทอน ( reduced electron-hole mass )

$H_{cv}$  คือ ออปติคอลเมตริกอิติเมนต์ ( optical matrix element ) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำ

$E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$h\nu$  คือ พลังงานโฟตอน

### 2.2.2.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [1,2,4,5]

สำหรับการทดลองของเรานี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง (transmission : %T) ผ่านสารตัวอย่าง โดยที่พิจารณาจากแสงที่ตกกระทบ (II) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $d$  และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (It) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = I_t/I_i = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) / [1 + R^2 \exp(-2\alpha d)] \quad (2.17)$$

$$R = I_r/I_i = [(n-1)^2 + K^2] / [(n+1)^2 + K^2] \quad (2.18)$$

โดยที่  $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

$R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$I_i$  คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบาง

$I_r$  คือ ความเข้มของแสงตกกระทบฟิล์มบาง

$d$  คือ ความหนาของฟิล์มบาง

$n$  คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

$K$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสารตัวอย่างมีความหนาแน่นมากพอที่  $R^2 \exp(-2\alpha d)$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการ (2.17) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าทอม  $(1-R)^2$  มีค่าคงที่และสมการที่ (2.19) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.20)$$

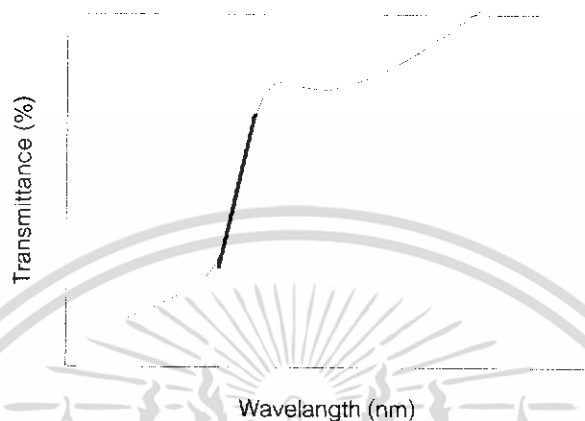
ค่าคงที่ในสมการที่ (2.20) ยังมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นฐาน ( $\alpha_0$ ) ที่เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า  $\alpha$  จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้นเพื่อให้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (2.4) และเราสามารถหาค่า  $E_g$  ได้จากสมการที่ (2.13) หรือ (2.14) หรือทำได้โดยการลากเส้นตรงโดยประมาณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha^2$  กับ  $h\nu$  ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า  $E_g$  นั้นเองและลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเฉียง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข)

#### 2.2.2.7 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง[1,2,4,5]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.22 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ )  
วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้น  
ทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
( $\alpha$ )ของสารกึ่งตัวนำ จะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.22 แสดงภาพ  
จำลอง เมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลง  
แบบ เอ็กโปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมาก  
จะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.21)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.22)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  
โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจาก  
การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การ  
ดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของ  
แผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่  
ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการ  
ดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.23)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.23) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.24)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.24) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

### 2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้า [1,2,6]

จากทฤษฎีแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 eV พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

#### 2.2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล [1,2,6]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :  $J$ ) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field :  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

จาก  $\mu = v_d / E$  ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = nq \mu_n + n_p \mu_p \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\mu_n$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) กับสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity :  $\rho$ ) มีค่าเป็น  $= 1$  ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามักมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$\rho = 1/q (\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.26)$$

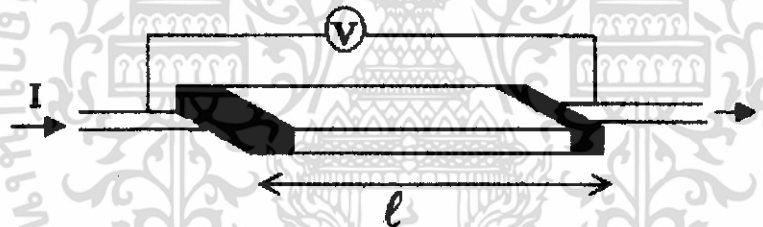
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [6-7]

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้ส่วนตัวของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่กล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

#### 2.2.2.2.1 วิธีวัดโดยตรง ( direct method ) [6-7]

โดยทั่วไปแล้วการวัดค่าความต้านทานรวมของสาร แล้วถึงมาคิดความยาวพื้นที่หน้าตัดของสารที่ต้องการวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น ทรงกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมกันซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยวิธีวัดโดยตรง

จากค่าที่ทราบ คือ กระแสและศักย์ไฟฟ้านี้นำมาคำนวณหาความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่วัด

$$R = \rho l / A \quad (2.27)$$

$$\rho = R(A/l) = (V/I)(A/l) \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

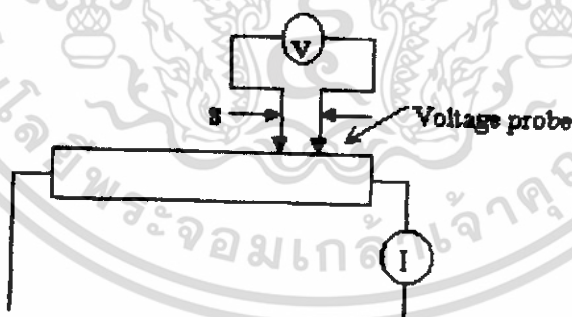
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วยกัน

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัด โดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นเป็นกระแสไอห้่มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่ได้มีคุณสมบัติไอห้่มมิกที่ดีแสดงว่าจะต้องมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้า (หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงๆของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองใกล้เคียงกัน ความต่างศักย์ที่วัดได้จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริงซึ่ง หมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสไอห้่มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์เพราะที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่คืนั้น จะตรวจสอบได้ยากกว่าจึงแก้ไขได้ด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงๆ ถ้าทำเช่นนี้ค่าความผิดพลาดก็จะน้อยมาก

### 2.2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น ( linear two point probe method )

[6,7]



รูปที่ 2.24 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับวิธีวัด โดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบสิ่งสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้ คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสารตัวอย่าง เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้าและกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนน้อยบริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าคือพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้า – ออกจะต้องมีค่ามากกว่า 3 เท่า ( $I/A > 3$  เมื่อ  $I$  คือ ระยะห่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส) ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการคือ โครงสร้างผลึก ว่ามีโครงสร้างชนิดใด

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายตำแหน่งนี้สามารถแยกความต้านทานจำเพาะที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

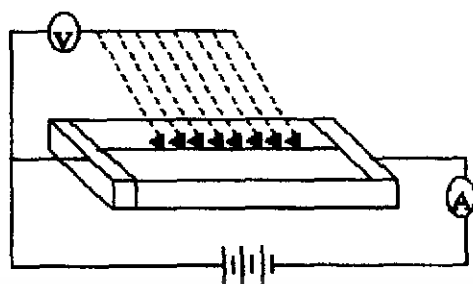
#### สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้น

- วัดศักย์ที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า-ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์บนสารกึ่งตัวนำนั้นจะต้องเป็นโลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น พลาตินัม ทังสเตน เงิน เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่างจะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่างที่กำลังวัดอยู่บนระนาบใดหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องเป็นผลึกสมบูรณ์มีเกรนขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรนที่ผิวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งก้อนผลึก

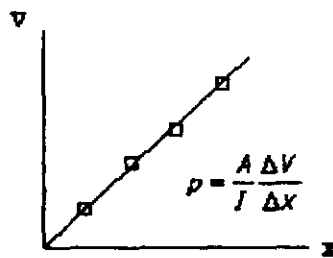
#### ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลาย ๆ จุดจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้น ๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์สม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะใช้วิธีครั้งที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ ๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.25(ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.25 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

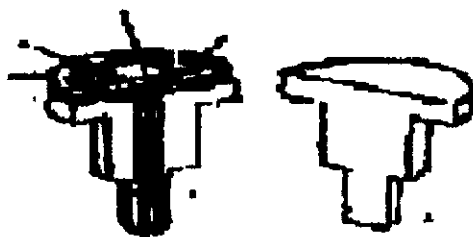
(ก) แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีการเลื่อนขั้วไฟฟ้า

#### 2.2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe method)

[6-7]

วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้นเป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลายและเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรม วิธีนี้ได้ใช้กันมานานประมาณ 70 กว่าปีมาแล้ว ซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่เป็นวิธีที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่างๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้าออกตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนเลสที่มีลักษณะเส้นเหล็กและแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกัน จัดให้ห่างเท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน ลักษณะของหัววัดสี่ขั้วเชิงเส้นดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.26 เป็นตัวอย่างอันหนึ่งของรูปหัววัดซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่าๆกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

(ก) โครงสร้างภายในของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

(ข) ส่วนประกอบหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นที่สมบูรณ์

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะจะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริงๆแล้วจะใช้การหาค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการของปัวซอง (Poissons equation) ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาของสูตรคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความต้านทานจำเพาะ โดยทั่วไปแล้ว จะหาได้จากกระแสไหลเข้าไปในสารตัวอย่างและวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีการดังกล่าวเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการวัดกระแสจะต้องให้ลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานจำเพาะ ด้วยวิธีหลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้น สูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ กล่าวคือ

- 1.) ขั้วทั้งสองจะต้องมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.) สารตัวอย่างทรงปริมาตรขั้วทั้งสองจะตั้งอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งวงกลม (hemisphere) โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิตเมื่อการฉีดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่างจะสามารถหาศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะใดๆ ได้

$$V = K / r \quad (2.29)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะใดๆที่จะหาศักย์ที่จุดที่ให้กระแสและ  $K$  คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของกระแสที่ฉีดเข้าไปและรูปร่างของสารตัวอย่าง

### 2.2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้ว หรือสี่ขั้วเชิงเส้น [6-7]

ถึงแม้ว่าการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เป็นวิธีที่มาตรฐานมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่มีข้อควรคำนึงถึงก่อนที่จะทำการวัดสารตัวอย่างชนิดต่างๆซึ่งพอจะสรุปเป็นข้อย่อๆ ได้ดังนี้

#### 1. ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้จะรวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่างเข้าได้ด้วย ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่วางหัววัดได้และรูปทรงของสารตัวอย่างจะมีความสม่ำเสมอหรือมีรูปทรงทางเรขาคณิต เพราะความยาวและพื้นที่หน้าตัดมักจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเสมอ

#### 2. การรั่วไหลของกระแส

การรั่วไหลอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบ และ บริเวณฐาน อันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจจะเกิดจากความผิดปกติทางผลึกภายในอีกด้วย

#### 3. อุณหภูมิ

- สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น โลหะมีผลกระทบน้อยกว่าฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมีผลควรทำการวัดหลาย ๆ จุดและจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้น ๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมตักย์สม่ำเสมอ
- บนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะใช้วิธีที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ ๆ โดยมีมาตรฐานบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

#### 4. แสง

ขณะทำการวัดควรจะมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระเกิดขึ้นได้ ส่งผลทำให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกัน แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้สารตัวอย่างทำให้วัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าผิดพลาดได้

#### 5. ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า

ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้าจะหลีกเลี่ยงได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อยสำหรับสารตัวอย่างจำพวกโลหะแต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นจึงพยายามวัดในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

#### 6. ผิดสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นกับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ มักจะมีแรงดันคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วสัมผัส แรงดันนี้มักจะดันการไหลของกระแสทำให้เกิดข้อผิดพลาดการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดสอบและเลือกชนิดของโลหะที่ใช้มาเป็นขั้วสัมผัสเสียก่อนค่าที่ได้จะเป็นที่ยอมรับ การทดสอบความต้านทานขั้วสัมผัสมักจะพิจารณาจากความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส

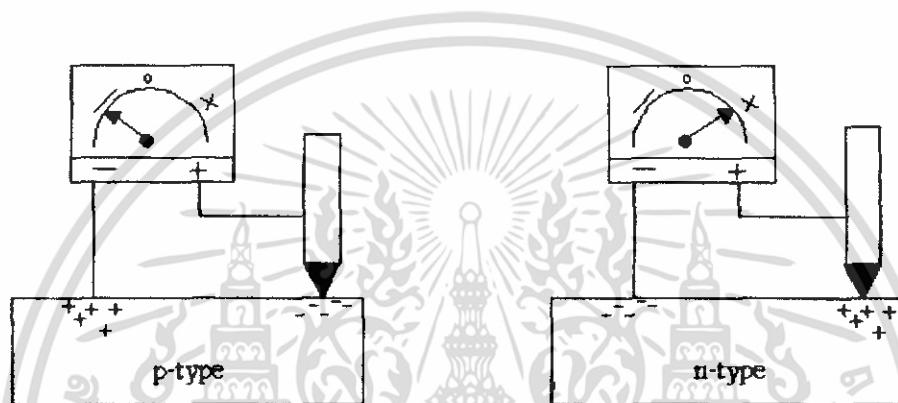
ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้บางอย่างอาจหลีกเลี่ยงได้ บางอย่างก็อาจหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของสารตัวอย่างจากหลักโดยทั่วไปแล้วควรจะต้องวัดหลายๆครั้งที่เงื่อนไขเดียวกันและวัดหลายๆวิธี เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนมากที่สุดและเชื่อถือได้ และในการแสดงค่าความต้านทานของสารตัวอย่างมักจะบอกคู่ไปกับค่าที่วัดว่าวัดด้วยวิธีอะไร

#### 2.2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยการใช้วิธีขั้วความร้อน (hot probe) [1-2]

วิธีขั้วความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือจี้หัวแรงบักกริลงไปตรงบริเวณที่ปรากฏเป็นรอยค่างของผิวหน้าฟิล์มบาง รอยค่างนี้เกิดจากบริเวณที่กระเจกเสียบเข้ากับแท่งเทพลอน ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มจึงเคลือบไม่ติด โยงสายไฟจากหัวแร้งเข้ากับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกฟิล์มบางนั้นจะเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าฟิล์มบางเป็นชนิดพีเข็มโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษเป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี พร้อมทั้งทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบางนั้นจะศึกษาถึง โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และศึกษาการส่งผ่านแสง ตลอดจนทำการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและนอกจากนี้ยังทำการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

#### 3.1 เตรียมการสร้างเครื่องมือสำหรับการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี

##### 3.1.1 สร้างบอร์ดการควบคุมเครื่องมือ

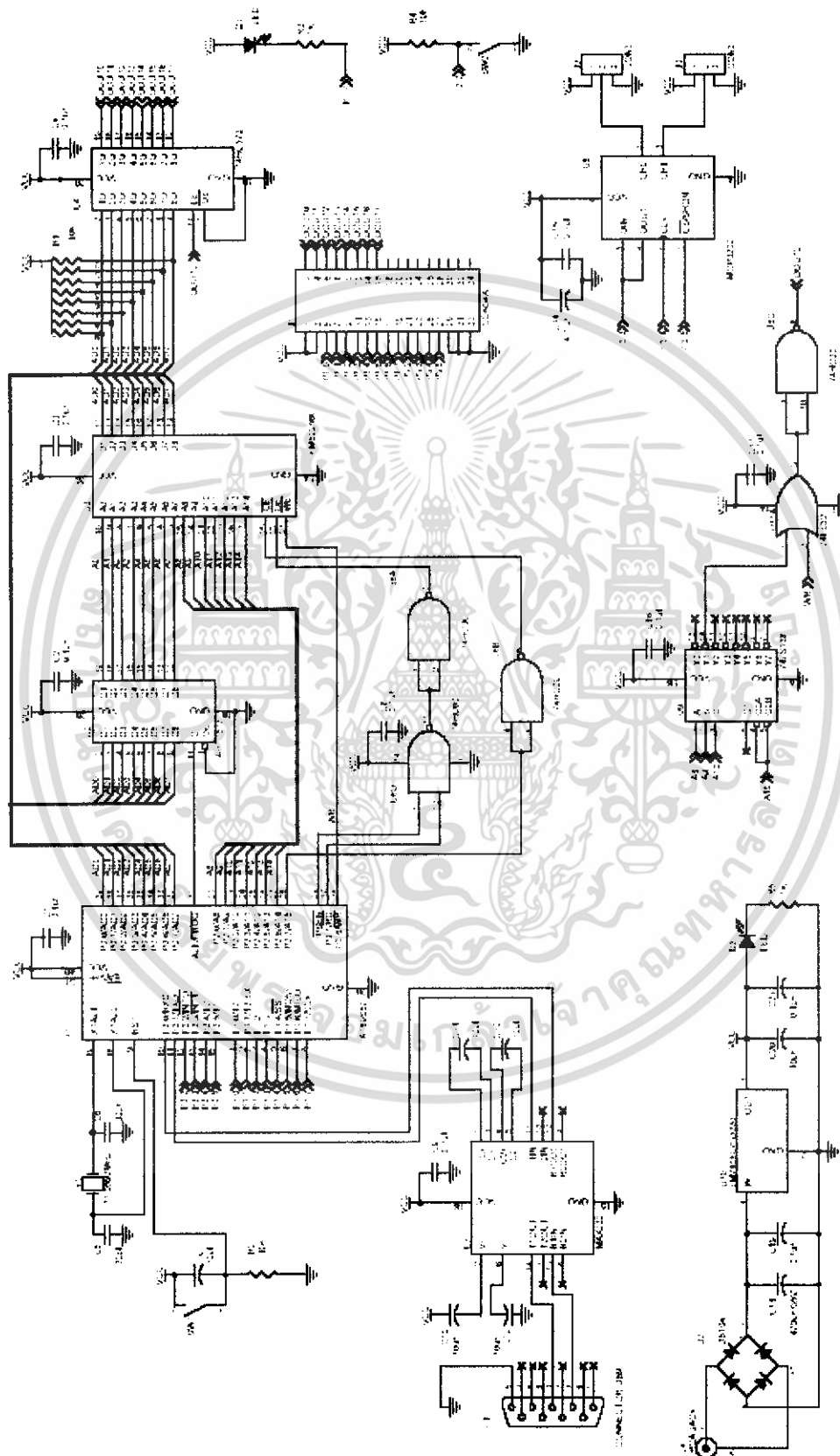
##### 3.1.1.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51[11]

##### อุปกรณ์

Item	Quantity	Reference Part
1 11	C1,C2,C3,C4,C8,C9,C14, C15,C17,C19,C21	0.1uF
2 2	C5,C6	30pF
3 6	C7,C10,C11,C12,C13,C18	10uF
4 1	C16	470uF/35V
5 1	C20	4.7 uF
6 1	D1	DB104
7 1	D2	LED
8 1	J1	CON34A
9 2	J2,J4	CON3
10	1	J3 RCA JACK
11	1	P1 CONNECTOR DB9
12	2	R2,R1 10K
13	1	R3 1K
14	1	SW1 SW KEY-YM061
15	1	U1 AT89S52 // don't sale
16	1	U2 74HCT573
17	1	U3 KM62256C
18	1	U4 74HC573
19	1	U5 74HC00
20	1	U7 MAX232
21	1	U8 MCP3202 // don't sale
22	1	U9 74LS138
23	1	U10 LM7805C/TO220
24	1	U11 74LS33
25	1	Y1 11.0592MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

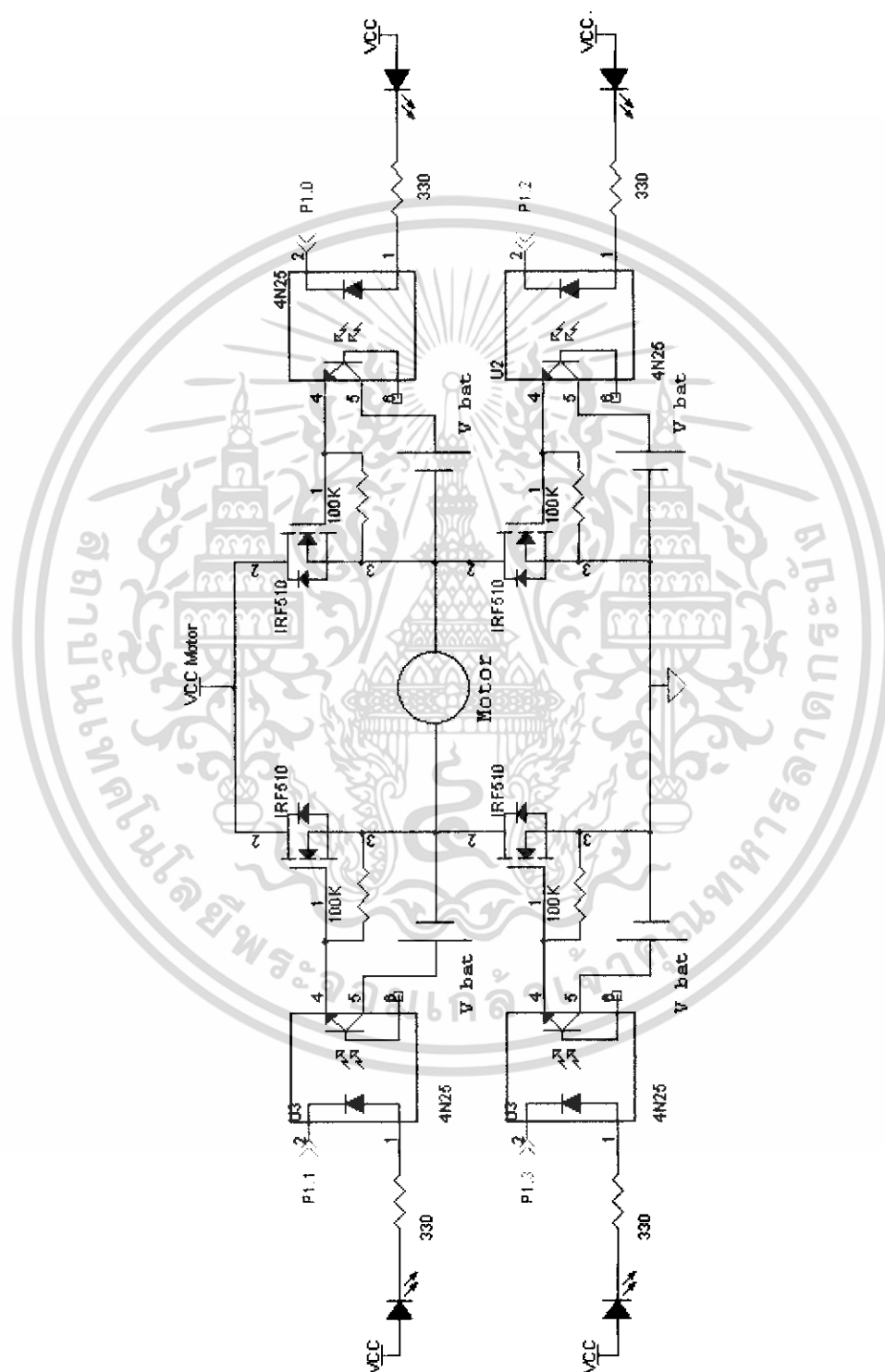
## การต่อวงจร[10]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.2 บอร์ดควบคุมมอเตอร์กระแสตรง[12]

#### การต่อวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์[1]

อุปกรณ์หลัก คือ แท่นยึดแผ่นรองรับทำจากเทฟลอน (Teflon) ซึ่งเซาะร่องไว้ประมาณ 8 ร่องและเจาะรูตรงกลางสำหรับเสียบแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวคิงและใส่แท่งแก้วดันเพื่อใช้เป็นแกนยึด โดยแท่งแก้วถูกยึดอยู่กับแกนจับของเครื่องมือที่ใช้สำหรับการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี ที่ต้องมีการกำหนดอัตราเร็วของการจุ่มขึ้น-ลง ให้คงที่สม่ำเสมอคือ 8 เซนติเมตรต่อ 1 นาที และจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายเคมีอยู่ 150 ml การเตรียมฟิล์มบางจะทำการควบคุมความเร็วในการจุ่มขึ้น-ลง ให้มีอัตราคงที่ (8 เซนติเมตรต่อ 1 นาที) นอกจากนี้ยังใช้เครื่องอัลตราโซนิก มาช่วยในการกำจัดคอลลอยด์ที่ไม่ต้องการ ซึ่งติดอยู่บนฟิล์มบางที่เตรียมได้บนแผ่นรองรับ โดยที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์แสดงดังตารางที่ 3.1 สารตั้งต้นต่างๆจะถูกเทลงในบีกเกอร์ที่เติมน้ำปลอดประจุจนมีปริมาตรของสารละลายทั้งหมดเป็น 150 ml โดยที่ให้

- ความเข้มข้นของ  $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$  = 0.01 M
- ความเข้มข้นของ  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  = 0.05 M
- ความเข้มข้นของ  $\text{NH}_3(25\%)$  = 1.5 M
- ความเข้มข้นของสารเจือ  $\text{AINO}_3$  เป็น 10% และ 20% ของความเข้มข้นของ  $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$  นั่นคือ 0.02 และ 0.04 ตามลำดับ
- กรดสแตียริก = 0.5 g

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมีในบีกเกอร์ที่มีปริมาณของสารละลายเท่ากับ 150 ml

สารตั้งต้น	ปริมาณ (g)
$\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$	0.3845
$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$	0.5706
$\text{NH}_3(25\%)$	16.83 ml
$\text{AINO}_3$ 10%	0.02
$\text{AINO}_3$ 20%	0.04
กรดสแตียริก	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การเตรียมแผ่นสไลด์[1]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CdS จะใช้กระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 12 และ 25 mm ซึ่งทำความสะอาดเป็นอย่างดีตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและล้างด้วยน้ำป้อนคประจุ
2. จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene, TCE) เพื่อขจัดคราบไขมัน อะซีโตน (acetone) เพื่อขจัด TCE, เอทานอล (ethanol) เพื่อขจัดอะซีโตนและน้ำป้อนคประจุตามลำดับ
3. นำกระจกสไลด์จากข้อ 2 ไปแช่ในสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กับน้ำป้อนคประจุปริมาตร 10 ml และ 100 ml ตามลำดับ เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำป้อนคประจุอีกครั้ง
4. จากนั้นนำกระจกสไลด์ไปใส่ในน้ำป้อนคประจุ และทำการล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 3 รอบ รอบละ 10 นาที
5. นำกระจกสไลด์ไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที ก็จะได้กระจกสไลด์ที่สะอาดพร้อมนำมาใช้งาน

### 3.2.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์[1]

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมีประกอบไปด้วย  $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$  จำนวน 0.01 M และละลายในน้ำ 10 ml ที่บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 ml,  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  จำนวน 0.05 M ละลายในน้ำ 10 ml ที่บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 ml และ  $\text{NH}_3(25\%)$  จำนวน 16.83 ml บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 ml ในการเจือด้วย  $\text{AINO}_3$  ใช้ปริมาณสารตั้งต้นเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมมีดังต่อไปนี้

1. เสียบกระจกสไลด์เข้ากับแท่นยึดที่ทำจากเทฟลอน แล้วนำไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีแท่งแม่เหล็ก และน้ำป้อนคประจุอยู่ 150 ml ซึ่งบีกเกอร์ตั้งอยู่ในอ่างน้ำบนเครื่องกวนสารละลายที่ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 80°C และปรับความเร็วในการกวนสารละลายเท่ากับ 60 รอบ/นาที
2. ชั่งสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วยเกลือแคดเมียมซัลเฟต  $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$ , ไทโอยูเรีย  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  และ แอมโมเนีย  $\text{NH}_3(25\%)$  ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
3. เมื่ออ่างน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 80°C จึงละลายเกลือแคดเมียมซัลไฟด์, ไทโอยูเรีย และ แอมโมเนียเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เทสารละลายจากข้อ 3 ลงในบีกเกอร์ โดยเทสารละลายเคเคเมียมซัลเฟตก่อน แล้วตามด้วยแอมโมเนีย และไทโอยูเรีย ตามลำดับแล้วทำการวัดค่า pH ของสารละลาย ซึ่งมีค่าประมาณ 11.8 และสังเกตสีที่เปลี่ยนไปของสารละลาย ปล่อยให้ทิ้งไว้ 60 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของอ่างน้ำให้คงที่
5. หลังจากผ่านไป 60 นาที จึงนำแท่นยึดกระจกสไลด์ออกจากสารละลาย ซึ่งจะเกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ และปรากฏอนุภาคของเคเคเมียมซัลไฟด์ ที่จับกันเป็นก้อนเล็กๆเป็นคอลลอยด์อยู่ที่ผิวหน้าฟิล์มบาง
6. นำแท่นยึดกระจกสไลด์ไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุอยู่ประมาณ 200 ml ซึ่งตั้งอยู่ในเครื่องอัตราโซนิคเพื่อทำการเขย่าให้คอลลอยด์ที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าออก เป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการเปลี่ยนน้ำปลอดประจุและเขย่าซ้ำจนผงฝุ่นที่เกาะอยู่หลุดออกหมด
7. นำฟิล์มบางที่ได้มาทำการเคลือบซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 จนครบ 6 ครั้ง จากนั้นนำไปอบในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ให้แห้ง และเก็บในถุงที่ปิดผนึกอย่างดี เพื่อนำไปใช้งานขั้นต่อไป
8. ในการทดลองการเตรียมฟิล์มบางเคเคเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ทำเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบางเคเคเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้มีการเจือ จะแตกต่างกันตรงที่จะทำการเจือด้วยอะลูมิเนียม 10% และ 20% ตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 กล่าวคือนำอะลูมิเนียมมาทำการละลายในน้ำ 10 ml ที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 50 ml แล้วทำการเทสารเจือหลังจากเทไทโอยูเรีย จากนั้นทำตามข้อที่ 1-7 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ต้องควบคุม pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ประมาณ 11.6-11.8
9. นำฟิล์มบางเคเคเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือด้วยอะลูมิเนียม 10% และ 20% ทำการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที
10. นำฟิล์มบางเคเคเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือด้วยอะลูมิเนียม 10% และ 20% ที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ มาทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องยี่ห้อฟิลลิปปี รุ่น PW 1830 โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน  $\text{CuK}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$  โดยใช้กระแสไฟฟ้า 25 mA และแรงดัน 40 kV
11. นำฟิล์มบางเคเคเมียมซัลไฟด์ ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือด้วยอะลูมิเนียม 10% และ 20% ที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ มาทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 nm ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

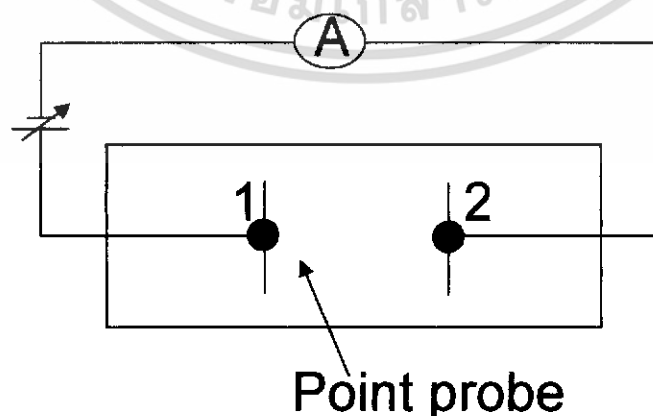
ยี่ห้อจัสโก้ รุ่น 7800 เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ )

12. ในการทดลองทำฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้มีการเจือและเจือด้วยอะลูมิเนียม 10% และ 20% และมีการเติมกรดสเด็คริกลงไป ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 แต่ไม่ต้องนำกระจกสไลด์ลงไปจุ่มในบีกเกอร์สารละลาย
13. หลังจากผ่านไป 60 นาที จึงนำสารละลายออกจากเตา แล้วทำการจุ่มสไลด์ที่มีการเตรียมตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 8 แต่ทำการเคลือบซ้ำแค่ 2 ครั้ง ลงในสารละลายโดยใช้อัตราการจุ่มขึ้น-ลง 8 เซนติเมตรต่อ 1 นาที ทำการจุ่มลงไปประมาณ 5 วินาที แล้วดึงขึ้นจากนั้นทำการเป่าให้แห้งทันที ด้วยไคเป่าผม แล้วทำการจุ่มซ้ำ 3 ครั้ง ทำการเป่าให้แห้งและเก็บในถุงที่ปิดผนึกอย่างดี เพื่อนำไปใช้งานขั้นต่อไป
14. นำไปศึกษาผลตามขั้นตอนที่ 10 และ 11

### 3.2.4 วิธีการวัดความต้านทานแผ่นฟิล์มโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น[1]

#### อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แบตเตอรี่ 1.5 V จำนวน 22 ก้อน
3. อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอด ELH
6. ลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 3.1 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการทดลอง

1. นำฟิล์มบาง CdS ทั้งที่ไม่มีสารแอนนิต และมีการแอนนิตที่ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที นำมาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินแต้มลงบนผิวหน้าของฟิล์มบางจำนวน 2 จุดหรือ 2 เส้น ขนานกันเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า
2. ต่อวงจรดังรูป 3.2 โดยให้มีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ขั้วที่ 1 และ 2 และใช้ขั้วมิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ที่ขั้วที่ 1 และ 2 เช่นเดียวกันและใช้อิเล็กโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR วัดกระแสที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงให้กับวงจร
3. นำแผ่นชิ้นงานใส่แผ่นกอลิ่งโลหะเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวน ทำการจ่ายกระแสให้กับวงจรโดยใช้แบตเตอรี่ก้อนจำนวน 14 ก้อน แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้ว 1 และ 2 ด้วยโวลต์มิเตอร์ และบันทึกค่ากระแสที่ไหลภายในวงจรจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์วัดค่ากระแสได้ในช่วงค่า  $10^{-3} - 10^{-4}$  A
4. เพิ่มค่าแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร โดยการเปลี่ยนแรงดันจากแบตเตอรี่ 1 ก้อน ซึ่งมีค่าประมาณ 1.5 V เป็นแบตเตอรี่ 2 ก้อนต่ออนุกรมกัน ทำให้แรงดันอยู่ช่วง 18 V เปลี่ยนจนกระทั่งแบตเตอรี่ต่ออนุกรมกันครบ 14 ก้อน ซึ่งในการเพิ่มแบตเตอรี่แต่ละครั้งจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นและทำการบันทึกค่าความต่างศักย์และกระแส โดยการวัดค่าความต้านทานและกระแสประมาณ 10 ค่า
5. นำชิ้นสารตัวอย่างออกจากกอลิ่งโลหะ และนำไปฉายแสงด้วยหลอดไฟชนิดฮาโลเจน ELH ขนาด 120 V, 300 W มีค่าความเข้มแสงประมาณ  $100 \text{ mW/cm}^2$  ให้กับฟิล์มบาง โดยแหล่งจ่ายแรงดันยังคงเป็นแบตเตอรี่ก้อน และทำการวัดค่าความแตกต่างศักย์โดยโวลต์มิเตอร์และวัดค่ากระแสด้วยอิเล็กทรอนิกส์
6. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแนวแกน x และความต่างศักย์ในแนวแกน y
7. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์สามารถที่จะหาค่าความต้านทานของฟิล์มบางได้จากสมการ

$$R_s = \frac{V}{I} \cdot (W)$$

$$I \cdot (L)$$

โดยที่ W = ความกว้างของฟิล์มบาง

L = ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 และ 2

V/I = ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

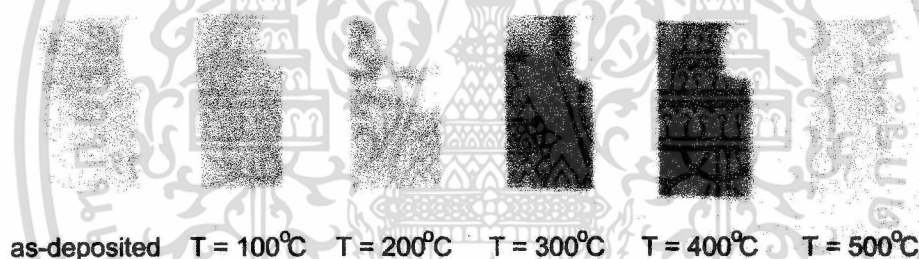
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

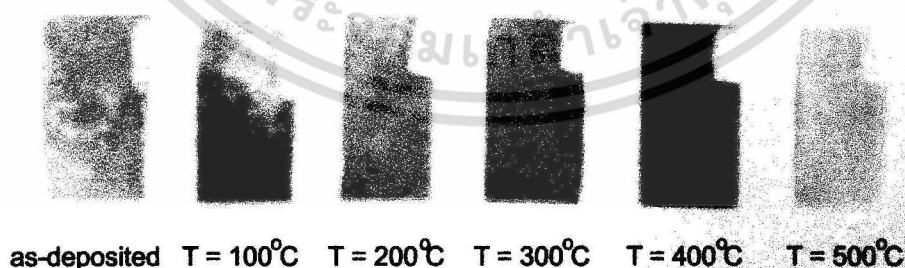
#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียม โดยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมีนั้น พบว่าฟิล์มที่ได้จะยึดเกาะกับกระจกสไลด์ดี และเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ฟิล์มที่มีความหนาแตกต่างกันก็จะมีสีแตกต่างกัน โดยจะมีสีเหลืองจนถึงเหลืองส้มเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการแอนนียลฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสีของฟิล์มจะมีเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มชุดที่ไม่ได้แอนนียล แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 – 4.3

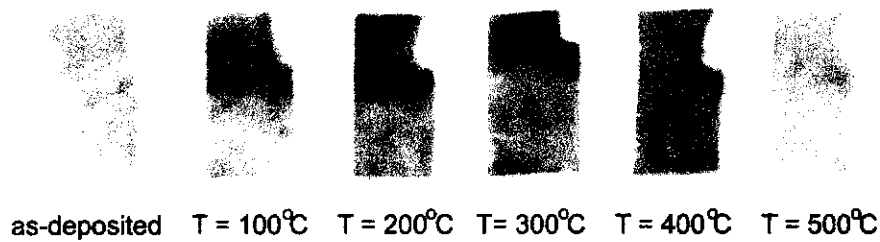


รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อมีการแอนนียลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อมีการแอนนียลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

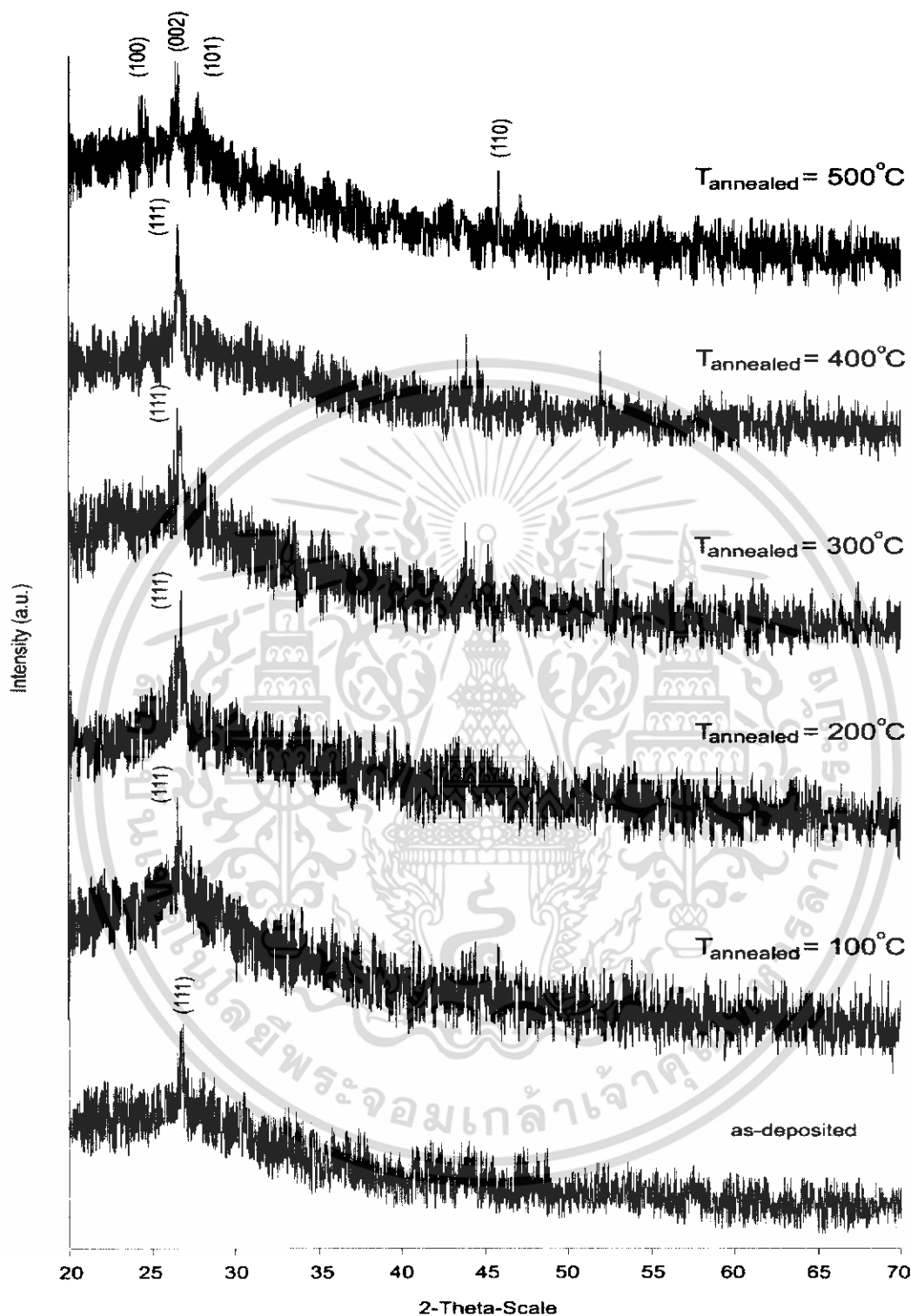


รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

ดังรูปที่ 4.1-4.3 ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่นำไปแอนนัลในบรรยากาศของไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100,200,300,400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากส้มอ่อนไปเป็นส้มเข้มสุดที่อุณหภูมิแอนนัลที่ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเนื่องมาจากอะตอมของซัลเฟอร์ระเหิดออกมา และกลับมาเป็นเหลืองอ่อนที่อุณหภูมิแอนนัลที่ 500 องศาเซลเซียส

#### 4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

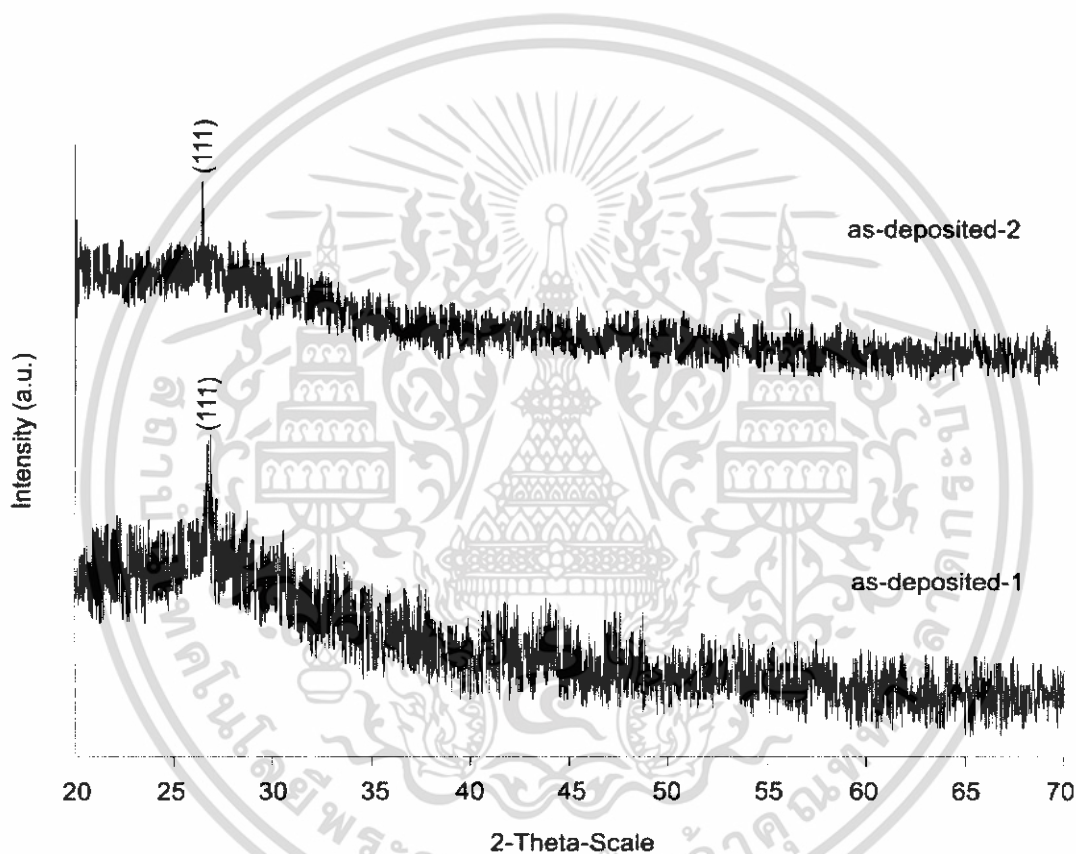
เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของผลึกที่ปรากฏขึ้นและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบใด พิจารณารูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนัล และแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ที่ความหนาเท่ากัน ปรากฏว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่เตรียมด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ ในสารละลายนี้ มีความเป็นผลึกที่ดีพอสมควรสังเกตได้จากลักษณะของพีคความคมชัด และความคมชัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างผลึกที่สังเกตได้จะมีระนาบที่เด่นชัด คือ (111) ซึ่งทำให้เข้าใจได้ว่า ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายเคมี เมื่อยังไม่ได้รับการแอนนัลจะมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยมีระนาบผลึก (111) ที่เด่นเพียงระนาบเดียว



รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมเมื่อไม่มีแอนนีสและเมื่อได้รับการแอนนีสที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความหนาเท่ากัน พบว่าหลังจากที่อุณหภูมิในการแอนนีสเพิ่มมากขึ้นขนาดของพิกที่ระนาบ (111) มีความคมชัดมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดพิกเพิ่มขึ้นที่ระนาบ(100), (101) และ (110) ซึ่งทำให้เชื่อมั่นได้ว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วจะทำให้ความเป็นผลึกสมบูรณ์และเปลี่ยนเฟสจากควิบิกเป็นเฮกซagonal



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ที่ความหนาเท่ากัน เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส

- 1) ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่ไม่ได้มีการเติมกรดสเตียริก
- 2) ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่มีการเติมกรดสเตียริก

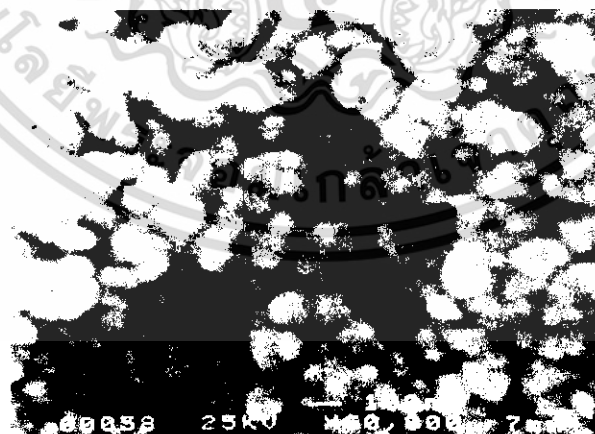
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเติมสารหนืด ก็ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ได้มีการแอนนัล มีการเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

#### 4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM

จากรูป 4.6-4.7 ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีพอสมควร ดังนั้นจึงไม่ต้องฉาบผิวหน้าด้วยฟิล์มของทองคำ พบว่าขนาดของเกรนมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร จากรูปที่ 4.8 คือภาพถ่ายของด้านตัดขวางของกระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่ พบว่าความหนาของฟิล์มมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร

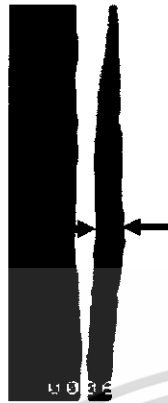


รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่กำลังขยาย 60,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

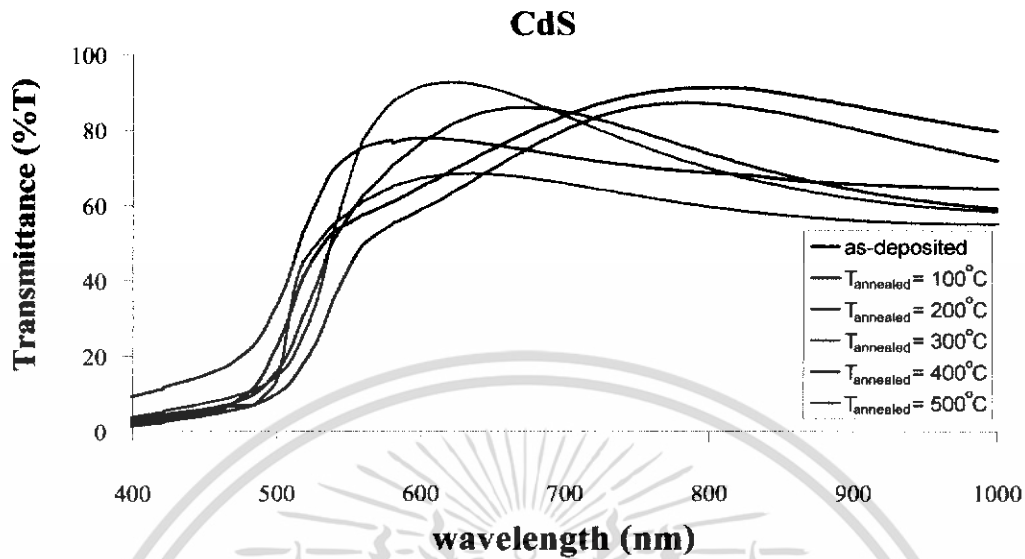


รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายด้านตัดขวางของกระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่ เพื่อวัดความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ซึ่งมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร

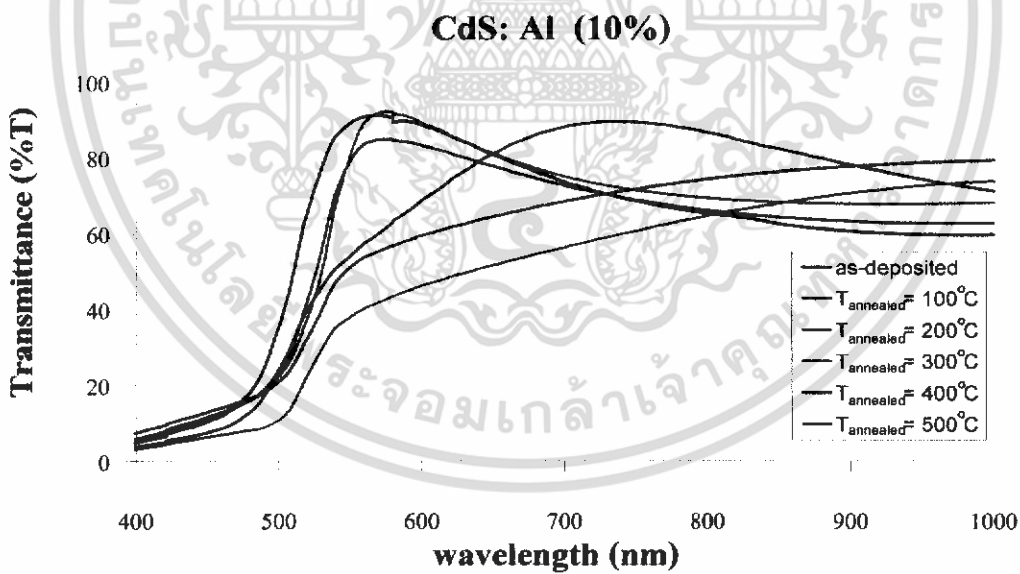
#### 4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษากการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมที่ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาเท่ากัน ทั้งกรณีที่มีการแอนนีกัลและไม่ได้แอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศในโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลแบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 โดยเลือกค่าความยาวคลื่นในช่วง 300-1000 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้แอนนีกัลนั้น แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 470 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านออกมาได้ดี และสำหรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้รับการแอนนีกัลนั้น พบว่าแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 490 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านได้ดี ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่แอนนีกัลและไม่ได้แอนนีกัลนั้น แสงจะสามารถส่งผ่านได้ดีที่ความยาวคลื่นมากกว่า 460 และ 490 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่แอนนีกัลและไม่ได้แอนนีกัลนั้น แสงจะสามารถส่งผ่านได้ดีที่ความยาวคลื่นมากกว่า 490 และ 510 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำเอาฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือและไม่ได้เจืออินเดียมมาทำการแอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที โดยฟิล์มมีความหนาเท่ากัน พบว่าฟิล์มบางที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่แนวโน้มของการดูดกลืนพื้นฐาน จะเคลื่อน ไปยังทิศที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นคล้ายเมื่อมีการเจืออะลูมิเนียมปริมาณมากขึ้น แต่ในฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่แอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 – 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

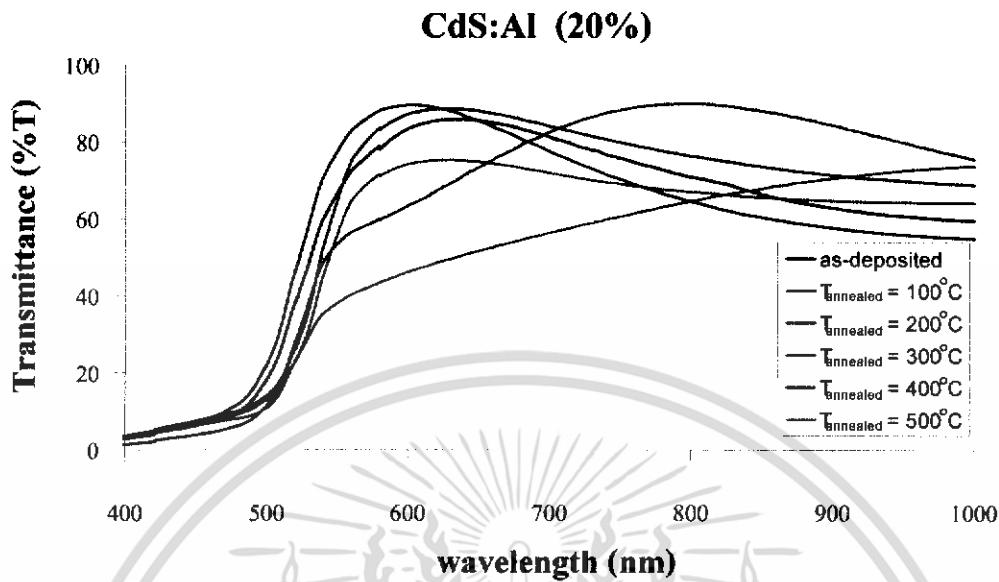


รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส และแอนนีสที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส

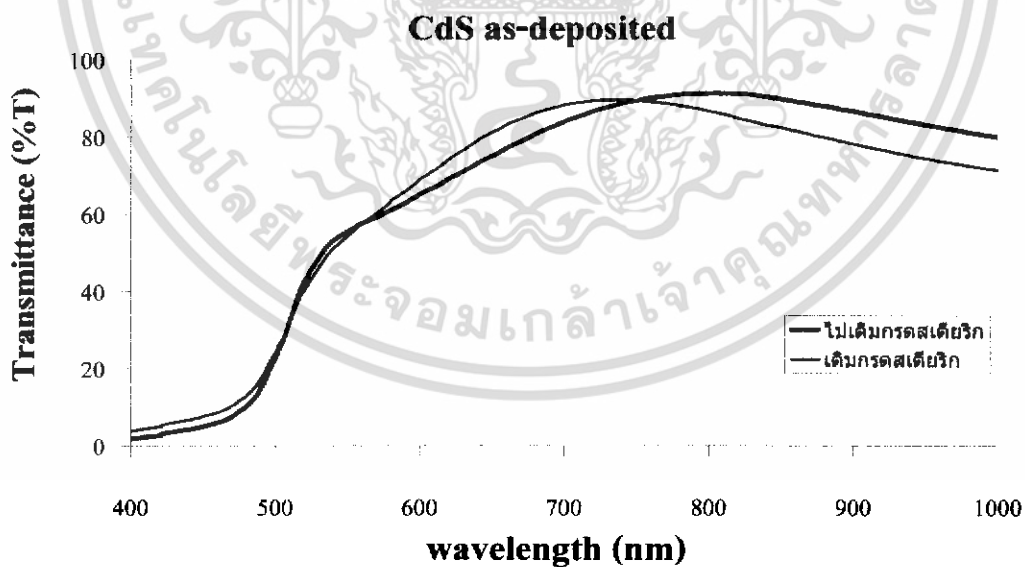


รูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส และแอนนีสที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

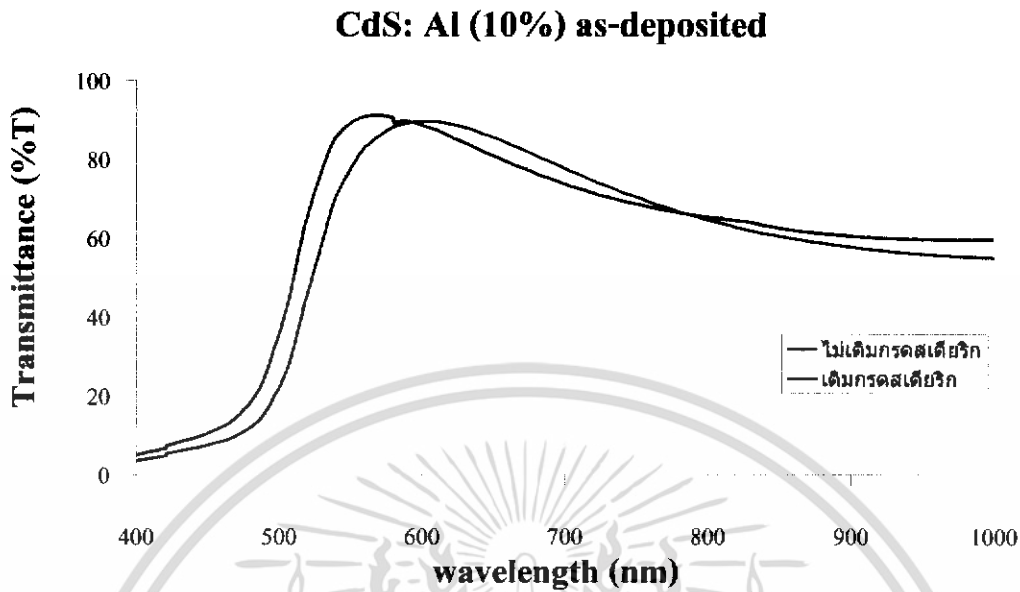


รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

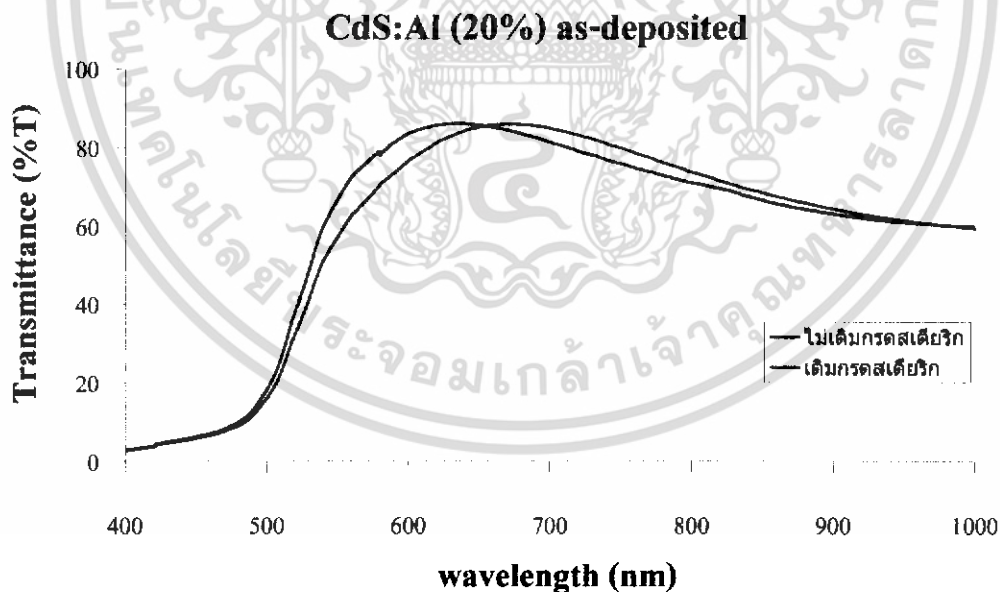


รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการเคมกรดสเดยริกและไม่ได้เคมกรดสเดยริก เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการเติมกรดเตียริกและไม่ได้เติมกรดเตียริก เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสล

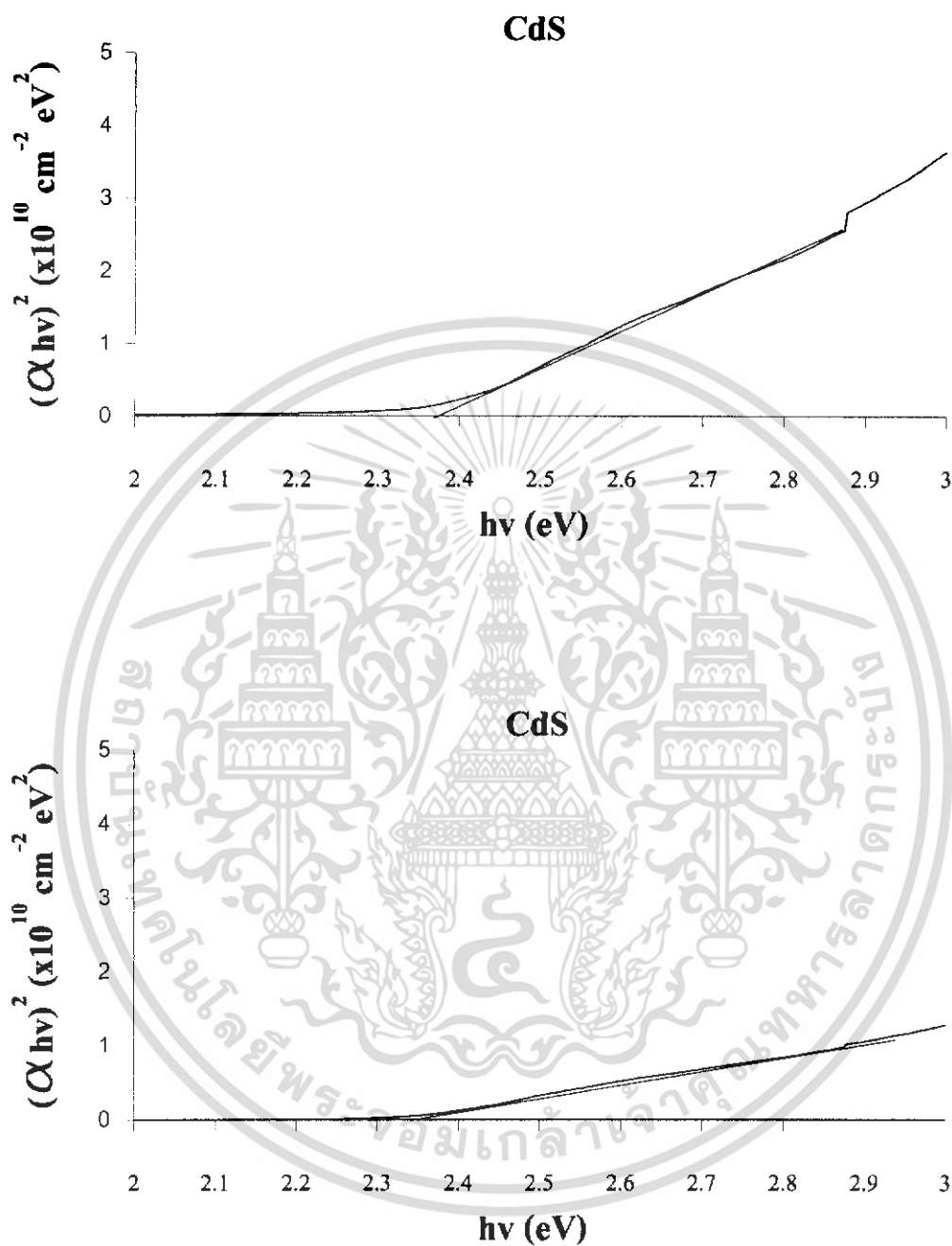


รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการเติมกรดเตียริกและไม่ได้เติมกรดเตียริก เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

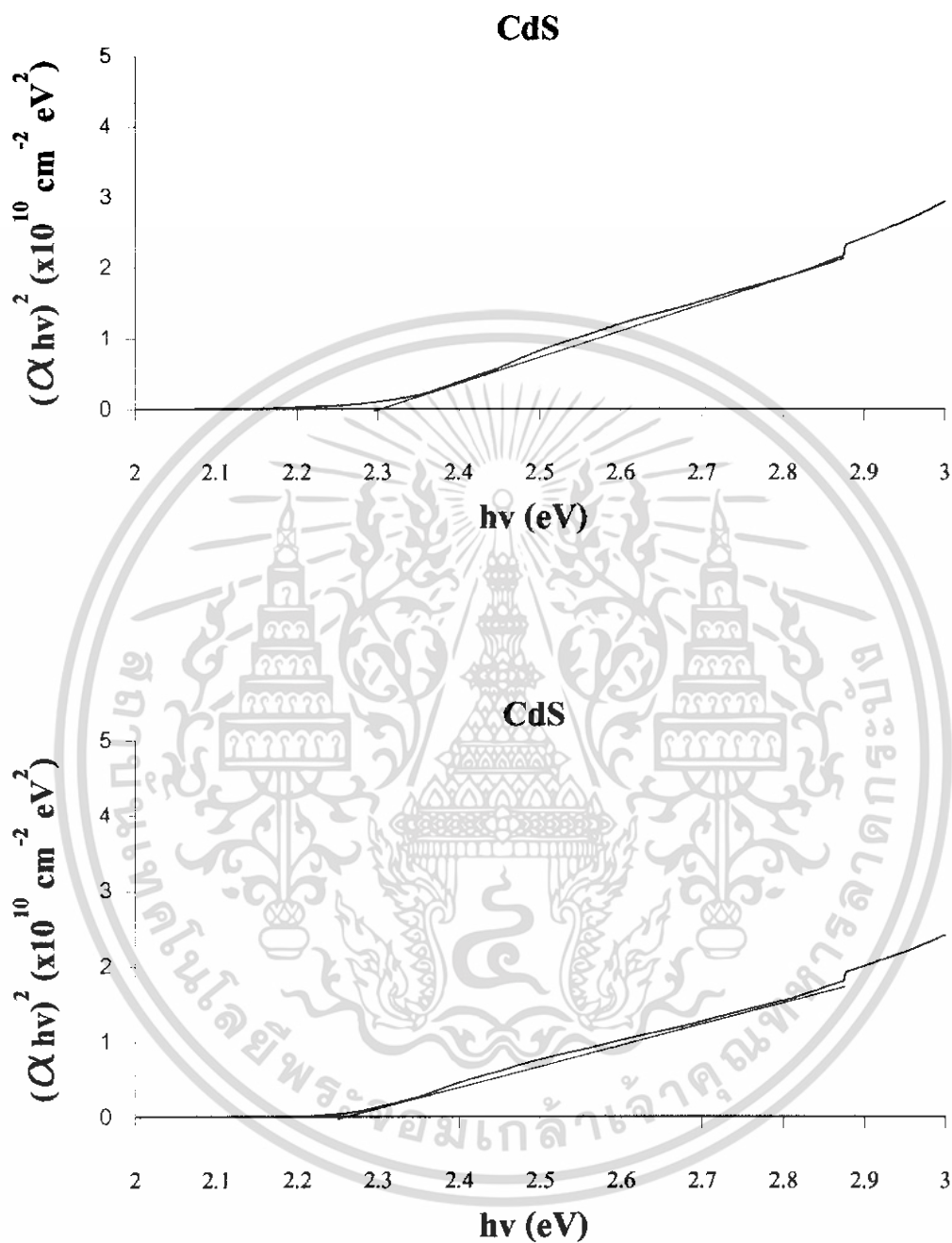
จากการพิจารณารูปที่ 4.12-4.14 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเติมสารสเดยริก ก็ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ได้มีการแอนนัล มีการเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ในขั้นตอนต่อมาเมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.9 – 4.11 มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง( $\alpha$ ) ของฟิล์มบางตามสมการ (2.22) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง ( $\alpha hv$ )<sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.15-4.17 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นแบบตรง และขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) สามารถหาได้จากการประมาณค่าโดยลากส่วนต่อจากบริเวณที่เป็นเชิงเส้น ไปตัดแกนของพลังงานโฟตอน ( $\alpha = 0$  ดังสมการ 2.23) จุดตัดที่ได้คือค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมที่ความหนาเท่ากัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าเมื่อทำการเจืออะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการเจืออะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลง นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ทำการแอนนัลจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำกว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนัลอีกด้วย ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ซึ่งมีความหนาเท่ากัน โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ยกเว้นในฟิล์มบางที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น



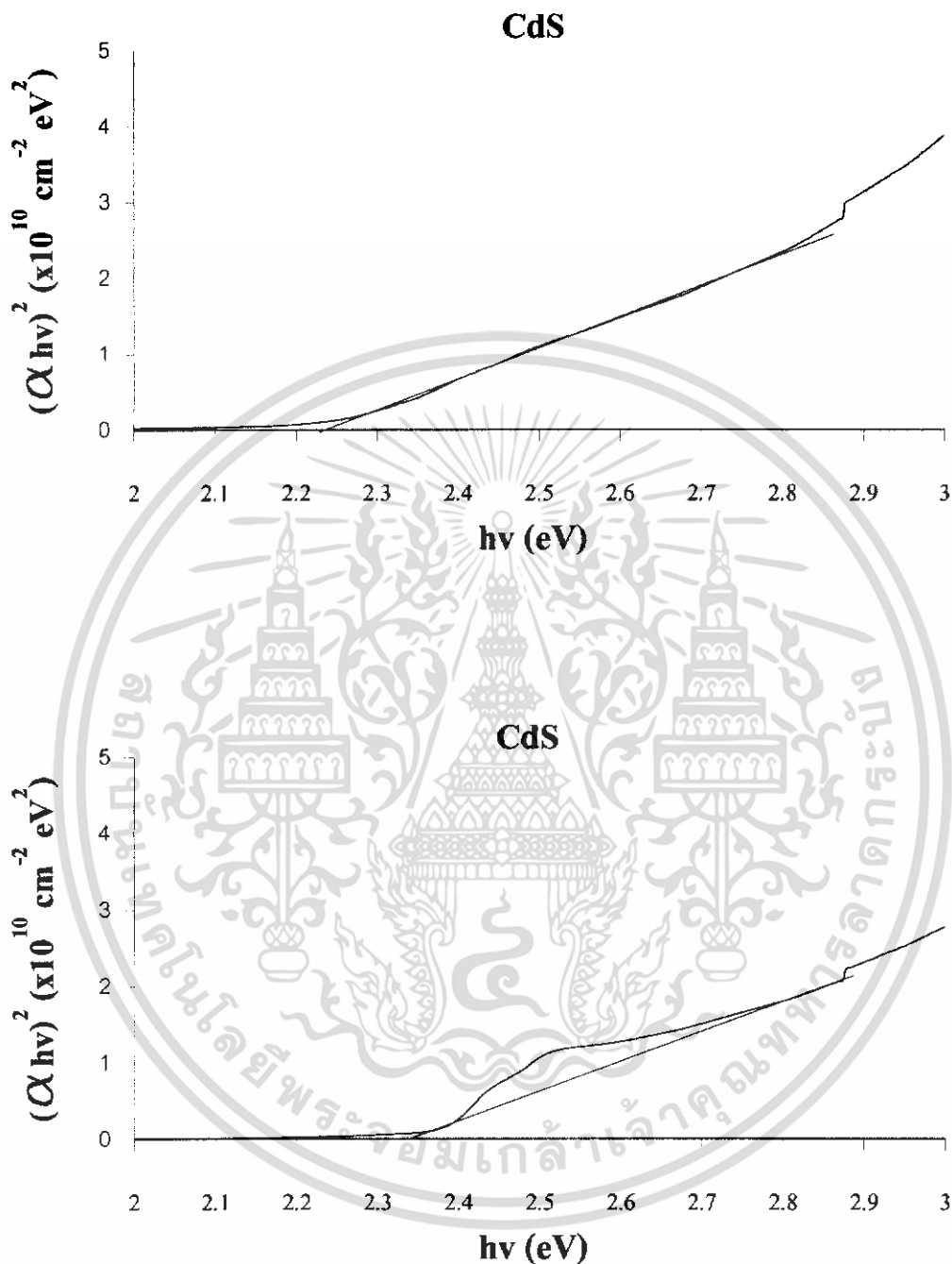
รูปที่ 4.15(ก) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เมื่อไม่ได้มีการแอลนีล และแอนนีลในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



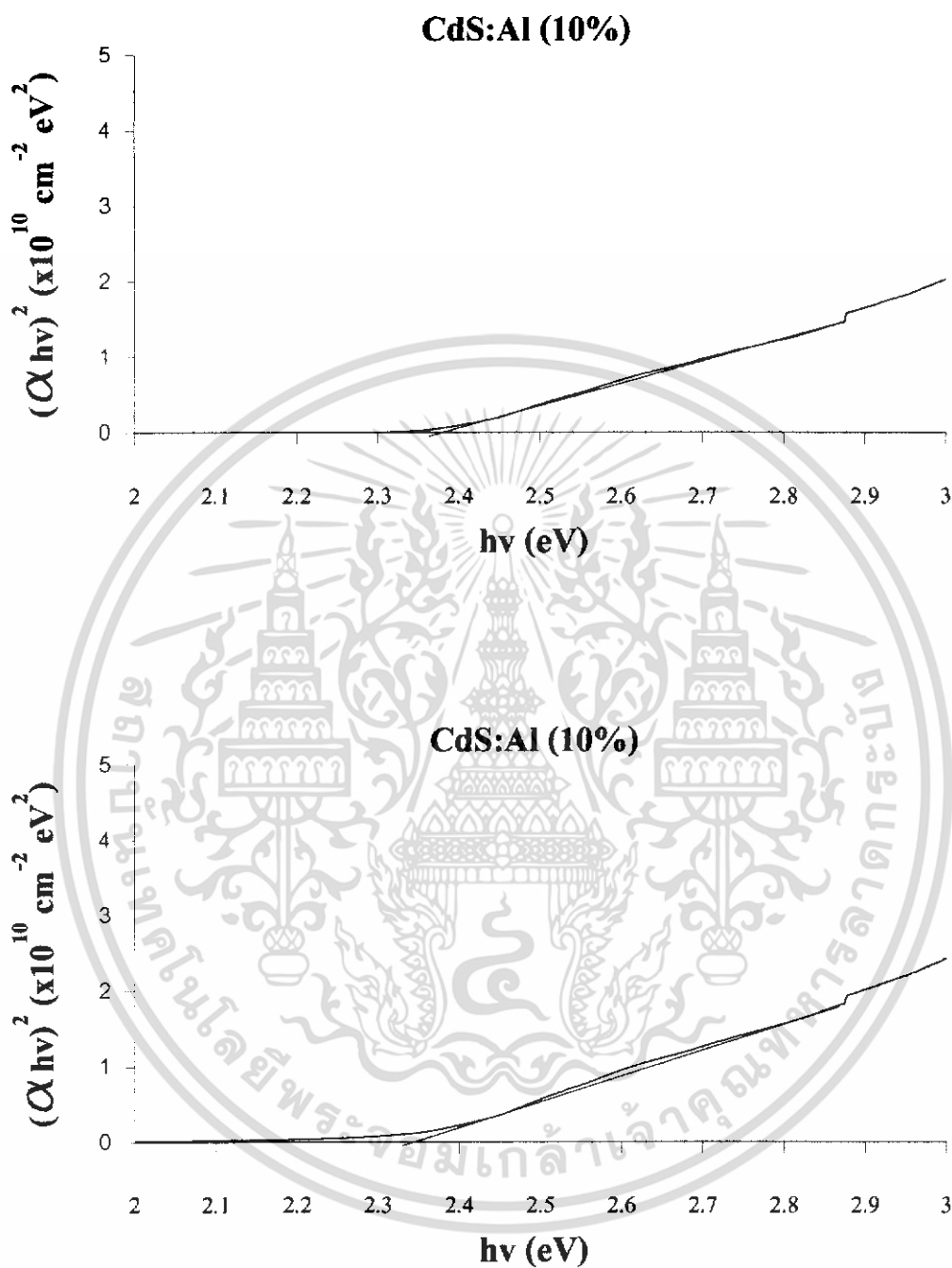
รูปที่ 4.15(ข) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



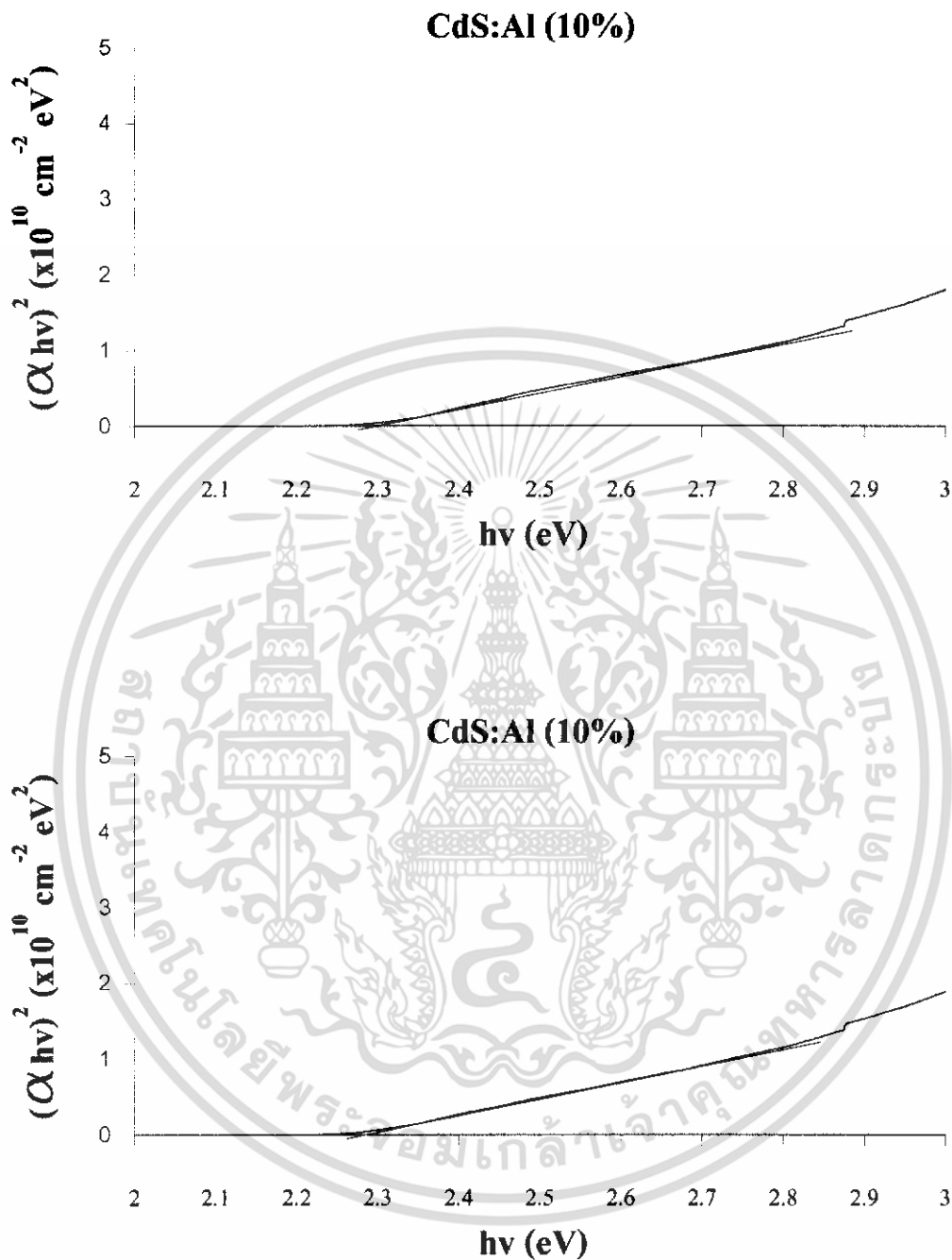
รูปที่ 4.15(ค) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(hv)$  ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



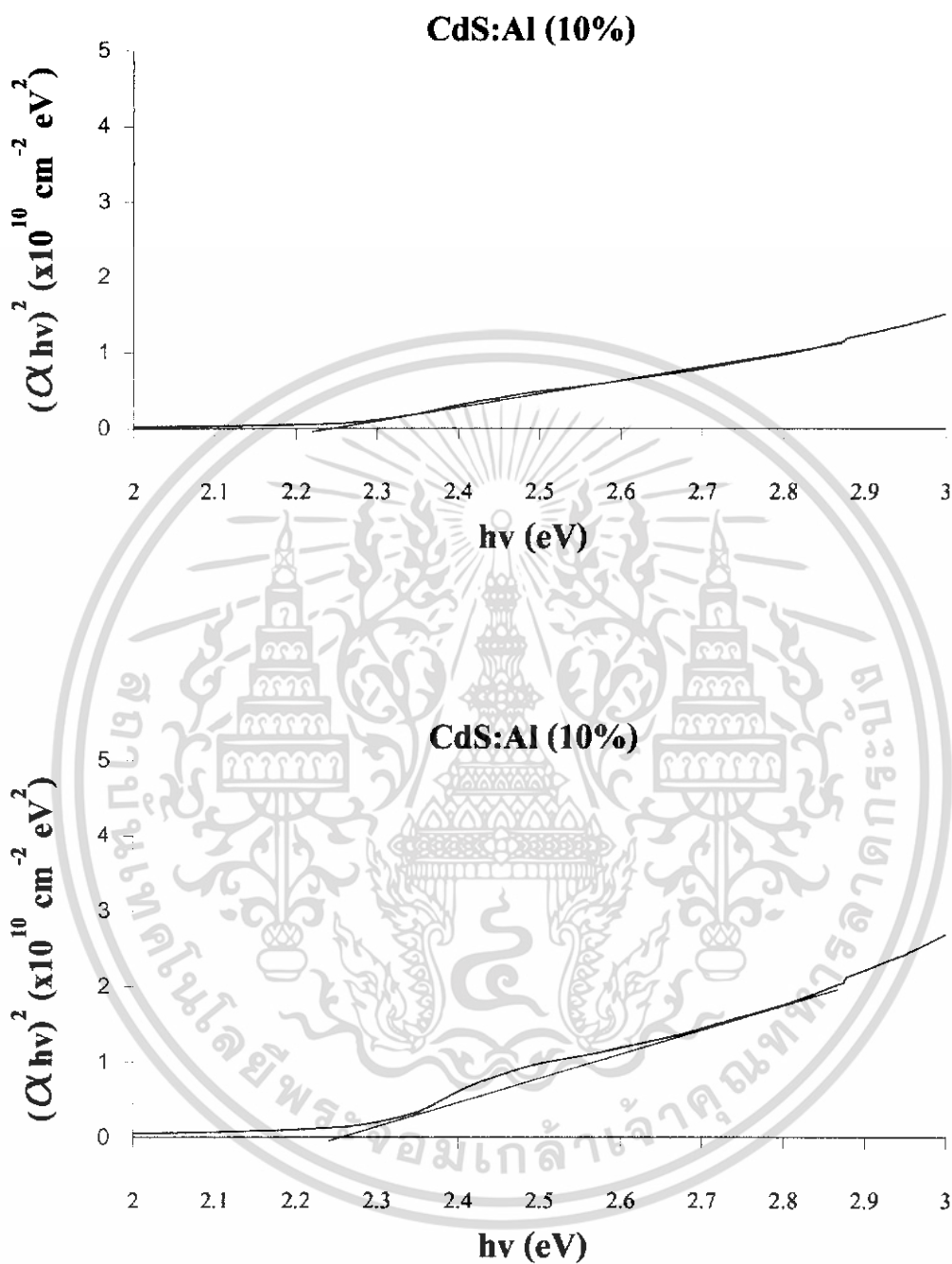
รูปที่ 4.16(ก) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(hv)$  ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอลนีล และแอนนีลในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



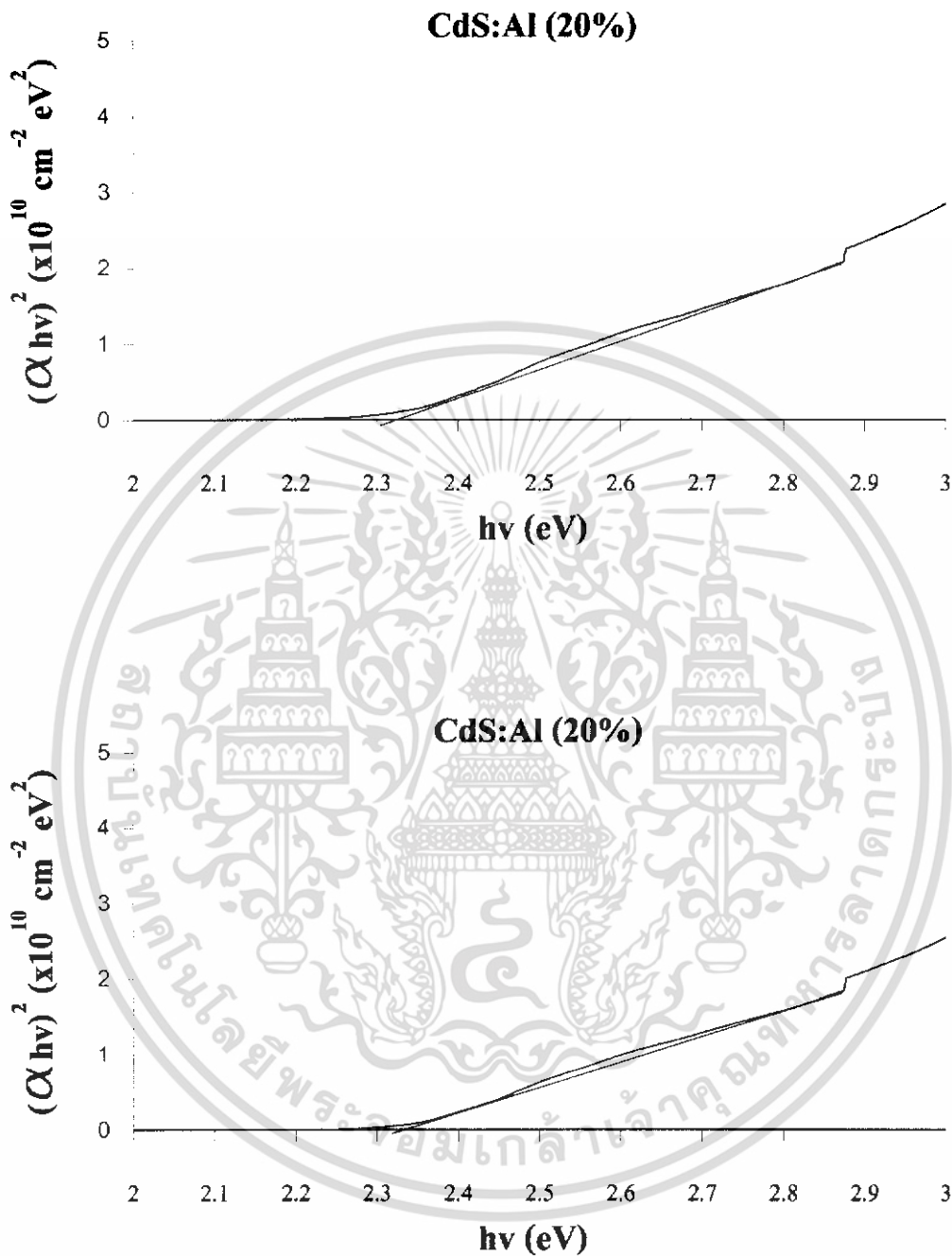
รูปที่ 4.16(ข) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(hv)$  ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการแอนนีกที่ช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



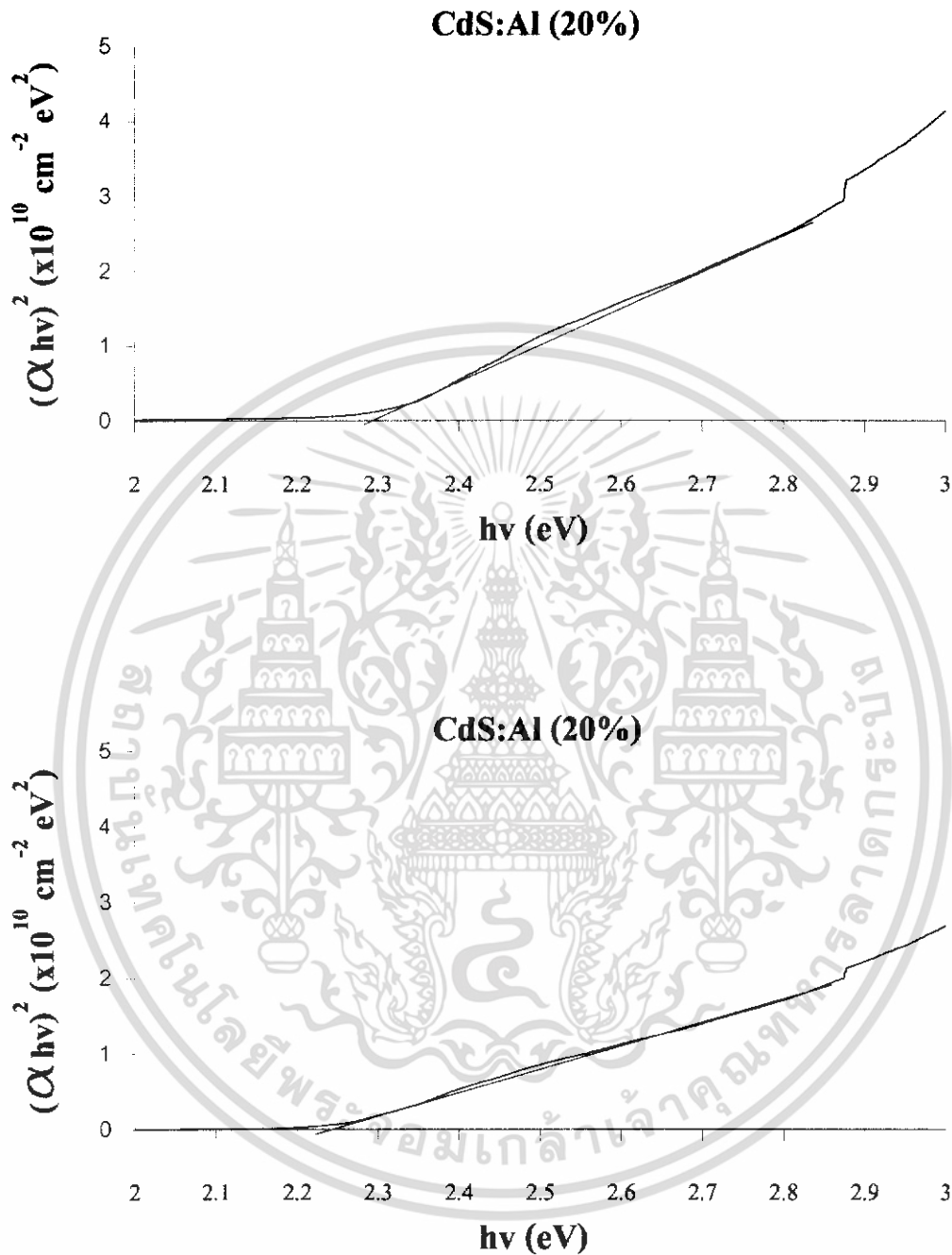
รูปที่ 4.16(ค) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(hv)$  ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการแอนนีกที่ช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



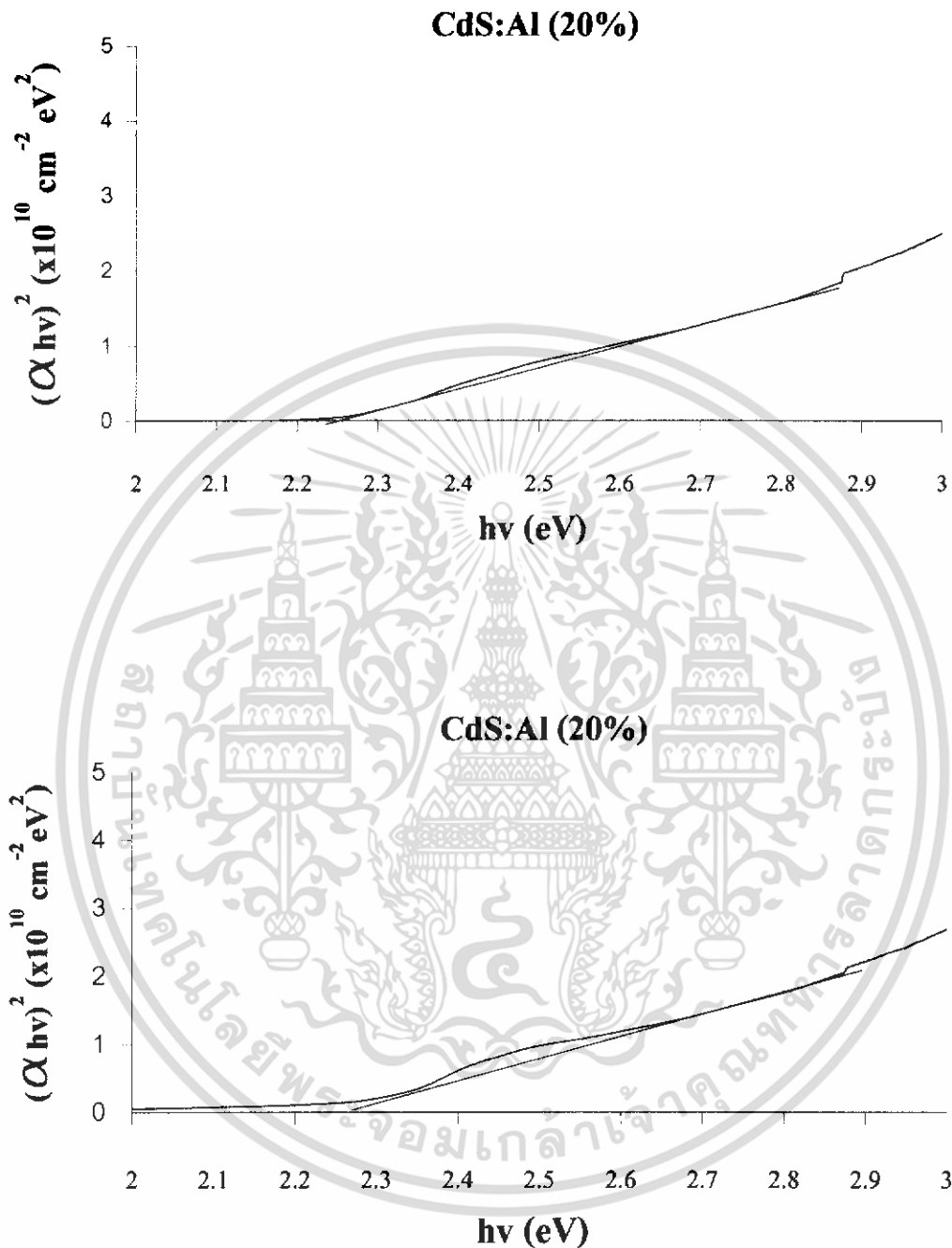
รูปที่ 4.17(ก) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอลนิต และแอนนิตในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17(จ) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการแอนนีกที่ช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



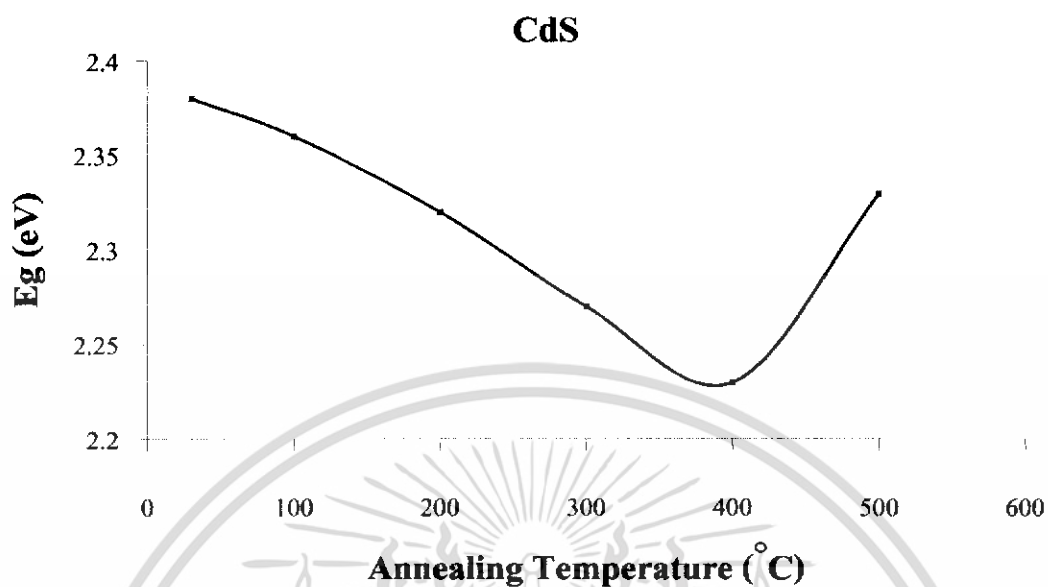
รูปที่ 4.17(ค) แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

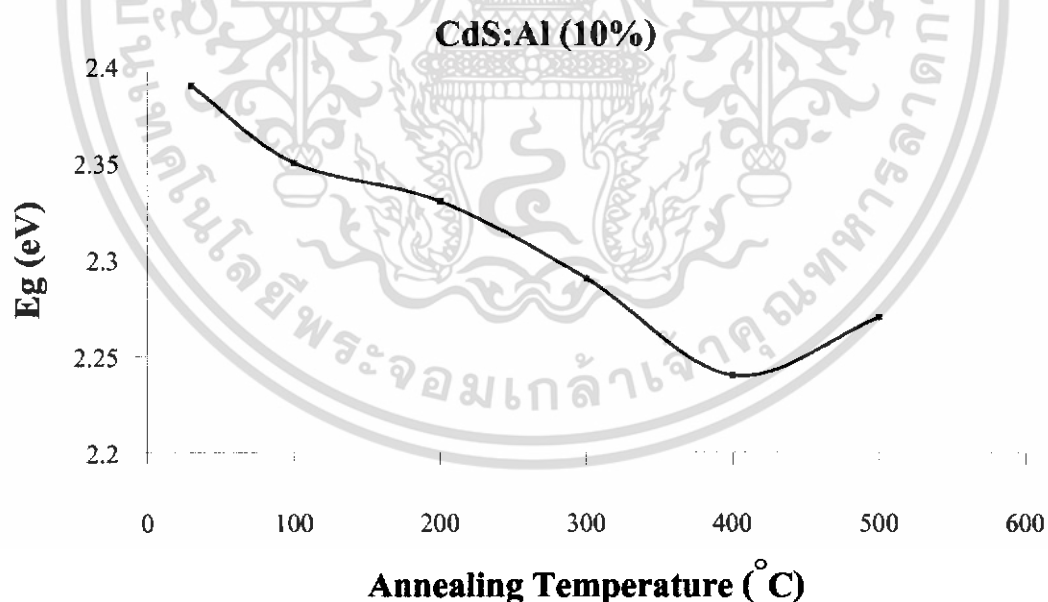
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิแอนนีส (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) (eV)		
	CdS	CdS:Al (10%)	CdS:Al (20%)
as-deposited	2.38	2.39	2.34
$T_{\text{annealed}} = 100^\circ\text{C}$	2.36	2.35	2.32
$T_{\text{annealed}} = 200^\circ\text{C}$	2.32	2.33	2.29
$T_{\text{annealed}} = 300^\circ\text{C}$	2.27	2.29	2.24
$T_{\text{annealed}} = 400^\circ\text{C}$	2.23	2.24	2.23
$T_{\text{annealed}} = 500^\circ\text{C}$	2.33	2.27	2.28
กรณีเติมกรดสเทียริก (as-deposited)	2.37	2.38	2.32

เมื่อนำเอาข้อมูลของค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางทั้งสามชนิดมารวมกัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.27 – 2.39 อิเล็กตรอน โวลต์ โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลง อุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสเพิ่มขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.18-4.20

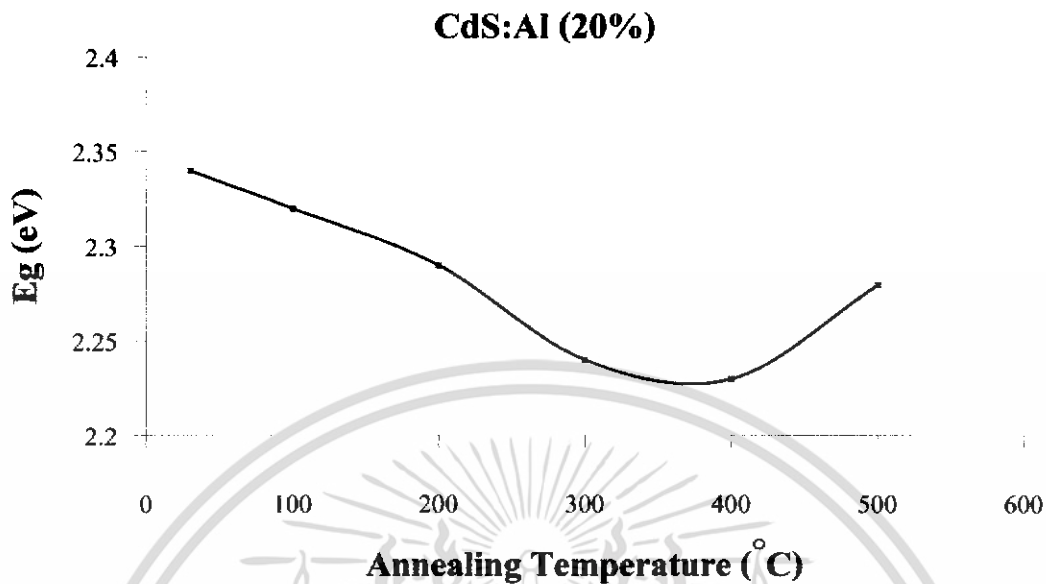


รูปที่ 4.18 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ



รูปที่ 4.19 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

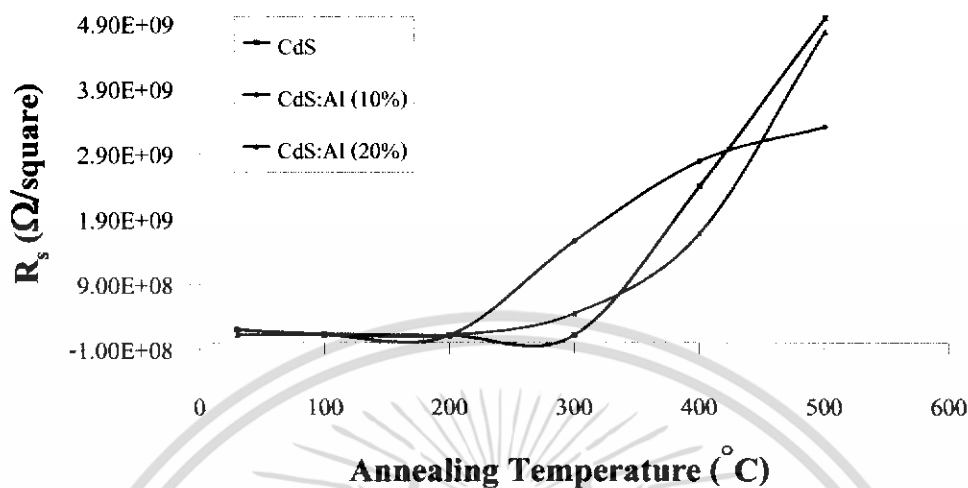


รูปที่ 4.20 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

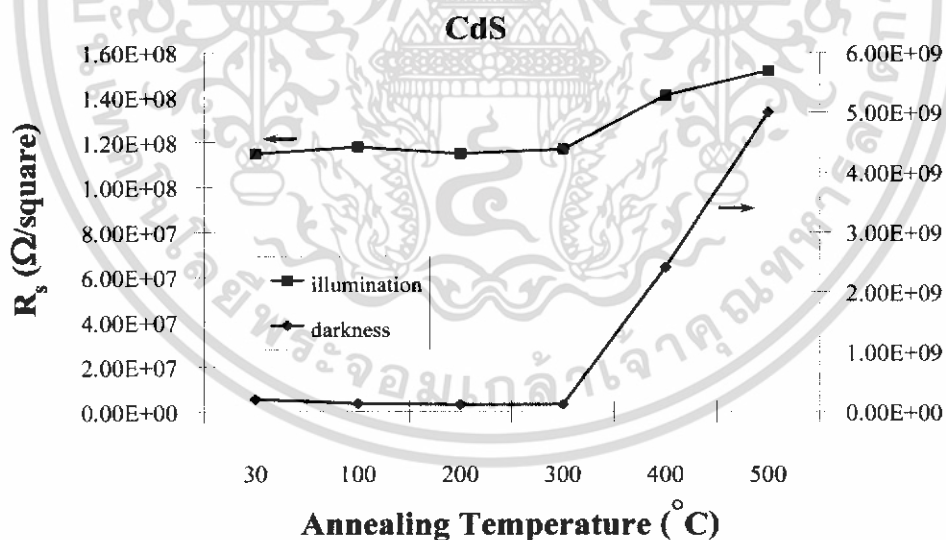
#### 4.5 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแผ่น

พิจารณาผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่นของ ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียม โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น พบว่าฟิล์มบางที่ทำการแอนนีสและไม่ได้แอนนีสเมื่อฉายแสงให้แก่ฟิล์มบางแล้ว ทำให้ค่าความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงจากก่อนการฉายแสง เนื่องจากแสงกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบวาเลนซ์กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แสดงว่าเมื่อฉายแสงให้แก่ฟิล์มบางแล้ว จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

พิจารณารูปที่ 4.21-4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ขณะมีการฉายแสง พบว่าค่าความต้านทานแผ่นลดลง และทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียม ขณะไม่มีการฉายแสง พบว่าแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณมากขึ้น ทำให้ความต้านทานแผ่นลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการแอนนีสฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ส่วนเมื่อทำการแอนนีสฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ช่วงอุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น

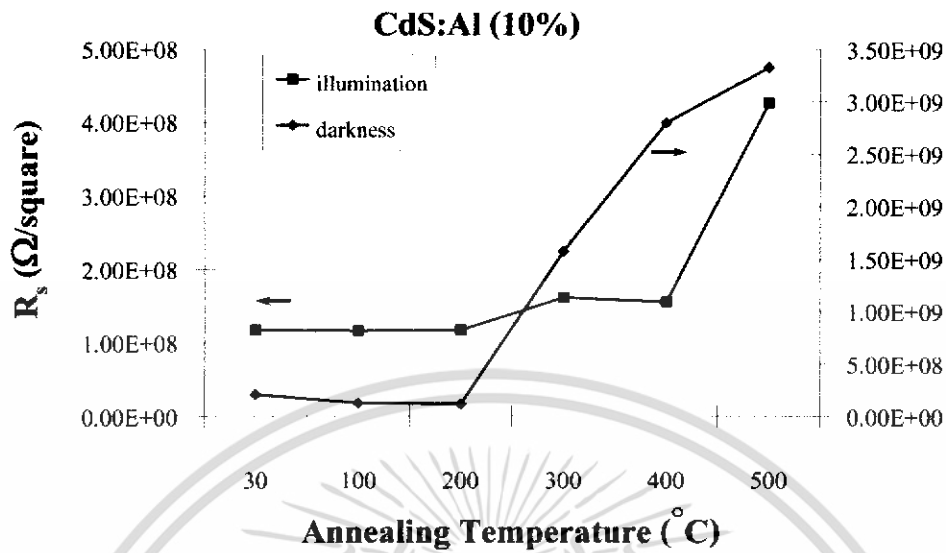


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

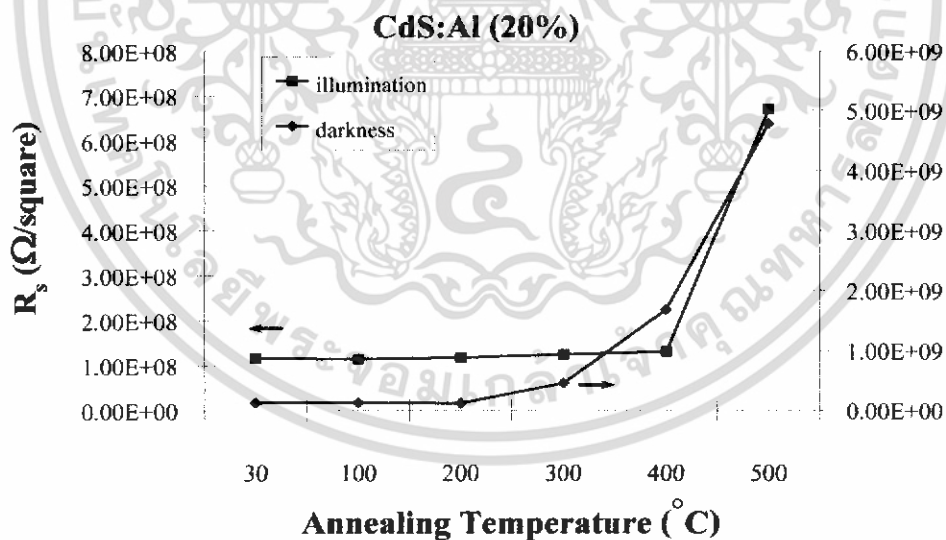


รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ใน ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่ อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22-4.24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ และฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ กับอุณหภูมิในการแอนนัลขณะไม่ฉายแสง และฉายแสง ทำการแอนนัลในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ปรากฏว่าค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิแอนนัลเพิ่มจาก 100 เป็น 300 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัล 400 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแผ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิแอนนัล 500 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์นี้อยู่ภายใต้การฉายแสง ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงอย่างมาก ส่วนค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางที่แอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งตอนที่แอนนัลและไม่ได้แอนนัล สำหรับกรณีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงเล็กน้อยในขณะที่อุณหภูมิแอนนัลเพิ่มจาก 100 เป็น 300 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแผ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่ช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิแอนนัล (°C)	$R_s (\Omega/\text{square}) \times 10^8$					
	CdS		CdS:Al (10%)		CdS:Al (20%)	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
as-deposited	2.06	1.15	2.11	1.17	1.26	1.17
$T_{\text{annealed}} = 100^\circ\text{C}$	1.38	1.18	1.29	1.18	1.29	1.15
$T_{\text{annealed}} = 200^\circ\text{C}$	1.18	1.15	1.20	1.18	1.18	1.18
$T_{\text{annealed}} = 300^\circ\text{C}$	1.20	1.17	15.72	1.62	4.53	1.25
$T_{\text{annealed}} = 400^\circ\text{C}$	24.10	1.41	27.99	1.56	16.82	1.31
$T_{\text{annealed}} = 500^\circ\text{C}$	50.0	1.52	33.25	4.27	47.86	6.70
กรณีเติมกรดเตตระออร์โทซิลิเกต (as-deposited)	1.18	1.13	1.19	1.17	1.27	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ ละชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2545., การศึกษาฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของโลหะทรานซิชันบางชนิด, รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. Kittel,C. 1971. in *Introduction to Solid State Physics*, 4<sup>th</sup> ed., pp. 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 611-612, 662-663, 614-676, John Wiley&Sons Inc., New York.
3. Cullity, B.D. 1956. in *Element of X-ray Diffraction*, pp.9-14, Addison-Wesly Publishing Company Inc.
4. สิงหเดช แดงจวง, 2536., การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. Abelas, F. 1972. in *Optical Properties of Solids*, pp.23-40, North-Holland, London.
6. Runyan, W.R. 1975. in *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, pp.67-91, Mc Graw- Hill, Bombay, New York.
7. วราภรณ์ ตั้งกิจเจริญวงศ์ และอุดมพร อุซชิน, 2542., การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์, โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
8. I.O. Oladeji, L. Chow, J.R. Liu, W.K. Chu, A.N.P. Bustamante, C. Fredricksen, A.F. Schulte,2000., *Comparative study of CdS thin films deposited by single, continuous, and multiple dip chemical processes*, Thin Dolid Film 359 :154-159
9. <http://www.science.unitn.it/~gcsmf/facilities/dip-coating.htm>
10. <http://www.kmitl.ac.th/~ktbencha/microprocessor/work1.pdf>
11. [http://www.kmitl.ac.th/~ktbencha/microprocessor/work1\\_bom.txt](http://www.kmitl.ac.th/~ktbencha/microprocessor/work1_bom.txt)
12. <http://www.kmitl.ac.th/~ktbencha/interfacing/source/Lab7.pdf>
13. Kittel,C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. 4<sup>th</sup> ed. New York:John Wiley&Sons Inc. :pp 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
14. งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์  
ลาดกระบัง.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

15. อารีย์ วิเชียรฉาย. เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. 2538.,เอกสารประกอบการเรียน. คณะวิทยาศาสตร์ สจล.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cd S

Greenockite, syn / Cadmium Sulfide cadmium yellow C.I. Pigment Orange 20  
C.I. Pigment Yellow 37

Lattice : Hexagonal

Mol. weight = 144.47

S.G. : P63mc (186)

Volume [CD] = 99.79

a = 4.14092

Dx = 4.808

c = 6.71980

Dm = 4.820

Z = 2

2th	l	h	k	i
24.808	62	1	0	0
26.507	91	0	0	2
28.183	100	1	0	1
36.621	29	1	0	2
43.682	48	1	1	0
47.840	50	1	0	3
50.883	8	2	0	0
51.825	31	1	1	2
52.798	15	2	0	1
54.586	5	0	0	4
58.280	3	2	0	2
60.841	3	1	0	4
66.774	15	2	0	3
69.266	5	2	1	0
70.864	8	2	1	1
72.384	4	1	1	4
75.480	9	1	0	5
77.858	2	2	0	4
80.239	9	3	0	0
83.254	14	2	1	3
86.311	7	3	0	2
91.498	8	2	0	5
96.165	3	2	2	0
102.271	5	2	2	2
102.879	6	1	1	6
104.532	2	3	0	4
107.644	9	2	1	5
112.340	4	1	0	7
115.863	7	3	1	3
118.461	3	4	0	0
120.171	2	4	0	1
126.295	2	2	1	6
135.490	4	4	0	3
141.227	4	3	2	1

ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-780 and 6-314.

COLOR : Yellow

OPTICAL DATA : B=2.506, Q=2.529, Sign=+

\*J. Mater. Sci. Lett., volume 6, page 1443, (1987) primary reference :

Razik, N.

\*Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., volume 0, page 228, (1944) optical data :

Radiation :

Filter : Not specified

d-sp : Not given

SS/FOM : F30=329(0.0023,40)

Internal standard : Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cd S

Cadmium Sulfide

Lattice : Face-centered cubic

S.G.: F-43m (216)

a = 5.81100

Mol. weight = 144.47

Volume [CD] = 196.22

Dx = 4.890

Z = 4

//Icor = 14.06

2th	l	h	k	l
26.547	100	1	1	1
30.748	22	2	0	0
44.040	47	2	2	0
52.163	33	3	1	1
54.671	5	2	2	2
64.043	6	4	0	0
70.594	10	3	3	1
72.715	4	4	2	0
80.993	10	4	2	2
87.070	6	5	1	1

ICSD COLLECTION CODE : 067789  
 REMARKS FROM ICSD : REM THE.  
 TEST FROM ICSD : No R value given.  
 TEST FROM ICSD : At least one TF missing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## โปรแกรม

```
extern register char cputick;  
unsigned char register sec100,sec,min,hour,minset,a;
```

```
unsigned char register input,stop,stop2,timeset;
```

```
main()  
{  
  a=0;  
  sec100=0;  
  sec=60;  
  min=0;  
  cputick=0;  
  hour=0;  
  minset=0;  
  while(1)  
  {  
    P1 = 0x03;  
  
    if(P1 == 0x07)  
    {  
      P1 = 0xFE;  
      delay();  
      P1 = 0x03;  
    }  
  
    if(P1 == 0x0B)  
    {  
      P1 = 0xFC;  
      delay();  
      P1 = 0x03;  
    }  
  
    if(P1 == 0x13)  
    {  
      timesetup();  
      delay();  
    }  
  
    if(P1 == 0x23)  
    {  
      printf("\n");  
      minset=1;  
      P1 = 0x03;  
      timecount();  
      P1 = 0xFE;  
      min = 1;  
      sec = 30;  
      minset=1;  
      timecount();  
    }  
  }  
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```
        if(min==0)
            {
                minset = 0;
            }
        }
    }
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้