

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์



นาย จักรพันธ์ ทองเจริญ

นาย อภิวัฒน์ กมลทวิกุล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมึก.....

เลขทะเบียน... 38551

วัน เดือน ปี 5 ส.ค. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Preparation and Characterization of CdS Thin Films



Mr. Jakkapan Tongcharoen

Mr. Apiwat Kamontawikul

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

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์  
ชื่อนักศึกษา นาย จักรพันธ์ ทองเจริญ รหัสประจำตัว 39054405  
นาย อภิวัฒน์ กมลทวิกุล รหัสประจำตัว 39054462

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. จูตินัย แก้วแดง  
ผศ. งามนิตย์ แก้วแดง  
ผศ. ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ  
ดร. ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  
(รองศาสตราจารย์ สุรพล รักวิชัย)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการ โครงการพิเศษ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง)

ประธานกรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง)

กรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ)

กรรมการ

.....  
(ดร. ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ วิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์  
ชื่อนักศึกษา นาย จักรพันธ์ ทองเจริญ รหัสประจำตัว 39054405  
นาย อภิวัฒน์ กมลทวิกุล รหัสประจำตัว 39054462

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. จูตินัย แก้วแดง  
ผศ. งามนิตย์ แก้วแดง  
ผศ. ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ  
ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
ปีการศึกษา 2542

#### บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลึกจากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ โดยเทคนิคการอบสารละลายเคมี และมีสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วย แคดเมียมซัลไฟด์, แอมโมเนีย ไทโอยูเรีย ซึ่งใช้เวลาในการอบประมาณ 30 นาที โดยเตรียมที่อุณหภูมิ 65 – 90 องศาเซลเซียสจากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร จะปรากฏพิกที่มุม  $2\theta$  ประมาณ  $27.3^\circ$  และจากการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเกรนมีขนาด 100 นาโนเมตร เมื่อนำเอาฟิล์มบางที่ได้ไปทำการแอนนिलที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงนำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าทำให้เราได้ค่าความต้านทานแผ่นขณะที่ยังไม่ฉายแสงจะอยู่ในระดับประมาณ  $10^3 - 10^7 \Omega/\square$  และทำการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้ม  $3 \text{ mW}/\text{m}^2$  จะทำให้ค่าความต้านทานลดลงมากกว่า 30% ฟิล์มที่ได้ทำการแอนนिलที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ขนาดของช่องว่างของแถบพลังงาน และ ความต้านทานแผ่น มีค่าลดลง แต่ถ้าอุณหภูมิแอนนिलสูงกว่า 400 องศาเซลเซียสพบว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและค่าความต้านทานแผ่นจะมี แนวโน้มเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title      Preparation and Chracterization of CdS Thin Films

Name                              Mr. Jakkapun      Tongcharoen

   Mr. Apiwat      Kamontavikune

Special Project Advisor      Assist.Prof.Dr. Thitinai      Gaewdang

   Assist.Prof.      Ngamnit      Gaewdang

   Assist.Prof.Dr. Tiparatana      Wongcharoen

   Dr.                      Chaisingh      Poo-Rakkiat

Department                      Applied Physics      Faculty of Science

Acadamic Year                      1999

#### Abstract

In this research, polycrystalline thin films of CdS were deposited on slide glass substrate in an aqueous solution consisting of CdSO<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, and thiourea about 30 minutes at 65-90 °C. X-ray diffraction patterns of as-deposited CdS thin films with a thickness of about 100 nm show only one peak at 2θ around 27.3°. From scanning electron micrograph, the grain size of thin film samples about 100 nm can be observed the effect of heat treatment, between 100-500 °C in a stream with slowly flow of nitrogen about 20 minutes, on the optical transitions and electrical resistivity were also investigated. The dark sheet resistance is the order of 10<sup>3</sup>-10<sup>7</sup> Ω/□ ,and the sheet resistance under illumination with 3 mW/m<sup>2</sup> is lower than 30 % .The films annealed at higher temperature show slightly lower values for both the band gap and the sheet resistance values at annealing temperature beyond 400 °C are appeared.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จจุดมุ่งไปได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ อุปกรณ์ในการทดลอง รวมทั้งให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในย่านความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลต(UV - VIS) ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง และ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยงค์ ดวงดี ที่ให้คำปรึกษาในการใช้เครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์พร้อมกับให้โปรแกรมดิจิทัล(Digitize)เพื่อนำมาหาค่าต่างๆจากกราฟระหว่างค่าการส่งผ่านและความยาวคลื่น

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์ แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารตัวอย่าง รวมทั้งอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกให้ได้

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีที่จำเป็นบางส่วนในโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพปฎล สุทธิศิริ ดร. เอกชัย ทุนนิวัฒน์ คุณ สุภกิจ มณีอินทร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำการใช้เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรงโคมิเตอร์ ในการศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงษ์ สรงประภา เป็นอย่างยิ่งที่ให้คำแนะนำให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย อาจารย์ บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ ภัทริยา กิตติเดชาชาญ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง และ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต สิริโชติ ที่ให้คำแนะนำด้านโปรแกรมและฮาร์ดแวร์ในการสร้างอุปกรณ์ค้นสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬารัตน์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ EDXS ในการศึกษาผิวหน้าและวิเคราะห์ธาตุในฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ คุณ จรินทร์ โพธิ์ไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณ ประหยัด บุตรพาชี เจ้าหน้าที่ประจำโรงงานที่ 1 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้อง วิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อ กาวเงินนำไฟฟ้า (silver paste) ในการทำรอยต่อเพื่อวัดความต้านทานของฟิล์มบาง

ท้ายสุดขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และนางสาว วรานุช แผ่นสุวรรณ ที่ดูแล และช่วยเหลือสิ่งต่างๆตลอดการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 โครงสร้างผลึกและ โครงสร้างแถบพลังงาน	3
2.1 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์(CdS)	3
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	3
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	5
2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	6
2.3 ครรชนีมีเตอร์	8
2.3.1 ครรชนีมีเตอร์ของระนาบในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์	9
2.3.2 ครรชนีมีเตอร์ระนาบในหน่วยเซลล์เฮกซะโกนอล	10
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	11
2.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	11
2.4.2 การวิเคราะห์ โครงสร้างผลึก	12
2.4.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	12
2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	13
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยหลักการการสร้างภาพโดยการ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
2.5.1 สัญญาณอิเล็กตรอน	13
2.5.2 เทคนิคการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณภาพ	16
2.5.3 ระบบภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	19
2.6 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การศึกษาสเปกโทรสโคปีของการแจกแจงพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากอะตอม ของธาตุ ต่างๆ	24
บทที่ 3 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	25
3.1 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	25
3.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	28
3.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	29
บทที่ 4 สมบัติทางไฟฟ้า	31
4.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า	31
4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	33
4.3 การวัดความต้านทานแผ่น	35
4.4 การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	36
บทที่ 5 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยเทคนิคการเคลือบด้วย การอบสารเคมี	38
5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	38
5.2 การเคลือบฟิล์ม CdS บนกระจกสไลด์	39
5.3 อุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS	39
บทที่ 6 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	41
6.1 การเตรียมแผ่นรองรับ	42
6.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	42
6.2.1 ฟิล์มตระกูล T 3	44
6.2.2 ฟิล์มตระกูล S4A	45
6.2.3 ฟิล์มตระกูล N 5	46
6.2.4 ฟิล์มตระกูล S6-2	47
6.2.5 ฟิล์มตระกูล JAK1	48
6.2.6 ฟิล์มตระกูล S1	49
6.2.7 ฟิล์มตระกูล SB-1 เมื่อแอนนูลที่อุณหภูมิต่างๆ	50
6.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่าย SEM และศึกษาองค์ประกอบของ ธาตุต่างๆ ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDXS	53
6.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านของแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	56
6.6 วิธีและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น	61
6.7 วิธีและผลการวัดการทดลองหาชนิดการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการศึกษาปรากฏการณ์ ของฮอลล์	67
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	69
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	74
ประวัติผู้เขียน	76

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	แสดงแสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้สำหรับการวัดฟิล์มบาง	35
ตารางที่ 6.1	แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารตัวอย่าง SB-1 แอนนิตที่อุณหภูมิต่างๆ	60
ตารางที่ 6.2	แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแผ่นของสารตัวอย่างฟิล์มตระกูล SB-5 ที่อุณหภูมิแอลนิตค่าต่างๆเมื่อ ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร	4
รูปที่ 2.2	แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	4
รูปที่ 2.3	แสดงการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมแบบซิงค์เบลนด์และเวิร์ทไซต์	5
รูปที่ 2.4	แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์	6
รูปที่ 2.5	แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการค้ำปัดระหว่างสปิน-ออร์บิต	7
รูปที่ 2.6	แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ โดยไม่คิดการค้ำปัดระหว่างสปิน-ออร์บิต	8
รูปที่ 2.7	แสดงดัชนีมิลเลอร์ ของ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	9
รูปที่ 2.8	แสดงดัชนีระนาบของ โครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม	10
รูปที่ 2.9	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	11
รูปที่ 2.10	สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในลักษณะต่างๆของอินทรีกริด	14
รูปที่ 2.11	แสดงชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นสารตัวอย่าง	16
รูปที่ 2.12	แสดงระบบการดูภาพขยายขนาด ไมโครในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยฉากเรืองรังสี	17
รูปที่ 2.13	การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เป็นสัญญาณภาพ	17
รูปที่ 2.14	การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงเป็นสัญญาณภาพ	18
รูปที่ 2.15	การเปลี่ยนรังสีเอ็กซ์เป็นสัญญาณภาพ	18
รูปที่ 2.16	เปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านแบบสแกน	19
รูปที่ 2.17	กลุ่มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน	20
รูปที่ 2.18	การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบอิเล็กทรอนิกส์ส่องผ่าน	20
รูปที่ 2.19	การสแกน โพรบอิเล็กทรอนิกส์บนผิวชิ้นสารตัวอย่าง	21
รูปที่ 2.20	การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบอิเล็กทรอนิกส์สแกน	22
รูปที่ 2.21	แสดงแผนภาพเบื้องต้นของระบบต่างๆ ภายนอกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.22	การย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนที่ทำให้ได้รังสีเอ็กซ์ $K_{\alpha}$ และ $K_{\beta}$	24
รูปที่ 3.1	แสดงการเปลี่ยนสถานะพลังงานของพาหะเมื่อผลึกมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	27
รูปที่ 3.2	แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง	29
รูปที่ 4.1	แสดงวิธีการวัดความต้านทานแผ่นแบบ 4 ขั้วเชิงเส้นของฟิล์มบาง	33
รูปที่ 4.2	แสดงขนาดของฟิล์มยาว $l$ กว้าง $w$ หนา $d$	33
รูปที่ 4.3	แสดงการเคลื่อนที่พาหะอิสระ (free carriers) ภายในสารกึ่งตัวนำในสถานะสมดุลของแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็ก	37
รูปที่ 5.1	แสดงอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	40
รูปที่ 6.1	แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล T3 ที่เตรียมได้	44
รูปที่ 6.2	แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล S4A ที่เตรียมได้	45
รูปที่ 6.3	แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล N5 ที่เตรียมได้	46
รูปที่ 6.4	แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล S6-2 ที่เตรียมได้	47
รูปที่ 6.5	แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล JAK ที่เตรียมได้	48
รูปที่ 6.6	แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล S1 ที่เตรียมได้	49
รูปที่ 6.7	แสดงลักษณะของฟิล์มบางที่ได้ทำการแอลนีตที่อุณหภูมิต่างๆ	50
รูปที่ 6.8	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง Cds ภายใต้เงื่อนไขการแอลนีตที่อุณหภูมิต่างๆ	51
รูปที่ 6.9	แสดงผลของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ได้ดังต่อไปนี้ (111), (110), (311) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	52
รูปที่ 6.10	แสดงการเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากผลึก Cds มาตรฐาน (กราฟเส้นที่ 1) กับผงผลึกที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ (กราฟเส้นที่ 2) และผลึกที่เคลือบบนฟิล์มบาง (กราฟเส้นที่ 3)	52
รูปที่ 6.11	แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กำลังขยาย 60,000 เท่า จากรูปจะเห็นเป็นผงฝุ่นจำนวน 2 กลุ่มซึ่งหลุดออกไม่หมด	53
รูปที่ 6.12	แสดงภาพถ่ายด้านตัดขวางของกระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่เพื่อวัดความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ ซึ่งมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.13	แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ 55	
รูปที่ 6.14	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของสารตัวอย่าง SS-1 ภายใต้เงื่อนไขการแอนนีกที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 6.15	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha^2$ กับพลังงานโฟตอน(hV)ของสารตัวอย่าง SB-1 ที่ไม่ได้ทำการแอนนีก (as-deposited)	57
รูปที่ 6.16	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha^2$ กับพลังงานโฟตอน(hV)ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 20 นาที	58
รูปที่ 6.17	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha^2$ กับพลังงานโฟตอน(hV) ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 20 นาที	58
รูปที่ 6.18	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha^2$ กับพลังงานโฟตอน(hV) ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 20 นาที	59
รูปที่ 6.19	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha^2$ กับพลังงานโฟตอน(hV)ของ สารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 20 นาที	59
รูปที่ 6.20	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) ของสารตัวอย่าง SB-1 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีก	60
รูปที่ 6.21	แสดงการวัดหาค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น	61
รูปที่ 6.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และไม่ได้ทำการแอนนีก ขณะไม่มีการฉายแสง	63

## สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 6.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์(I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสง	63
รูปที่ 6.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและไม่ได้ทำการแอนนีส ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้ม $3\text{mW/cm}^2$	64
รูปที่ 6.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้ม $3\text{ mW/cm}^2$	64
รูปที่ 6.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนด้วยความเข้ม $3\text{ mW/cm}^2$	65
รูปที่ 6.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนด้วยความเข้ม $3\text{ mW/cm}^2$	65
รูปที่ 6.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีสค่าต่างๆของสารตัวอย่าง SB-5 เมื่อมีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสง	67
รูปที่ 6.29	แสดงแผนภาพการศึกษาชนิดการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง โดยวิธีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงแสง โดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีวิธีการเตรียมได้หลายวิธี เช่น สปีดเทอริง [1] , การระเหยในระบบสุญญากาศ [2] , การเคลือบโดยวิธีไอระเหยสารเคมี [3] , สเปรย์ไพโลไลซิส [4] และ การอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition, CBD) [5] เป็นต้น เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct gap) และมีขนาดใหญ่ รวมทั้งสภาพการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อมีแสงตกกระทบ ดังนั้นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์จึงเหมาะที่จะนำมาทำเป็นหน้าต่าง (window) [6] ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนของการเลือกวิธีการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์นั้น จะใช้วิธีการอบสารละลายเคมี มีผู้รายงานว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีโครงสร้างแบบ ZnO/CdS/CuInGaSe<sub>2</sub>/Mo แล้วจะทำให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 15% [7] และในส่วนของ การเตรียมสารละลายแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการอบสารละลายเคมีนั้น จะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีในสารละลายเคมีที่ประกอบด้วย Cd<sup>2+</sup> กับ S<sup>2-</sup> ซึ่งจะทาปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ (substrate) และ การเตรียมด้วยวิธีการ CBD นั้น ค่าใช้จ่ายในการเตรียมค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังสามารถเตรียมฟิล์มให้มีขนาดใหญ่ได้ จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ในงานที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ในโครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยการอบสารละลายเคมี อีกทั้งยังศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางที่ได้ พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีนี้ โดยมีขั้นตอนการเตรียมงานดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้ารายละเอียดของวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี พร้อมทั้งสร้างอุปกรณ์ฐานรองกระจกสไลด์เพื่อใช้จุ่มในสารละลาย โดยใช้สเตปมอเตอร์ที่สามารถปรับรอบได้ พร้อมทั้งจัดหาและประกอบอุปกรณ์ต่างๆให้เป็นระบบแอนนูลิสารตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บนกระจกสไลด์โดยวิธีการอบสารละลายเคมีเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดี แล้วนำมาแอนนูลิภายใต้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตรวจสอบ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง อีกทั้งยังศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารตัวอย่าง และศึกษาผิวหน้าของสารตัวอย่าง โดยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมทั้งคำนวณขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### โครงสร้างผลึกและโครงสร้างแถบพลังงาน

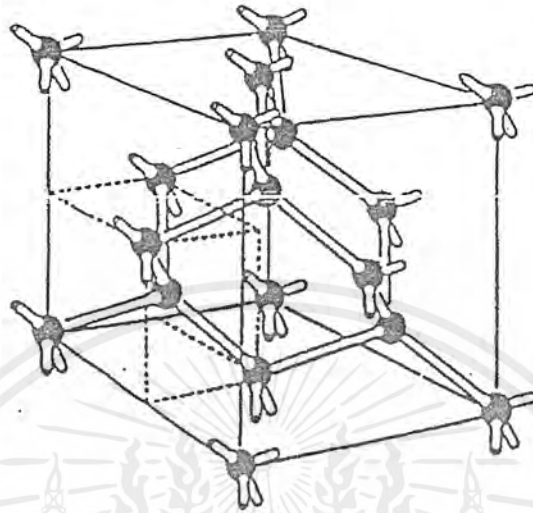
สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันขึ้นกับรูปแบบของการเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้าง การมีโครงสร้างที่ต่างกันนี้เองจึงทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น การนำไฟฟ้า การดูดกลืนแสง และความแข็ง เป็นต้น

#### 2.1 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) [6,8]

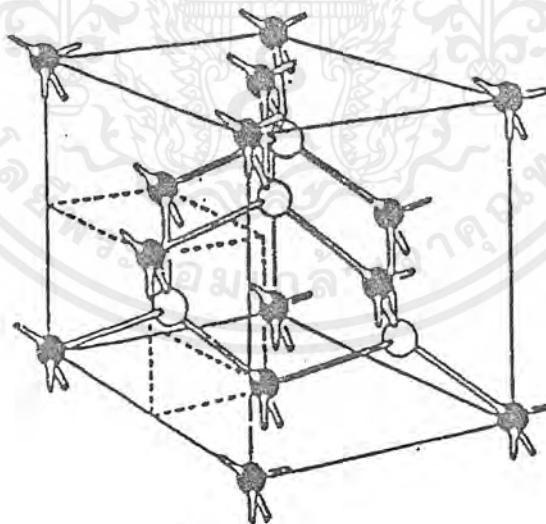
จากการศึกษาเราจะพบว่า โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะโครงสร้างอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ ซิงค์เบลนด์ (zincblende) และ เวิร์ทไซท์ (wurtzite)

##### 2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างแบบเพชร รูปที่ 2.1 โดยมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน (tetrahedral bond) แต่ โครงสร้างผลึกพื้นฐาน (basic lattice) ที่  $(0, 0, 0)$  และที่  $(1/4, 1/4, 1/4)$  เป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างซิงค์เบลนด์ (zincblende) เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกย่อย (sublattice) แบบกึ่งกลางผิวน้ำลูกบาศก์ (face-centered cubic lattices) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $1/4$  ตามแนวเส้นทะแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ซึ่งประกอบด้วย อะตอมของธาตุ 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม เช่น ถ้าอะตอมของ Zn อยู่ที่  $0, 0, 0, 1/2, 1/2, 1/2, 0, 1/2, 1/2, 1/2, 0$  ตำแหน่งของอะตอม S อยู่ที่  $1/4, 1/4, 1/4, 3/4, 3/4, 3/4, 1/4, 3/4, 3/4, 1/4$  ดังรูปที่ 2.2 ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC, CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญ สำหรับประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

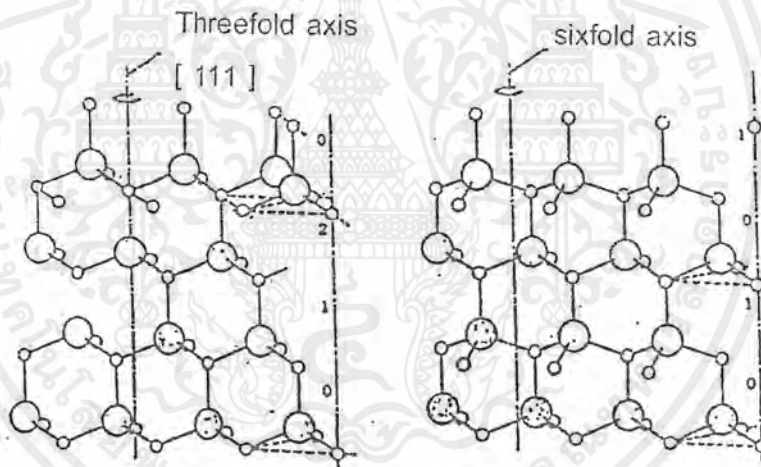


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

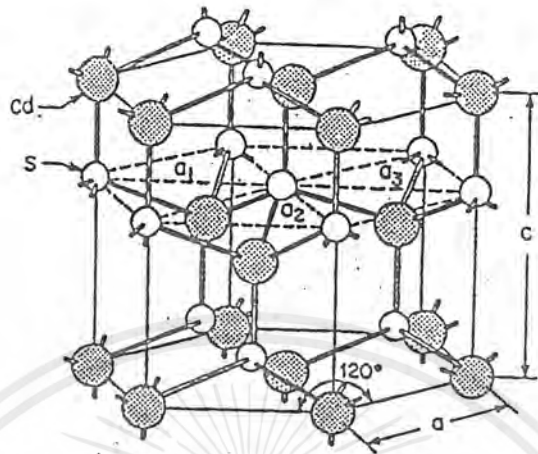
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวรีทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) นี้มีพันธะของอะตอมในโครงสร้างผลึกเหมือนกับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวระนาบของกลุ่ม พันระเตตระฮีดรอน ของอะตอมในชั้นที่ 2 ขึ้นไป ดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างนี้เกิดจากการนำโครงสร้างย่อยแบบเฮกซะโกนอล โคลส แพค (hexagonal closed - packed) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $5/8$  ตามแนวแกนซี (c-axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ดังรูปที่ 2.4 คือ ZnS ZnO ZnSe ZnTe SiC CdSe CdS เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมแบบซิงค์เบลนด์ และ เวรีทไซท์

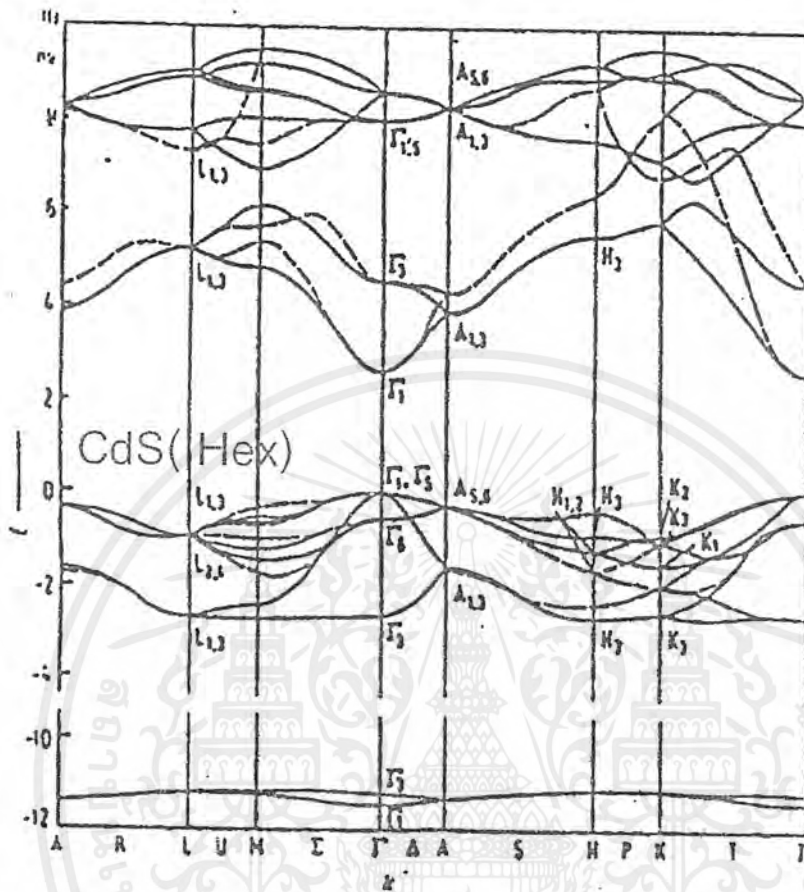


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์

## 2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์

ส่วนโครงสร้างแถบพลังงานของ CdS นั้นเป็นแบบตรงคือมีการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปจุดต่ำสุดของแถบนำที่ตำแหน่ง  $\Gamma$  ของบริลลันโซน ทั้ง ซิงค์เบลนด์และ เวิร์ตไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่โครงสร้างแบบ ซิงค์เบลนด์ จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.50 eV ที่อุณหภูมิ 293 K และโครงสร้างแบบ เวิร์ตไซต์ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ  $E_g = 2.57$  eV ที่อุณหภูมิ 80 K และ 2.50 eV ที่อุณหภูมิ 293 K ,  $E_g = 2.64$  eV ที่อุณหภูมิ 80 K และ 2.55 eV ที่อุณหภูมิ 293 K





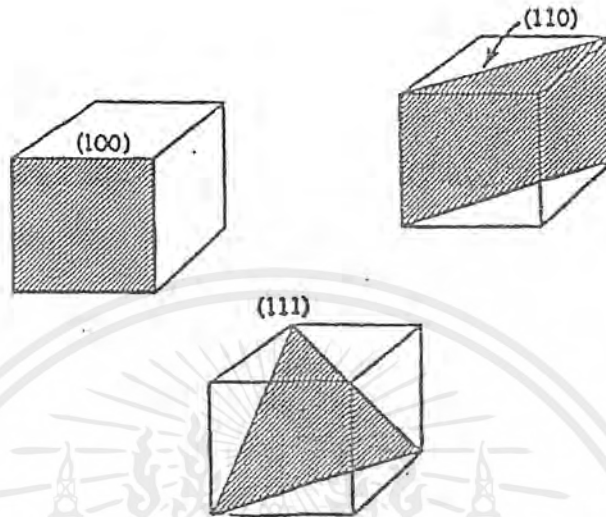
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต (spin - orbit coupling)

### 2.3 ครรชนีมิลเลอร์ [ 6 , 8 ]

การบอกระนาบต่าง ๆ ในผลึกนั้น จะบอกเป็นค่าครรชนีมิลเลอร์ ค่าครรชนีมิลเลอร์หาได้จากส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก ผู้เสนอคือนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยแยกการพิจารณาครรชนีมิลเลอร์เป็น 2 ประเภทดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ตรีชนนีมิลเลอร์ของระนาบในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์



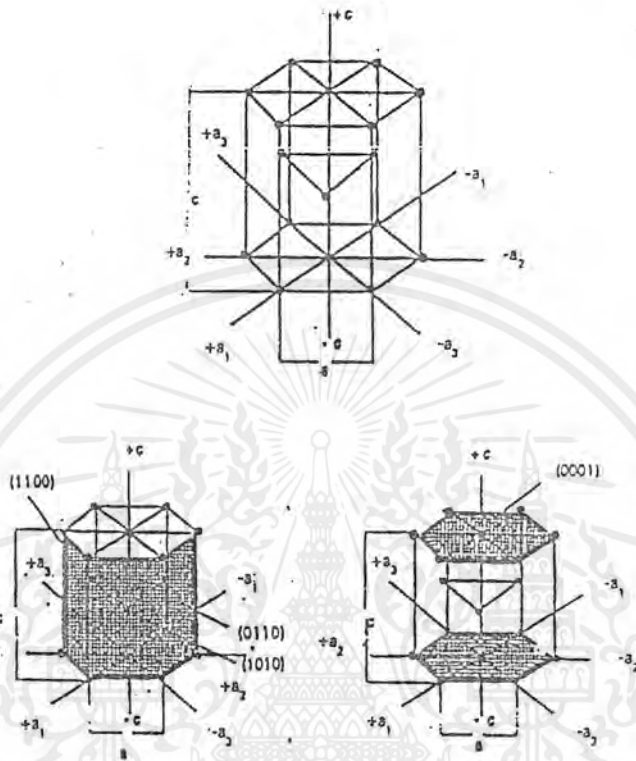
รูปที่ 2.7 แสดงตรีชนนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

การบอกระนาบต่างๆ ในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์จะใช้ตรีชนนีมิลเลอร์ ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h, k, l โดยใช้เครื่องหมาย (h k l) และเมื่อพิจารณาจากรูป 2.6 เราจะได้

$$h : k : l = 1/p : 1/q : 1/r \tag{2.1}$$

เมื่อ p, q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ นั่นคือ h, k, l จะเป็นส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ ซึ่งก็คือตรีชนนีมิลเลอร์

### 2.3.2 ครรชนีระนาบในหน่วยเซลล์เฮกซะโกนอล



รูปที่ 2.8 แสดงครรชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

ในหน่วยเซลล์เฮกซะโกนอล ครรชนีที่ใช้เรียกระนาบ คือ ครรชนีมิลเลอร์บราวเอ ใช้สัญลักษณ์  $h, k, i, l$  ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน  $a_1, a_2, a_3$  และ  $c$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลล์หน่วยประกอบด้วยระนาบ 2 แกน คือ

1) ระนาบฐานมี 2 ระนาบคือระนาบฐานบน และระนาบฐานล่าง แกน  $a_1, a_2, a_3$  เป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐาน ทำมุม  $120^\circ$  ซึ่งกันและกัน และระยะตัดแกน  $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$  และแกนที่ 4 คือ แกน  $c$  เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบฐานทั้ง 2 ซึ่งตัดแกน  $c$  ห่างกันเป็นระยะ 1 หน่วย ส่วนกลับของระยะตัดแกนทั้ง 4 จึงเท่ากับ  $0, 0, 0, 1$  ดังนั้นครรชนีมิลเลอร์บราวเอ ก็คือ  $(0001)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระนาบปริซึมมี 6 ระนาบหรือหน้า ระนาบปริซึมทุกระนาบในหน่วยเซลล์ สามารถแทนด้วยครรชนิมิลเลอร์เดียวกันคือ (1010) ในการเรียกชื่อระนาบอาจจะบุด้วย (hkl) ก็ได้คืออาศัยเพียง h, k, l โดยที่  $h+k = -i$  แต่การระบุด้วย (h k i l) จะแสดงให้เห็นความสมมาตรในหน่วยเซลล์ได้ชัดเจนกว่า

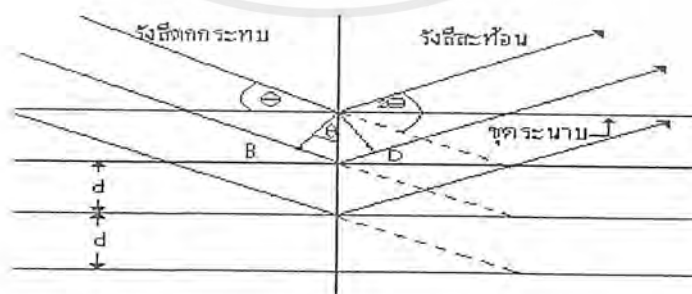
## 2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [8]

### 2.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.25 nm เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกก็เกิดการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นและหลังจากผ่านโครงสร้างผลึกออกมาก็จะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและหักล้าง นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อแบรกก์ (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดแบบเสริมกัน มากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกมาแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ และเรียกกฎนี้ว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ

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

- $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน  
 $\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ  
 $n$  คือ อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1,2,3.....



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบต่าง ๆ ในผลึก แล้วเกิดการแทรกสอดเสริมกันนั้น คือความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวมีค่ามาก สังเกตได้จากยอด (peak) ในรีวกของการเลี้ยวเบนจะสูง ถ้ารับธาตุหรือสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันยอดของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นจะเกิดมุมที่เลี้ยวเบนเดิมเสมอ โดยมุมเลี้ยวเบนคือมุมระหว่างรังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบซึ่งมีค่า  $2\theta$  โดยความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนกับมุมเลี้ยวเบนจะหาได้จากการวัดของเครื่องคิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometer)

#### 2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีวกการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ โดยการพิจารณาดังต่อไปนี้

#### 2.4.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงก์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงก์เบลนด์ จัดอยู่ในระบบผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic) โดยที่  $a = b = c$  และ  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก ครรชนิมิตเตอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

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

เมื่อแทนสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

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

โดยที่  $\alpha =$  ค่าคงที่ของโครงผลึก

#### 2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบ เวิร์ทไซด์

โครงสร้างผลึกแบบ เวิร์ทไซด์ จัดอยู่ในระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าต่างๆ  
 $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

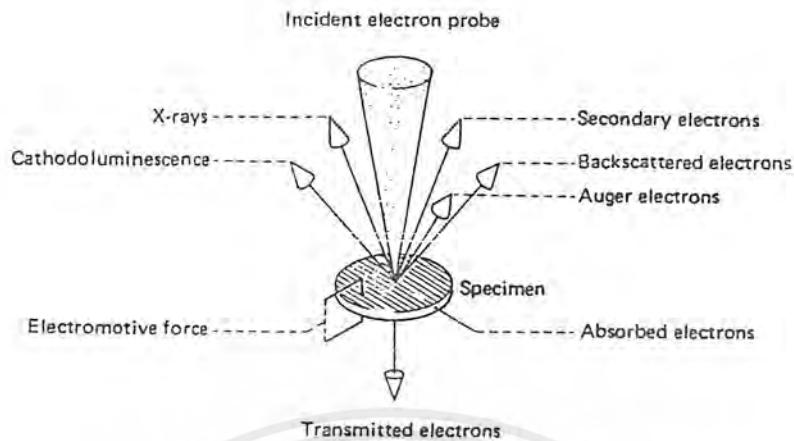
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.5)$$

### 2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยหลักการสร้างภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) [9]

การใช้อิเล็กตรอนช่วยในการมองเห็นภาพขยายขนาดไมโคร ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนอกจากเทคนิคในการสร้างเลนส์อิเล็กตรอนเพื่อให้สามารถในการแจกแจงและกำลังขยายสูงแล้วกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การมองเห็นภาพขยายที่เกิดจากคลื่นอิเล็กตรอนด้วยตาเปล่าและการบันทึกภาพ เนื่องจากมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นปริมาณอิเล็กตรอนด้วยตาเปล่าได้เหมือนกับมองเห็นกับการมองเห็นความสว่างของแสง

#### 2.5.1 สัญญาณอิเล็กตรอน

ถ้าอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ตกกระทบชิ้นสารตัวอย่าง (อิเล็กตรอนปฐมภูมิ) ทำอันตรกิริยากับอะตอมของ โครงสร้างในชิ้นตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง อนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอันตรกิริยาเหล่านี้ในงานจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมักนิยมเรียกว่าสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สัญญาณอิเล็กตรอนในลักษณะต่างๆของอันตรกิริยา

ชนิดและปริมาณของสัญญาณที่เกิดขึ้นกับธาตุองค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง ซึ่งอธิบายพอสังเขปดังนี้

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons)

เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรของอะตอม หลังการดูดกลืนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานต่ำและจะเกิดขึ้นได้กับธาตุที่มีเลขอะตอมค่อนข้างต่ำ

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electron)

เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เสียพลังงานไปเพียงบางส่วนให้กับอะตอมและกระเจิงออกมา มีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดได้กับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

อิเล็กตรอนทะลุผ่าน (transmitted electrons)

เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลือจากการดูดกลืนพลังงานของชิ้นตัวอย่าง ปริมาณของอิเล็กตรอนนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและภาคตัดขวางการดูดกลืนพลังงานของธาตุองค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง

อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนในชิ้นตัวอย่าง (absorbed electrons)

เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นตัวอย่างหมด และพลังงานที่สูญเสียจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งมีผลให้ตัวอย่างไหม้เกรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รังสีเอ็กซ์ ( x - rays )

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาหลังการทำอันตรกิริยาระหว่างอะตอมบนชั้นตัวอย่างกับอิเล็กตรอนพลังงานสูงแบ่งเป็น 2 ชนิด

ก. รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง ( continuum x - rays ) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นกระจายในช่วงกว้าง ( broad spectrum ) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่บริเวณสนามไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงระหว่างนิวเคลียสกับวงโคจรชั้นในของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงสูญเสียพลังงานและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทันที

ข. รังสีเอ็กซ์เรืองเฉพาะธาตุ ( characteristic x- ray ) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเฉพาะอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงชนกับอิเล็กตรอนในชั้นโคจร K , L , หรือ M แล้วอิเล็กตรอนของชั้นโคจรใดโคจรหนึ่งหลุดออกมาอะตอมนั้นจะรักษาสมดุลของโครงสร้างด้วยการรับอิเล็กตรอนของชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นถัดออกไปมีพลังงานสูงกว่าชั้นโคจรที่ถูกเห็นยวนำให้หลุดออกไป ดังนั้นก่อนที่อิเล็กตรอนชั้นถัดไปจะเข้ามาแทนที่ จะต้องลดพลังงานด้วยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาให้อิเล็กตรอนนี้มีระดับพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่จะแทนที่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจึงมีความยาวคลื่นเฉพาะระดับพลังงานของอะตอมของธาตุนั้น ๆ สามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณและคุณภาพได้

### ไอเจอร์อิเล็กตรอน ( Auger electrons )

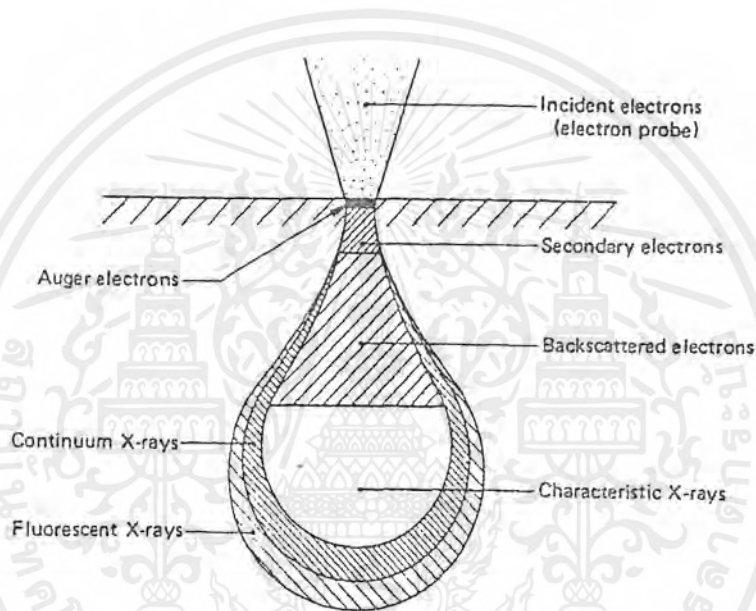
เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรจากการกระตุ้นของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากชั้นตัวอย่าง ให้ประโยชน์มากในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเบา

### แสงเรืองจากชั้นตัวอย่าง ( cathodoluminescence )

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็น เกิดจากอะตอมของชั้นตัวอย่างได้รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกเคลื่อนเข้าสู่สภาวะที่ถูกกระตุ้นและกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ( ground ) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แรงเคลื่อนไฟฟ้า ( electromotive force )

เป็นปริมาณของไฟฟ้าที่เกิดจากความแตกต่างของประจุระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของชั้นตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน และเกิดจากระดับความลึกของชั้นตัวอย่างต่างกัน ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนซึ่งบังคับได้ด้วยศักดาไฟฟ้าเร่ง ถ้าศักดาไฟฟ้ายิ่งสูงอันตรกิริยาจะเกิดในความลึกมากขึ้น และถ้าเลขอะตอมของธาตุสูงขึ้น อันตรกิริยาจะเกิดบริเวณกว้างขึ้น ชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.11 แสดงชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นสารตัวอย่าง

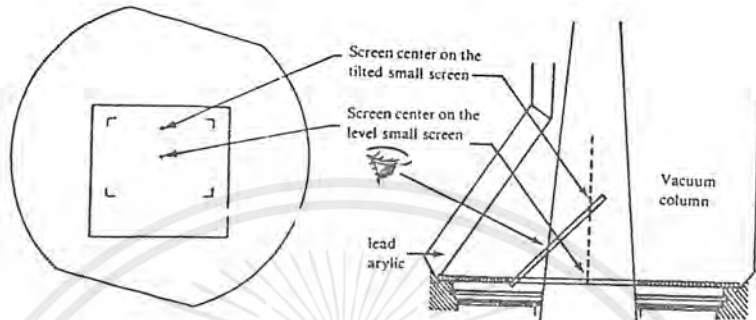
### 2.5.2 เทคนิคการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เป็นสัญญาณภาพ

การที่จะเห็นรายละเอียดของภาพ โครงสร้างไมโครในแต่ละบริเวณที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบนั้น จะต้องเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นภาพ หรือสัญญาณภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ซึ่งมักจะพบอยู่ 2 วิธีคือ

การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์หรือบางครั้งตัวคลื่นอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นภาพโดยอาศัยการเรืองแสงของสารเรืองแสงประเภท ZnS เมื่อคลื่นอิเล็กตรอนจากเลนส์อิเล็กตรอนตกกระทบบนฉากเรืองแสง ( fluorescent screen ) สารเรืองแสงแต่ละบริเวณจะรับโอนถ่ายพลังงานจากอิเล็กตรอน และปลดปล่อยคลื่นแสงซึ่งให้ความสว่างตามปริมาณความเข้มของคลื่นอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของชั้นตัวอย่าง เกิดภาพขยายโครงสร้างไมโครบนฉากเรืองแสง

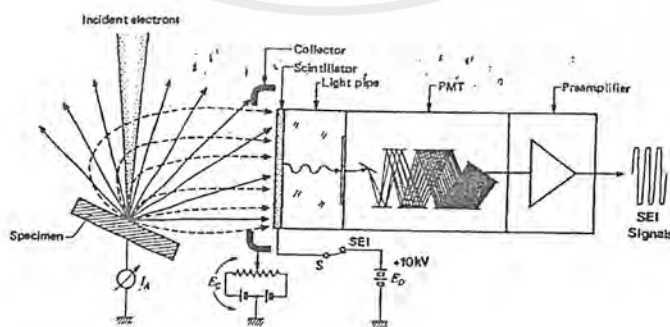
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถมองผ่านช่องดูภาพซึ่งทำด้วยแผ่นพลาสติกใสกันรังสีเอ็กซ์ ( lead acrylic ) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการจัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน



รูปที่ 2.12 แสดงระบบการดูภาพขยายขนาดไมโครในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนด้วยฉากเรืองรังสี

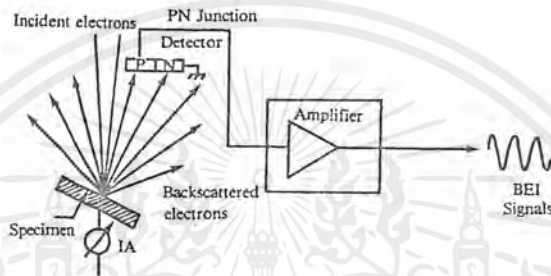
การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยอาศัยอุปกรณ์วัดสัญญาณอิเล็กตรอน ( SEI or BEI detector ) และหัววัดรังสี ( radiation detector ) การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณภาพ อาศัยอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแผ่นเรืองรังสีและหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะถูกดึงให้เข้าหาอุปกรณ์วัดด้วยสนามไฟฟ้า ( +10 kV ) และโอนถ่ายพลังงานให้แผ่นพลาสติกเรืองรังสี แสงเรืองที่เกิดขึ้นจะผ่านท่อนำแสงไปยังโฟโตแคโทดของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน และขยายสัญญาณให้แรงขึ้น สัญญาณนี้เป็นสัญญาณภาพที่จะส่งให้หลอดภาพต่อไป



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณภาพ

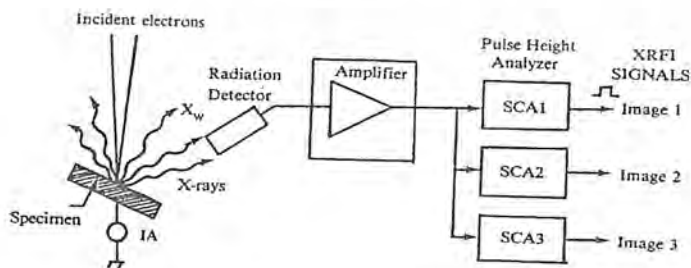
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับให้ เป็นสัญญาณภาพต้องอาศัยอุปกรณ์ วัสดุแบบกึ่งตัวนำประเภท PN-junction ดังแสดงในรูปที่ 2.14 อิเล็กตรอนกระเจิงกลับซึ่ง มีพลังงานสูงจะ โอนถ่ายพลังงานให้บริเวณปลดคพาหะของหัววัดกึ่งตัวนำเหนี่ยวนำให้เกิดปริมาณ ของคู่อิเล็กตรอนและ โฮล หรือสัญญาณไฟฟ้าขึ้นในหัววัด สัญญาณนี้คือสัญญาณภาพซึ่งจะส่งผ่าน ให้ วงจรขยาย ขยายสัญญาณให้แรงขึ้นเพื่อเปลี่ยนเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับเป็นสัญญาณภาพ

ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุเป็นสัญญาณภาพจำเป็นต้องใช้หัววัด รังสีพรอพอร์ชันแนล หรือหัววัดกึ่งตัวนำประเภท Si (Li) และระบบวิเคราะห์พลังงานของ รังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุเพื่อเลือกรายละเอียดเฉพาะธาตุขององค์ประกอบบนชิ้นตัวอย่างมาแสดง เป็นภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 หัววัดรังสีจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานของรังสีเอ็กซ์เรืองให้เป็น สัญญาณไฟฟ้า และระบบวิเคราะห์พลังงาน SCA ( single channel analyzer ) จะเลือกสัญญาณ เฉพาะธาตุไปผสมกับสัญญาณในระบบกำเนิดภาพ



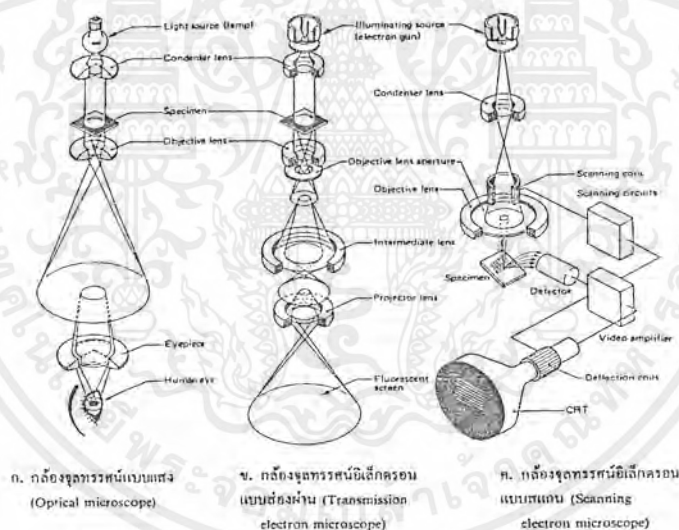
รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนรังสีเอ็กซ์เป็นสัญญาณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสัญญาณภาพแบบนี้ เหมาะกับการจัดระบบเลนส์อิเล็กทรอนิกส์แบบสแกน ซึ่งจะเก็บสัญญาณภาพแต่ละจุดจากปลายลำอิเล็กตรอน ไปปรากฏเป็นภาพ ( image ) บนจอภาพรังสีแคโทด ( CRT )

### 2.5.3 ระบบภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ถ้าพิจารณาจากกลุ่มสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนและชิ้นตัวอย่างแล้ว จะเห็นว่าสัญญาณหลักอยู่สองกลุ่มคือ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดบนพื้นผิวตัวอย่างและสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ทะลุผ่านชิ้นตัวอย่าง ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการศึกษภาพไมโครกราฟทั้งบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่างและในชิ้นเนื้อเยื่อบาง เช่นเดียวกับกระบวนการของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแต่ต้องมีการจัดระบบเลนส์อิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคทางสัญญาณภาพที่เหมาะสม ดังแสดงภาพเปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในรูปที่ 2.16



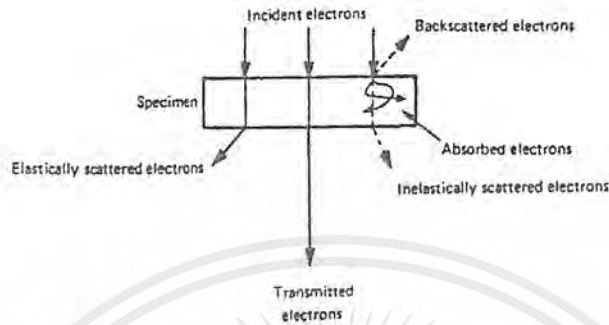
รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านแบบสแกน

ระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านในรูป 2.16 ข. เหมาะกับการสร้างภาพของสัญญาณทะลุผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาโครงสร้างภายในชิ้นเนื้อเยื่อและในชิ้นตัวอย่างบางมาก สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ทะลุผ่านชิ้นตัวอย่างจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

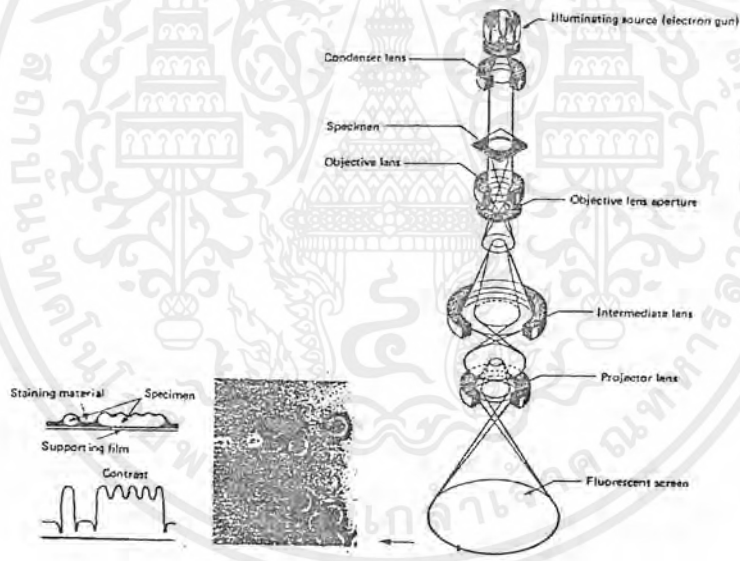
1. อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่าน โดยตรง ( directly transmitted electron )
2. อิเล็กตรอนที่ชนกับอะตอมแบบยืดหยุ่น อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนทิศทางแต่มีได้สูญเสียพลังงาน ( elastically scattered electron )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อิเล็กตรอนที่ชนกับอะตอมแบบไม่ยืดหยุ่นจะเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานไปบางส่วน ( inelastically scattered electron ) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กลุ่มสัญญาณอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงาน

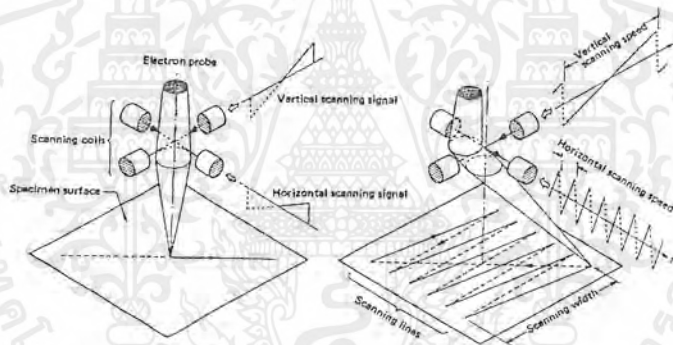


รูปที่ 2.18 การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบอิเล็กตรอนส่องผ่าน

การสร้างภาพของระบบนี้ ถ้าอิเล็กตรอนที่บังคับด้วยคอนเดนเซอร์เลนส์จะส่งผ่านขึ้น ตัวอย่างกลุ่มสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาในชิ้นตัวอย่างจะถูกบังคับด้วยระบบเลนส์ขยายภาพ และฉายภาพขยายของสัญญาณอิเล็กตรอนลงบนฉากเรืองแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นภาพที่ตาเปล่ามองเห็น ทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านโดยตรง และสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงแบบยืดหยุ่นที่ ตกกระทบบนระนาบของฉากเรืองแสง จะช่วยให้ภาพเกิด contrast แบบ scattering absorption contrast

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกนในรูป 2.16 ค. เหมาะกับการสร้างภาพของกลุ่มสัญญาณ ในการศึกษาโครงสร้างบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ระบบเลนส์แบบนี้ต่างไปจากแบบแรกคือ การสร้างภาพจะต้องบีบลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์ออปเจกทีฟจนมีลักษณะเป็นโปรบ (electron probe) โฟกัสลงบนชิ้นตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนจึงเกิดเฉพาะจุดที่ปลายโปรบตกกระทบ การสร้างภาพไมโครไม่สามารถฉายไปบนฉากเรืองแสงได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบสแกนลำอิเล็กตรอนบนพื้นที่ไมโครที่กำหนดบนชิ้นตัวอย่าง และเล็กรับสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดใด ๆ จุดต่อจุดที่ปลายโปรบอิเล็กตรอนเลื่อนไป เพื่อนำไปสร้างภาพขยายที่เข้าจังหวะกัน (synchronize) บนพื้นที่ของจอภาพแคโทดเรย์ ในกึ่งกลางทรานส์อิเล็กตรอนแบบสแกนจึงต้องมีชุดขดลวด แม่เหล็กไฟฟ้า ควบคุมการสแกน (scanning coil) และชุดกำเนิดภาพเพิ่มขึ้น ชุดควบคุมการสแกนจะทำหน้าที่บังคับให้โปรบอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่างเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19

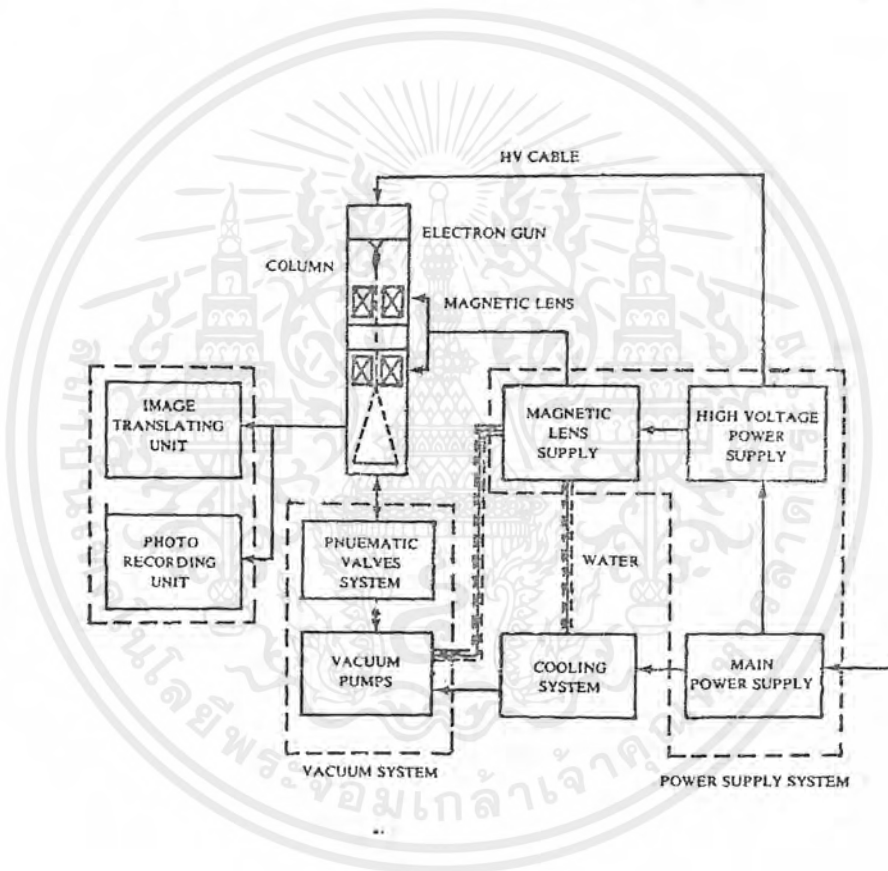


รูปที่ 2.19 การสแกนโพรบอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นสารตัวอย่าง

สัญญาณควบคุมการสแกนของโปรบอิเล็กตรอนในคอลัมน์สูญญากาศ และชุดกำเนิดภาพ จะกำเนิดพร้อมกัน ดังนั้นสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดในขณะที่อิเล็กตรอนโปรบเคลื่อนไปบนผิวชิ้นตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์วัด ปรากฏเป็นสัญญาณภาพบนจอภาพจุดต่อจุดตามแนวสแกน ทั้งแนวนอนและแนวตั้งบนระนาบ ประกอบกันเป็นภาพขยาย ดังแสดงในรูปที่ 2.20



- ก. ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ( electron optics system )
- ข. ระบบสุญญากาศ ( vacuum system )
- ค. ระบบระบายความร้อน ( cooling system )
- ง. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ( power supply system )
- จ. ระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ ( image translating and photo recording )



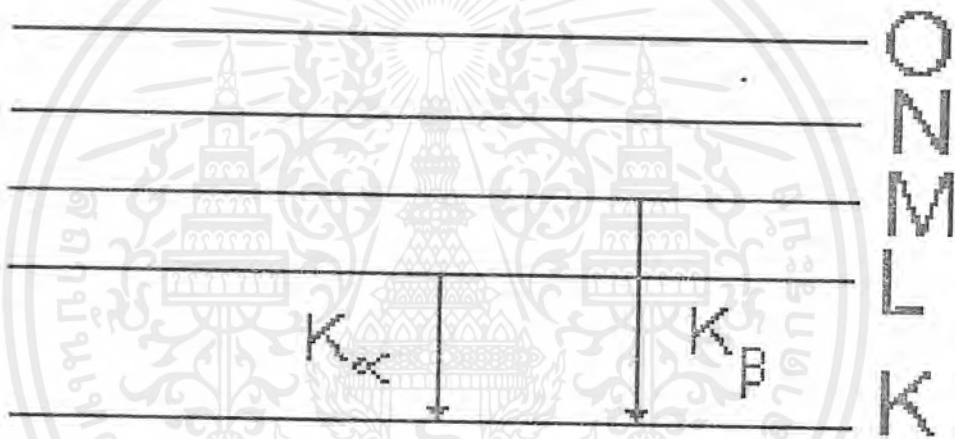
รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพเบื้องต้นของระบบต่างๆ ภายนอกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การศึกษาสเปกโตรสโกปีของการแจกแจงพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากอะตอมของธาตุต่างๆ

### (Energy Dispersive X-rays Spectroscopy :EDXS )

หลักการของวิธีนี้คือ ยิงอิเล็กตรอนเข้ามายังผิวหน้าของโครงผลึกซึ่ง จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้น K ในอะตอมของผลึกให้กระโดดขึ้นไปยังวงโคจรชั้น L หรือ M เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่สถานะวงโคจรชั้น K เหมือนเดิมในเวลาต่อมาจะปล่อยรังสี X ในช่วงความยาวคลื่น  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$  ออกมา เพราะฉะนั้นอะตอมตัวนี้จะเป็นธาตุอะไรจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของ อิเล็กตรอนดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.22 การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนที่ทำให้ได้รังสีเอ็กซ์  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$

## บทที่ 3

### สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

#### 3.1 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [6]

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้รู้เกี่ยวกับแถบช่องว่างแถบพลังงาน นั่นคือ การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ชั้นบนเปลี่ยนสถานะพลังงาน ไปอยู่ในระดับแถบนำ ความพอดีของพลังงานแสงและช่องว่างแถบพลังงานต้องสมนัยกัน หรือมากกว่าจึงจะเกิดการดูดกลืนขึ้น เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงจากการที่เปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนก็จะทำให้รู้ค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ การดูดกลืนแสงสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ เมื่อพิจารณาให้แสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปตัวกลางที่มีค่าสภาพซึมซาบของแม่เหล็ก ( $\mu$ ) = 1 จะได้สมการคลื่นแสงเป็น

$$E = E_0 \exp[ i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) ] \quad (3.1)$$

$$H = H_0 \exp[ i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) ] \quad (3.2)$$

โดยที่  $E$  คือสนามไฟฟ้ามีอัมพลิจูด  $E_0$

$H$  คือสนามแม่เหล็กมีอัมพลิจูด  $H_0$

$k = k_1 + ik_2$  เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดย  $k_1$  คือเวกเตอร์จริงและ  $k_2$  คือเวกเตอร์จินตภาพ หรือ  $k \cdot k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$  โดย

ที่  $\epsilon$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$c$  คือความเร็วแสง

$\omega$  คือความถี่เชิงมุม

$t$  คือเวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากในอากาศ เนื่องจากแสงจะได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางเป็นผลทำให้ ความเร็วคลื่น ความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลงโดยพิจารณาจากครรชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - ik \quad (3.3)$$

$n$  = ครรชนีหักเหจริง

$k$  = สัมประสิทธิ์การสูญหาย

สำหรับระนาบคลื่นเอกพันธ์ จะได้ว่า

และ

$$\begin{aligned} |k_1| &= n\omega / c \\ |k_2| &= k\omega / c \end{aligned} \quad (3.4)$$

แทนสมการ (3.4) ลงในสมการ (3.1) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศทาง  $x$  เป็น

$$x = E_{0x} \exp[ i\omega (n\pi/c - t) ] \exp(-\omega kx/c) \quad (3.5)$$

$E_x$  คือสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $x$

$E_0$  คือสนามไฟฟ้าค่าสูงสุด

จากสมการที่ (3.5) แสดงถึงคลื่นแสงเดินทางผ่านตัวกลางในทิศทาง  $x$  ด้วยความเร็ว  $c/n$  ซึ่ง  $E$  จะลดลงด้วยปริมาณ  $\exp(-\omega kx/c)$  และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังสมการ

$$I \propto EE^* \quad (3.6)$$

ดังนั้นจะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

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

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3.7)$$

$\alpha = 4\pi k / \lambda$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ( $\text{cm}^{-1}$ )

$I$  = คือ ความเข้มแสงที่ตำแหน่ง  $x$

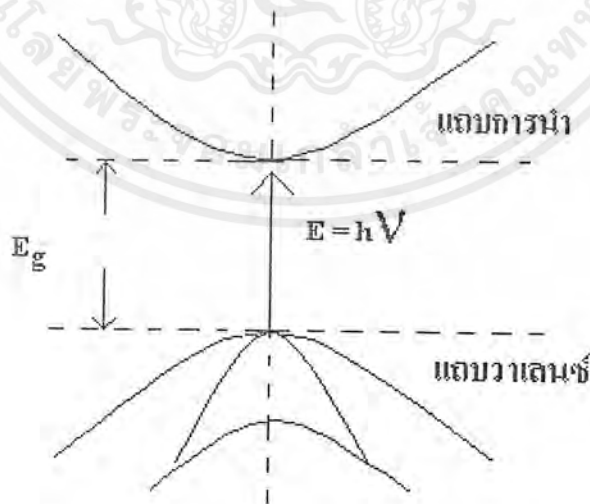
$I_0$  = คือ ความเข้มแสงตกกระทบ ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )

$\lambda$  = คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

จากสมการที่ (3.7) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = -\frac{1}{I} \left( \frac{dI}{dx} \right) \quad (3.8)$$

สมการที่ (3.8) คืออัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง



รูป 3.1 แสดงการย้ายสถานะพลังงานของพาหะเมื่อผลึกมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าแถบว่างพลังงาน การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยเราจะพิจารณาจากโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากยอดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ไปในแนวตั้งตรงกับ ตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำ ซึ่งเรียกการเปลี่ยนสถานะลักษณะนี้ว่าการเปลี่ยนสถานะแบบตรงคังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์มี การเปลี่ยนสถานะในลักษณะนี้ และการเปลี่ยนสถานะลักษณะแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองแบบคือ การเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอม (allowed transition) ชนิดต้องห้าม (forbidden transition) โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออฟติคอลลเมตริกอิเลิเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่กล่าวคือถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบการนำ เราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลาและสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะทั้งแบบยินยอม และแบบต้องห้ามได้ดังนี้คือ

การเปลี่ยนสถานะชนิดยินยอม

$$(\alpha_{hv}) = \frac{2c\hbar}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (hv - E_g)^{\frac{1}{2}} = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

การเปลี่ยนสถานะชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = \frac{2c\hbar}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2}\right)^{\frac{5}{2}} \left| H_{cv}(0) \right|_{K=0}^2 (hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \equiv A'(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (3.10)$$

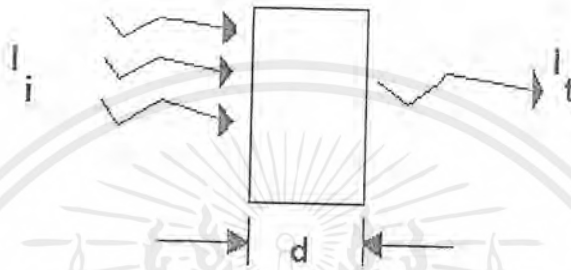
โดยที่

- $\mu$  คือ มวลลดทอน (reduced electron – hole mass)
- $H_{cv}$  คือ ออฟติคอลลเมตริกอิเลิเมนต์ ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบการนำ
- $E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
- $hv$  คือ พลังงาน โฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

ถ้ารับในการทดลองของเราสามารถจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง (transmission) ผ่านสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ทะลุผ่านซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง

ค่าการสะท้อน และการส่งผ่านของแสงจะหาได้จากการดังนี้

$$T = I_t / I_i = (1-R)^2 e^{-\alpha d} / (1+R^2 e^{-2\alpha d}) \quad (3.11)$$

$$R = I_r / I_i = (n-1)^2 + k^2 / (n+1)^2 + k^2 \quad (3.12)$$

- T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
- R คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน
- $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง
- $I_t$  คือ ความเข้มแสงส่งผ่าน
- $I_i$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ
- d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง
- $I_r$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน
- n คือ ดัชนีหักเห
- k คือ สัมประสิทธิ์เอ็กซ์ตริงชัน (extinction coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนาแน่นที่  $R^2 e^{-2\alpha d}$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (3.11) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$T = I_t/I_i = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.13)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไป น้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม  $(1 - R)^2$  มีค่าคงที่ และสมการที่ (3.13) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = \ln(I_i/I_t)/d \quad (3.14)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (3.14) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่าที่เป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นแสง ( $\alpha_0$ ) ที่เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า  $\alpha$  จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำเท่านั้น

## บทที่ 4

### สมบัติทางไฟฟ้า

จากทฤษฎีแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างแถบพลังงานที่มีช่องว่างนี้มีขนาดใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระที่ปรากฏในสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงมีน้อยและส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งชนิดระดับพลังงานผู้ให้ พลังงานผู้รับ หรือศูนย์กลางแห่งการรวมตัว (recombination centers) ก็ได้ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าอุณหภูมิต่ำ ๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

#### 4.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า [6]

ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุยาว  $l$  มีพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าดังสมการ

$$V = El \quad (4.1)$$

และมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดย

$$I = nqv_d A \quad (4.2)$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าหาได้จาก

$$J = I/A = nqv_d = nq\mu E \quad (4.3)$$

- N คือ ความหนาแน่นของพาหะ
- Q คือ ขนาดประจุไฟฟ้า
- $v_d$  คือ อัตราเร็วของพาหะ
- $\mu$  คือ สภาพคล่องตัว
- E คือ ค่าสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $v_d = \mu E$  และจากกฎของโอห์ม  $I = V/R$  และ  $J = \sigma E$  เทียบกับสมการ (4.2) และ (4.3) จะได้

$$\sigma = I/RA \quad (4.4)$$

และ 
$$\sigma = nq\mu \quad (4.5)$$

สำหรับในสารกึ่งตัวนำการนำไฟฟ้าจะเกิดจากพาหะคืออิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าเขียนได้เป็น

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (4.6)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า  $\sigma = 1/\rho$  ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้า มีค่าเป็น

$$\rho = 1/\sigma = 1/q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4.7)$$

หรือเทียบกับสมการที่ (4.4) จะได้

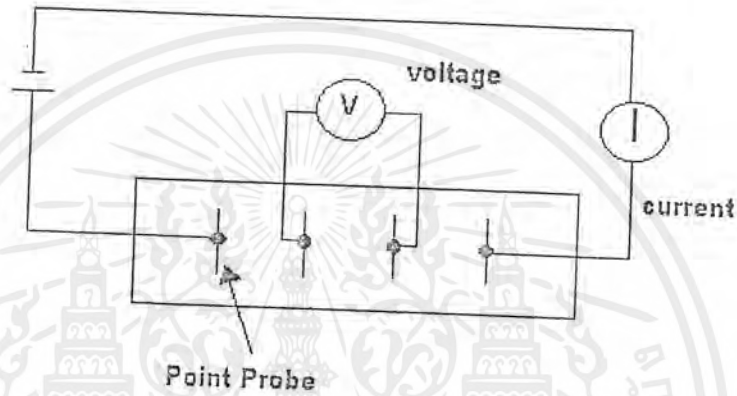
$$R = \rho l/A \quad (4.8)$$

ถ้า  $n \gg p$  จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเป็น

$$\rho = 1/q\mu_n n \quad (4.9)$$

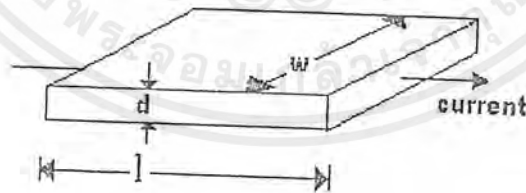
#### 4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [6]

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธี แวนเดอร์เพาว์ (Van Der Pauw) วิธี 2 ขั้วเชิงเส้น (linear two point probes) เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่จะใช้โพรบวัดบนผิวหน้าของฟิล์ม และวิธีที่ใช้กันมากก็คือ การใช้แบบ 4 ขั้วเชิงเส้น (linear four point probes) นี้ รูปแบบรอยต่อนี้จะ แสดงวิธีการวัด ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงวิธีการวัดความต้านทานแผ่นแบบ 4 ขั้วเชิงเส้นของฟิล์มบาง

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว  $l$  กว้าง  $w$  และหนา  $d$  ตามรูปที่ 4.2 จากกฎของโอห์มและใช้สมการ (4.8) จะคำนวณหาความต้านทานฟิล์มได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงขนาดของฟิล์มยาว  $l$  กว้าง  $w$  หนา  $d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = V/I = \rho/lA = \rho l/(wd) \quad (4.10)$$

ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม ( $l = w$ ) ดังนั้นสมการที่ (4.10) เขียนได้ใหม่เป็น

$$R = R_s = \rho/d \text{ ohm}/\square$$

$R_s$  คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

$\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

$$\text{แต่ถ้า } l \neq w \text{ จะได้ว่า } R_s = R(W/l) \quad (4.11)$$

รูปที่ 4.1 สี่ขั้วเชิงเส้น เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบ 4 ขั้ว โดยวัดบนผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใด ๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสี่จะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดย 2 ขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้า และ 2 ขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากการวัดตามรูปที่ 4.1 เราจะหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้สมการดังนี้

$$\rho = 2\pi(V/I) / [ 1/s_1 + 1/s_3 - 1/(s_1+s_2) - 1/(s_2+s_3) ] \quad (4.12)$$

โดยที่  $S$  คือช่องว่างระหว่างขั้ว ในกรณีที่  $S_1 = S_2 = S_3$  สมการที่ (4.12) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\rho = 2\pi S V / I \quad (4.13)$$

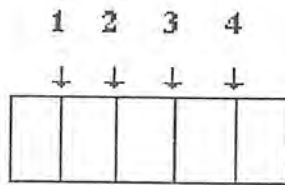
และ ความต้านทานแผ่นหาได้จากสมการ

$$R_s = F^*(V/I) \quad (4.14)$$

โดยที่  $F^*$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ (correction factors) ซึ่งจะสัมพันธ์กับการวัดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า แฟกเตอร์ค่าแก้ สำหรับการวัดฟิล์มบาง



ฟิล์มบาง

ขั้วกระแส	ขั้วความต่างศักย์	แฟกเตอร์ค่าแก้ (F*) ใน กรณีสารที่มีลักษณะเป็น ฟิล์มบาง
1-4	2-3	$(\pi / \ln 2) \approx 4.532$
1-2	3-4	$2\pi / (\ln 4 - \ln 3) \approx 21.84$
1-3	2-4	$2\pi / (\ln 3 - \ln 2) \approx 15.50$
2-4	1-3	$2\pi / (\ln 3 - \ln 3) \approx 15.50$
3-4	1-2	$2\pi / (\ln 4 - \ln 3) \approx 21.84$
2-3	1-4	$(\pi / \ln 2) \approx 4.532$

#### 4.3 การวัดความต้านทานแผ่น (sheet resistance) [6]

การวัดความต้านทานแผ่นใช้วิธี 4 ขั้วเชิงเส้น จะใช้กาวเงินป้ายบนแผ่นฟิล์มบาง ให้มีรูปร่างเป็นแผ่น (strip) สี่แผ่นโดยจ่ายกระแสให้กับ 2 ขั้วนอก ส่วน 2 ขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยมีวงจรไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.1 ความต้านทานแผ่นจะหาได้จากกฎของโอห์ม และสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (4.11)

#### 4.4 การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ ( Hall Effect ) [ 10 ]

ปรากฏการณ์ของฮอลล์ เป็นปรากฏการณ์ที่มีความสำคัญสำหรับศึกษาชนิดของพาหะและความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentrations), สภาพคล่อง (mobility), สภาพนำไฟฟ้า (conductivity), สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ของสารกึ่งตัวนำโดยมีหลักการที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3 กล่าวคือเมื่อจ่ายสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ในทิศ  $x$  ให้แก่ขั้วทั้ง 2 ข้าง (จากซ้ายไปขวา) ของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนไหลในทิศ  $x$  (จากขวาไปซ้าย) และเมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) ที่มีค่าคงที่ ให้แก่สารในทิศ  $z$  (พุ่งเข้า) จะเกิดแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่ในทิศ  $x$  นั้น ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งโค้งขึ้นมายังส่วนบนของสารเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นที่ส่วนล่างของสาร ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าของฮอลล์หรือความต่างศักย์ฮอลล์ขึ้นในทิศ  $y$  (พุ่งขึ้น) ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไป จนระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 4.3 จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ในทิศ  $x$  ต่อไป ( ซ้าย ไป ขวา )

$$\text{จาก } \vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงลอเรนซ์ ( Lorentz Force)

$$\text{เมื่อ } \vec{v} \perp \vec{B} ; F = qE + qvB$$

ในสภาวะสมดุลของแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสนามไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall field,  $E_H$ ) จะมีค่าดังนี้

$$E_H = vB = J_x B / nq$$

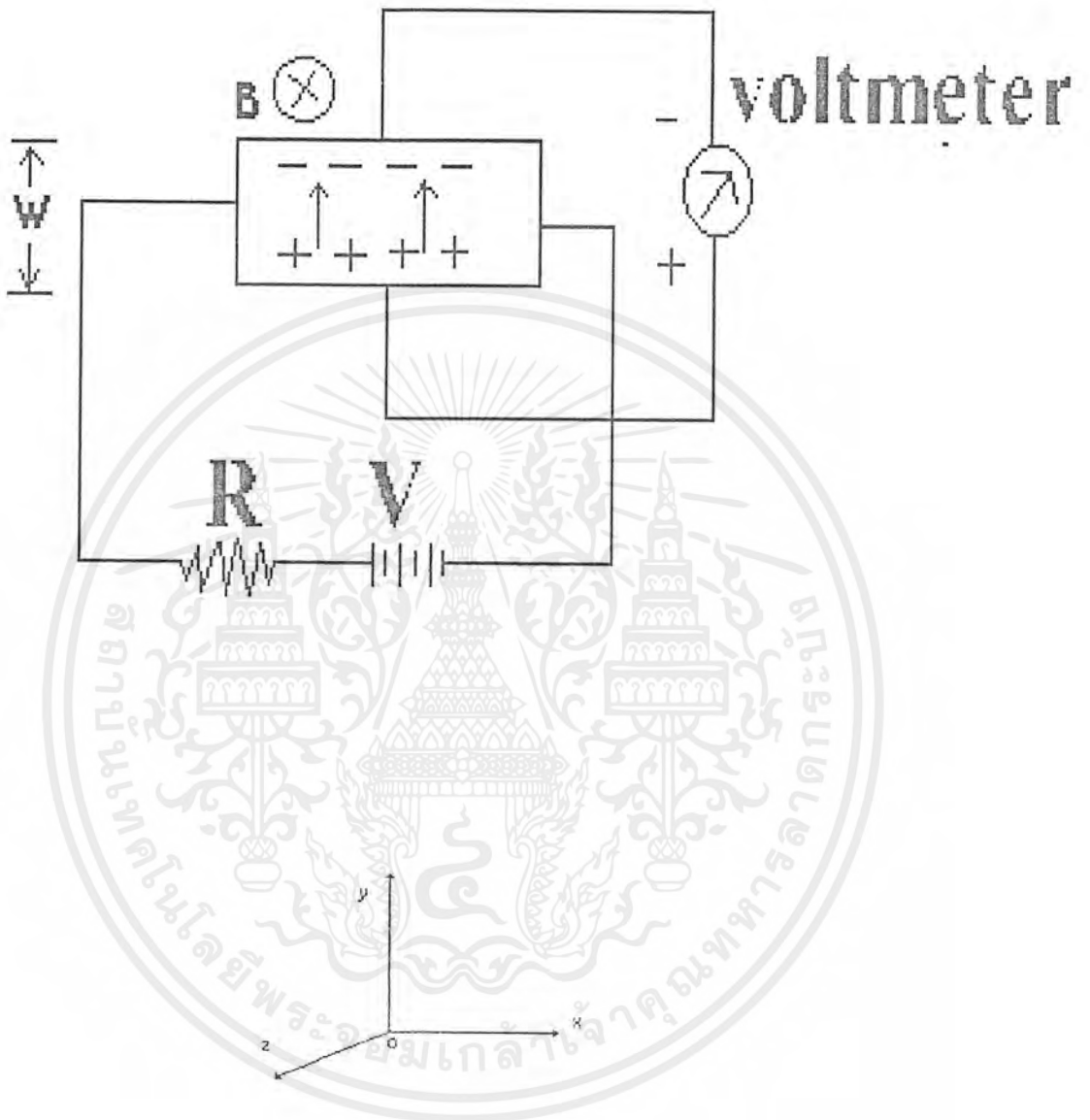
กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)  $R_H$  เขียนได้เป็น

$$R_H = E_H / J_x B$$

ดังนั้นแรงดันฮอลล์ (Hall voltage) คือ

$$\begin{aligned} V_H &= R_H J_x B W \\ &= R_H I_x B / d \end{aligned}$$

เมื่อ  $W$  และ  $d$  คือความกว้างและความหนาของสารตัวอย่างตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงการเคลื่อนที่พาหะอิสระ (free carriers) ภายในสารกึ่งตัวนำในสภาวะสมดุลของแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการเคลือบด้วยการอาบสารเคมี

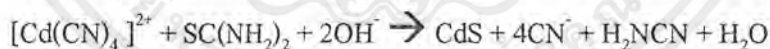
#### 5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [6,11]

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จะเกิดจากการจุ่มแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกใสในอ่างสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือของแคดเมียม เช่น  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{CdCH}_3\text{COOH}$  เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้สารประกอบไทโอยูเรีย ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) ที่จะแตกตัวให้อิออนของซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักในสารละลายที่เป็นเบส และมีค่า  $\text{pH} > 9$  ซึ่งกระบวนการเคลือบฟิล์มมีพื้นฐานจากการแตกตัวของ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{S}^{2-}$  ในสารละลายอย่างช้าๆ โดยที่  $\text{Cd}^{2+}$  จะแตกตัวมาจากเกลือของแคดเมียมซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน และการเคลือบฟิล์ม  $\text{CdS}$  จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณของ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{S}^{2-}$  รวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบของ  $\text{CdS}$  ซึ่งค่า  $k_{sp}$  ของ  $\text{CdS}$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีค่าประมาณ  $1.4 \times 10^{-29}$  จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  เป็นฟิล์มบาง  $\text{CdS}$  บนกระจกใส เนื่องจากเกลือของแคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็มีหลายวิธี เช่น

#### Tetraammine Complex



#### Cyano Complex

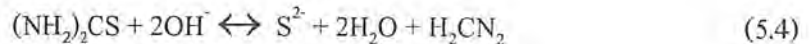


ในโครงการพิเศษนี้ได้เตรียมบาง  $\text{CdS}$  จากเกลือแคดเมียมซัลเฟต  $[\text{CdSO}_4]^{2+}$  โดยมีสมการหลักของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนี้ [12]



แต่ส่วนมากนิยมใช้ในรูปของสารเชิงซ้อนของเตตระแอมมีน (tetraammine) ซึ่งต่อไปจะพิจารณารายละเอียดของการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกรณี

ตัวอย่างของการเกิดปฏิกิริยาเคมี:



## 5.2 การเคลือบฟิล์ม CdS บนกระจกสไลด์ [6]

การเคลือบฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์เกิดขึ้น 2 กระบวนการ คือ

1. กระบวนการควบแน่นของไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (5.1) แอมโมเนียจะทำให้สารละลายมีคุณสมบัติเป็นเบสและเมื่อเติมเกลือของแคดเมียมลงไป จะทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ( $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น และจะเกาะอยู่ที่ผิวของกระจก สไลด์ตามสมการที่ (5.2) นอกจากนี้ยังอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนซึ่งจะปลดปล่อย  $\text{Cd}^{2+}$  ออกมาอย่างช้าๆ ดังสมการที่ (5.3) ส่วน  $\text{S}^{2-}$  จะได้มาจากการแตกตัวของ  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  (ไทโอยูเรีย) โดยกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) แสดงในสมการที่ (5.4) ซึ่งอัตราการแตกตัวขึ้นกับค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย ฟิล์ม CdS จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  ทำปฏิกิริยากันและควบแน่นเป็นฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ หรือ  $\text{S}^{2-}$  ถูกจับสารแขวนลอย  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  ที่เกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรองรับแล้วควบแน่นเป็นฟิล์มบาง CdS บนผิวของแผ่นรองรับซึ่งกระบวนการนี้จะได้ CdS เป็นฟิล์มบาง

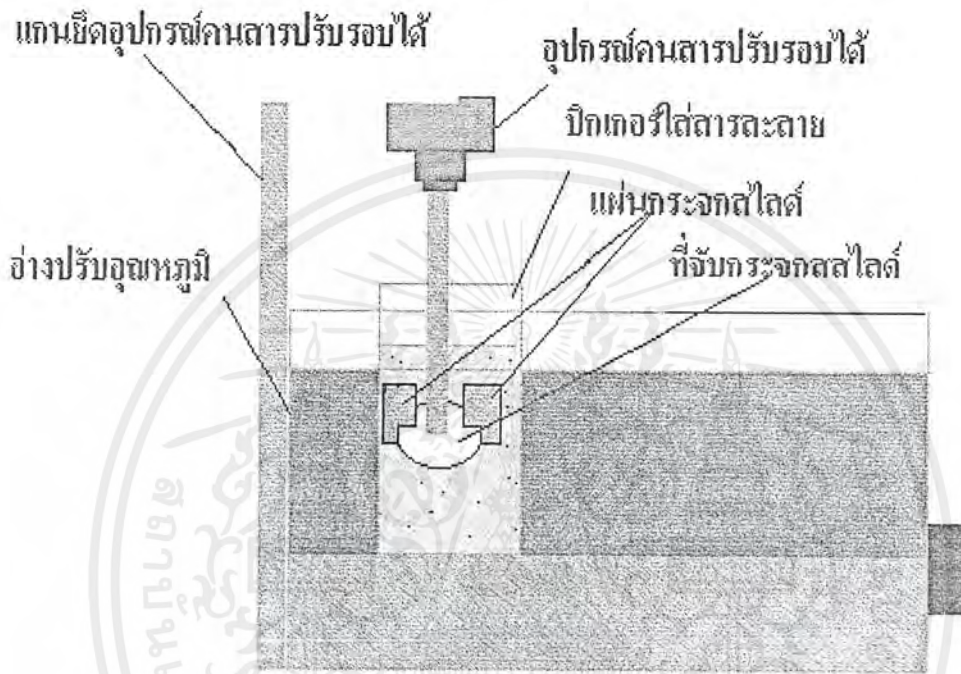
2. กระบวนการดูดซับอนุภาคคอลลอยด์ของ CdS เมื่อเติมเกลือของแคดเมียม และไทโอยูเรียลงในอ่างสารละลายเคมี ซึ่งในอ่างสารเคมี จะมีสารละลายของไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{S}^{2-}$  ซึ่งจะทำให้เกิด คอลลอยด์ ของ CdS คอลลอยด์นี้จะไปเกาะที่ผิวของแผ่นรองรับ และจะถูกดูดซับเป็นชั้นของ CdS บนผิวของแผ่นรองรับ และสิ้นสุดการดูดซับเมื่อคอลลอยด์จับตัวกันและตกตะกอนเป็นอนุภาค CdS ที่ใหญ่ขึ้น โดยชั้นของ CdS ที่เกิดจากกระบวนการนี้จะมีลักษณะเป็นผง

## 5.3 อุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

อุปกรณ์หลักคือ แท่นยึดฐานรองทำด้วยเทฟลอน (taflon) ซึ่งเจาะร่องไว้ 8 ร่องสำหรับเสียบแผ่นกระจกสไลด์ ให้อยู่ในแนวตั้ง (ดังรูปที่ 5.1) แท่งเทฟลอนจะถูกยึดด้วยแท่งแก้วตัน ซึ่งต่อเชื่อมเข้ากับมอเตอร์ปรับรอบได้โดยวงจรควบคุม แล้วจะทำให้แท่นฐานรองหมุนไปด้วยในขณะที่เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางในอัตราเร็ว 60 รอบต่อนาที ส่วนอ่างน้ำสามารถปรับอุณหภูมิได้ให้ความละเอียดได้ถึง 0.5 องศาเซลเซียส อีกทั้งได้มีการเพิ่มอุปกรณ์คนสารละลายซึ่งทำด้วยแท่งแก้วปลายแบน สามารถปรับความเร็วรอบได้ด้วยมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 5.1 แสดงอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธีการอบสารละลายเคมี และศึกษาคุณสมบัติต่างๆเชิงฟิสิกส์ เช่น ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDXS และศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ ศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน หาชนิดของการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ หาค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น ของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ภายใต้เงื่อนไข การ แอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

จากการสังเกตการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายสองชนิด คือ  $CdSO_4$  ในสารละลาย  $NH_3$  และ  $SC(NH_2)_2$  ที่ละลายในน้ำปอดคประจุ ซึ่งในการทดสอบละลายลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอดคประจุ ปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรนั้น เรามักจะเท  $CdSO_4$  ในสารละลาย  $NH_3$  ลงไปก่อน เนื่องจากเราต้องการให้สารละลายในบีกเกอร์นั้นมีค่าเป็นเบส (ซึ่งจะให้หมีค่าความเป็นเบสประมาณ 11.2-11.4 ) จากนั้นจึงเทสารละลาย  $SC(NH_2)_2$  ที่สามารถละลายในน้ำปอดคประจุ โดยใช้ระยะเวลาในการจุ่มกระจกสไลด์ในสารละลายเคมีประมาณ 30 นาที และจากที่สังเกต จะเห็นว่าก่อนที่สารละลายทั้งสอง จะทำปฏิกิริยากันนั้นจะมีลักษณะใส แต่เมื่อเริ่มทำปฏิกิริยากันในบีกเกอร์ สารละลายจะมีลักษณะ ขุ่นขาวในช่วง 30-60 วินาทีแรก จากนั้นจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนจนกระทั่งกลายเป็นสีเหลือง เข้มดังที่เราจะพบได้ก่อนที่จะนำเอากระจกสไลด์ที่อบสารละลายเคมีจนครบ 30 นาที คือ อนุภาค ของสารที่จับกันเป็นก้อนค่อนข้างจะหยาบ มีสีเหลืองเข้ม ซึ่งจะเกาะรอบตามบีกเกอร์ และเมื่อ พิจารณากระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบอยู่ จะพบว่าที่ผิวหน้าฟิล์มบางจะมี อนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์ที่จับกันเป็นก้อนเล็กขนาดไมโครเมตร คล้ายผงฝุ่นเกาะอยู่เช่นกัน ดังนั้นเราจำเป็นต้องขจัดอนุภาคเหล่านั้นออกทันทีเนื่องจากถ้าเราปล่อยให้อนุภาคนั้นแห้ง จะเป็นการ ยากที่จะขจัดเอาอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางออกไป เมื่อเรานำไปล้างออกด้วยเครื่อง อุลตราโซนิค ด้วยเหตุนี้เมื่อนำกระจกสไลด์ที่อบสารละลายเคมีเรียบร้อยแล้ว จึงนำกระจกสไลด์ที่ ได้ไปจุ่มในน้ำปอดคประจุแล้วล้างด้วยเครื่องอุลตราโซนิคทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.1 การเตรียมแผ่นรองรับ (substrate)

แผ่นรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS จะใช้กระจกสไลด์ขนาด  $13 * 25$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> ที่ทำความสะอาดเป็นอย่างดี โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ตัดกระจกสไลด์ให้ได้ขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร
2. นำกระจกที่ตัดไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน และล้างด้วยน้ำปอดประจุ
3. นำกระจกที่ล้างจากข้อ 2 ไปกัดด้วยกรด HF เข้มข้น 7% ประมาณ 10 นาที

นำกระจกไปล้างกรด HF ออก ด้วยน้ำปอดประจุแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วนำไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงสามารถนำกระจกไปใช้งานได้

## 6.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

สารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยเทคนิคการอบสารละลายเคมีประกอบด้วย  $CdSO_4$ ,  $SC(NH_2)_2$  และ  $NH_3$  (25%) จำนวน  $2.5 * 10^{-2}$  โมลาร์  $3.5 * 10^{-2}$  โมลาร์ และ 1.68 โมลาร์ ตามลำดับ [12] สารละลายทั้งหมดถูกเตรียมจากน้ำปอดประจุ (deionized water) ลงในบีกเกอร์และมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ผสมสารละลายแคดเมียมซัลเฟต แอมโมเนีย และไทโอยูเรียเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำ  $CdSO_4$  ละลายน้ำปอดประจุปริมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในขวดรูปชมพู่ และนำขวดรูปชมพู่อีกใบหนึ่งเติม  $NH_3$  ปริมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำไทโอยูเรียผสมเป็น สารละลายคอมเพล็กซ์
2. นำสารที่ผสมแล้วลงในบีกเกอร์ของอุปกรณ์ การเตรียมฟิล์มที่มีน้ำปอดประจุประมาณ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรเตรียมอยู่แล้ว และใส่แผ่นรองรับกระจกลงไปพร้อมทั้งมีการกวนสารละลายด้วยอุปกรณ์คนสารละลายปรับรอบได้ เพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นสม่ำเสมอทั่วกัน แล้วเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เช่น 65, 70, 90 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติมสารละลายไทโอยูเรีย (แตกตัวให้  $S^{2-}$ ) จากนั้นใช้เครื่องกวนสารละลายกวนสารให้เข้ากัน ซึ่งระยะเวลาที่ใช้อบสารประมาณ 30 นาที ซึ่งบางครั้งเราจะใช้เครื่องหมุนสารตัวอย่าง เพื่อให้อนุภาคที่เข้ามาเคลือบเป็นฟิล์มมีความเรียบและสม่ำเสมอ

แรกเริ่มได้หาเงื่อนไขของวิธีการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งได้ทั้งหมด 4 วิธี คือ

1. หมุนกระจกสไลด์ด้วยมอเตอร์รอบต่ำประมาณ 60 รอบ/นาที พร้อมทั้งกวนสารละลายด้วยมอเตอร์รอบต่ำประมาณ 150-160 รอบ/นาที
2. หมุนกระจกสไลด์ด้วยมอเตอร์รอบต่ำประมาณ 60 รอบ/นาที โดยไม่กวนสารละลาย
3. จุ่มในสารละลายโดยไม่ต้องหมุนพร้อมกวนสารละลายด้วยมอเตอร์รอบต่ำประมาณ 150-160 รอบ/นาที
4. จุ่มในสารละลายโดยไม่ต้องหมุน และไม่ต้องกวนสารละลาย โดยความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

3. นำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDXS และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานหาชนิดของการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ หาค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น

4. นำฟิล์มที่ได้จากข้อ 3 ไปแอนนัลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปศึกษาคุณสมบัติต่างๆเชิงฟิสิกส์ที่ได้กล่าวมาแล้วในทำนองเดียวกันต่อไป

แต่ขั้นตอนที่กล่าวไว้ข้างต้นจะเป็นการสังเกตการเกิดปฏิกิริยาอย่างคร่าวๆ ดังนั้นจึงขอสรุปผลลักษณะของฟิล์มในเงื่อนไขที่เรากล่าวไว้ในตอนแรก จากที่เราได้ทำการทดลองเตรียมฟิล์มบางกว่า 13 ครั้ง และได้กระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เคลือบอยู่กว่า 100 ตัวอย่าง ซึ่งเราได้จำแนกระดับคุณภาพของฟิล์มพร้อมทั้งบอกเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียม โดยพิจารณาจากในขั้นแรกเมื่อทำการล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแล้วผิวเรียบสม่ำเสมอเมื่อมองด้วยตาเปล่ามีลักษณะมันวาว และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าผิวหน้ามีความสม่ำเสมอคือเนื้อฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพดี ในส่วนของการพิจารณาที่จะให้ระดับคุณภาพอื่นๆนั้นจะอยู่ที่ดุลพินิจ ซึ่งต้องมาเปรียบเทียบกันอีกครั้ง ดังนั้นจึงขอสรุป ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.1 फिल्मตระกูล T3

เป็นฟิล์มที่คุณภาพดีมาก อุณหภูมิที่ใช้ 75 องศาเซลเซียส ค่า  $\text{pH} \approx 11.4$  ใช้เงื่อนไขที่ 4 โดยไม่มีการหมุนกระจกสไลด์ และไม่มีการคนสารละลาย ลักษณะฟิล์มที่ได้มีลักษณะผิวเรียบ เป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอ หนามีลักษณะเป็นมันวาว ยึดติดกับกระจกได้ดี และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่ามีความสม่ำเสมอดี เมื่อเทียบกับฟิล์มอื่นๆ



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล T3 ที่เตรียมได้

### 6.2.2ฟิล์มตระกูล S4A

เป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดี มีการเตรียมโดยนำกระจกสไลด์จุ่มลงในน้ำปอดคประจุ (ยังไม่มีสารตั้งต้น) แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึง 70 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อยเทสารตั้งต้นให้ทำปฏิกิริยาค่า pH ประมาณ 11 ปริมาณสารละลายในบีกเกอร์ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งทำการจุ่มเป็นเวลา 40 นาที โดยใช้เงื่อนไขที่ 4 อีกเช่นกันคือ ไม่มีการหมุนกระจกสไลด์ และไม่มีการคนสารละลาย จากนั้นทิ้งให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นระยะเวลาประมาณ 68 ชั่วโมง จึงนำมาล้างด้วยเครื่องอุตสาหกรรมอัตโนมัติ ลักษณะฟิล์มที่ได้มีผิวเรียบสม่ำเสมอ มีความมันวาว เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่ามีความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มค่อนข้างดี



รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล S4A ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.3 फिल्मตระกูล N5

เป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดี โดยหน้าปอดประจุในบิกเกอร์ให้ที่มีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรมีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่ติด อยู่กับฐานรองจุ่มลงในน้ำปอด ประจุพร้อมเทสารละลายทั้ง 2 อย่างลงไปพร้อมกัน โดยใช้เงื่อนไข่ที่ 2 กล่าวคือ หมุนกระจกสไลด์ด้วยสเปดมอเตอร์รอบต่ำประมาณ 60 รอบ/นาที ค่า pH ที่ได้ประมาณ 13 ปริมาตรรวม 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้เวลาในการอาบสารเคมี 40 นาที เมื่อนำ ฟิล์มบางที่ได้มาล้างด้วยเครื่องอุตสาหกรรมให้ เนื้อฟิล์มมีลักษณะคล้ายกับ S4A



รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล N5 ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.2.4 फिल्मตระกูล S6-2

เป็นฟิล์มที่มีคุณภาพค่อนข้างดีกล่าวคือ มีความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มแต่เมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ยังพบว่าเนื้อฟิล์มยังไม่สม่ำเสมอมากนักแต่มีความหนาค่อนข้างมากเมื่อดูจากสีของฟิล์มที่ได้จะมีความเข้ม วิธีการเตรียม นำบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของ น้ำปดคประจุอยู่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ไปเพิ่มอุณหภูมิในอ่างปรับอุณหภูมิ ซึ่งตั้งไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส และก่อนที่จะใส่สารตั้งต้นลงในบีกเกอร์ที่มีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรนั้น เราจะทำการผสมสารตั้งต้นทั้งสองเข้าด้วยกันก่อนที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการเขย่าให้เข้ากัน (จากที่สังเกต เมื่อทำการผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกันแล้วที่อุณหภูมิ จะพบว่าการเกิดปฏิกิริยาจะช้ามาก เพราะสารละลายยังคงใสอยู่เหมือนเดิม แต่พอเทสารละลายลงไปผสมกับน้ำปดคประจุที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าสารละลายที่เทลงไปมีลักษณะขุ่นทันที จึงทำให้รู้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วหรือช้า) แล้วเทลงในบีกเกอร์ ใช้เงื่อนไขที่ 2 คือหมวนกระจกสไลด์ด้วยความเร็วต่ำประมาณ 50-70 รอบ/นาที ซึ่งมีค่า  $pH \approx 11.4$  และมีปริมาตรรวม 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

### ฟิล์มตระกูล S6-2

#### รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล S6-2 ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.5 फिल्मตระกูล JAK1

เป็นฟิล์มที่มีความหนาที่ได้จากการเตรียมค่อนข้างมากเมื่อดูจาก ความเข้มของเนื้อฟิล์ม ในการเตรียมได้ทำการลดสัดส่วนลง 50% เริ่มต้นทำการผสมสารตั้งต้นทั้ง 2 เข้าด้วยกัน จากนั้นใส่สารตั้งต้น ที่ผสมด้วยกันแล้วเทลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอดคประจุอยู่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ขึ้นต่อไปนำกระจกสไลด์ที่ติดอยู่กับฐานรองเพื่อทำการหมุนไปจุ่มในบีกเกอร์ที่มีสารตั้งต้นผสมอยู่ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปวางในอ่างปรับอุณหภูมิแล้วตั้งอุณหภูมิไปที่ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการให้เกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆ พร้อมกับหมุนกระจกสไลด์ด้วยความเร็ว 50-70 รอบ/นาที ค่า pH  $\approx$  12 และปริมาตรรวม 160 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล JAK1 ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.6 फिल्मตระกูล S1

คุณภาพฟิล์มที่ได้จะความสม่ำเสมอบางส่วน เนื่องจากเป็นฟิล์มชุดแรกที่ได้มีการเตรียมและทำการจดบันทึก ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเท่าเดิม (ตามปริมาณที่กล่าวไว้ข้างต้นในวิธีการเตรียม) โดยวิธีการเตรียมเราจะทำการชั่งสารตั้งต้นที่มีลักษณะเป็น ผล็กสีขาว คือ  $\text{CdSO}_4$  และ  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  อย่างละ  $2.5 \cdot 10^{-2}$  โมลาร์ และ  $3.5 \cdot 10^{-2}$  โมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นนำบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุ จำนวน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรไปเพิ่มอุณหภูมิในอ่างปรับอุณหภูมิ โดยตั้งไว้ที่ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นรอให้น้ำปลอดประจุในบีกเกอร์มีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเนื่องจาก  $\text{CdSO}_4$  จะละลายในแอมโมเนีย จึงต้องใส่แอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 25% ลงไปละลายในน้ำปลอดประจุก่อนจึงเท  $\text{CdSO}_4$  ตามลงไป จากนั้นเราจึงใส่ ผงไทโอยูเรีย  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  พร้อมกับเติมน้ำปลอดประจุให้มีปริมาตรรวม 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจุ่มกระจกสไลด์พร้อมฐานรองเพื่อหมุนกระจกสไลด์ด้วยความเร็วรอบต่ำประมาณ 50-60 รอบ/นาที จากนั้น คนสารละลายให้สารตั้งต้นละลายเข้ากันได้ดี โดยใช้มอเตอร์รอบต่ำอีกตัวทำการคนสารที่ความเร็วรอบประมาณ 150 รอบ/นาที จากนั้นใช้แอมโมเนียปรับค่า pH ให้อยู่ ประมาณ 11-12 และใช้เวลาในการอบสารละลายประมาณ 30 นาที

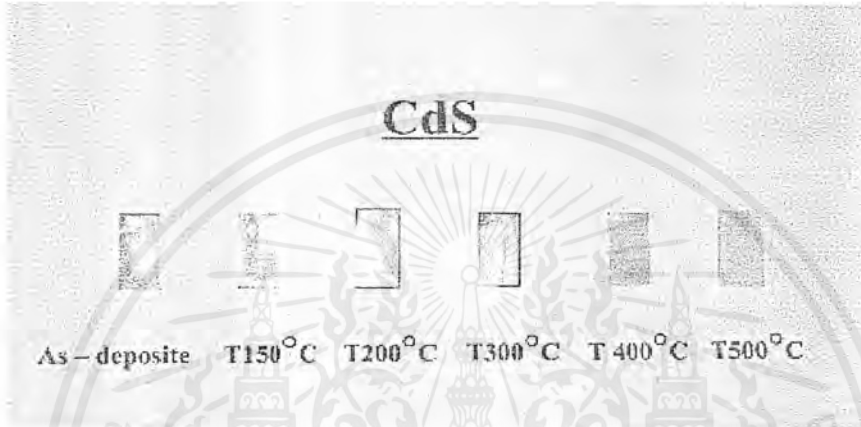
## ฟิล์มตระกูล S1

รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล S1 ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.7 ฟิล์มตระกูล SB-1 เมื่อแอนนิตที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 6.7 แสดงฟิล์มบางของตระกูล SB-1 จำนวน 5 ชิ้น ที่นำไปแอนนิตในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 150, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที สีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากเหลืองอ่อนไปเป็นเหลืองเข้ม ซึ่งเนื่องมาจากอะตอมของซัลเฟอร์ ระเบิดออกมา

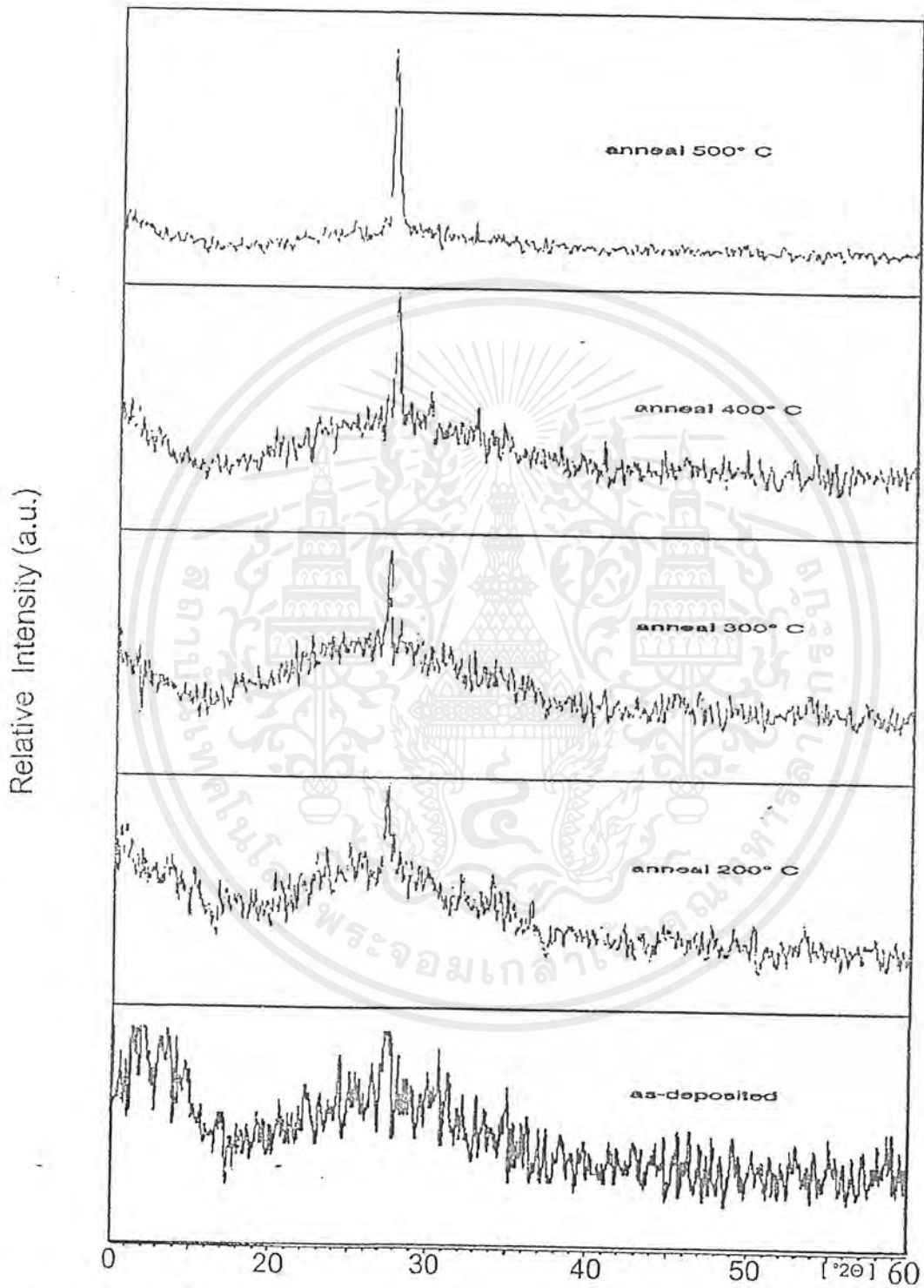


รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะของฟิล์มบางตระกูล SB-1 ที่ผ่านการแอนนิตที่อุณหภูมิต่างๆ

### 6.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

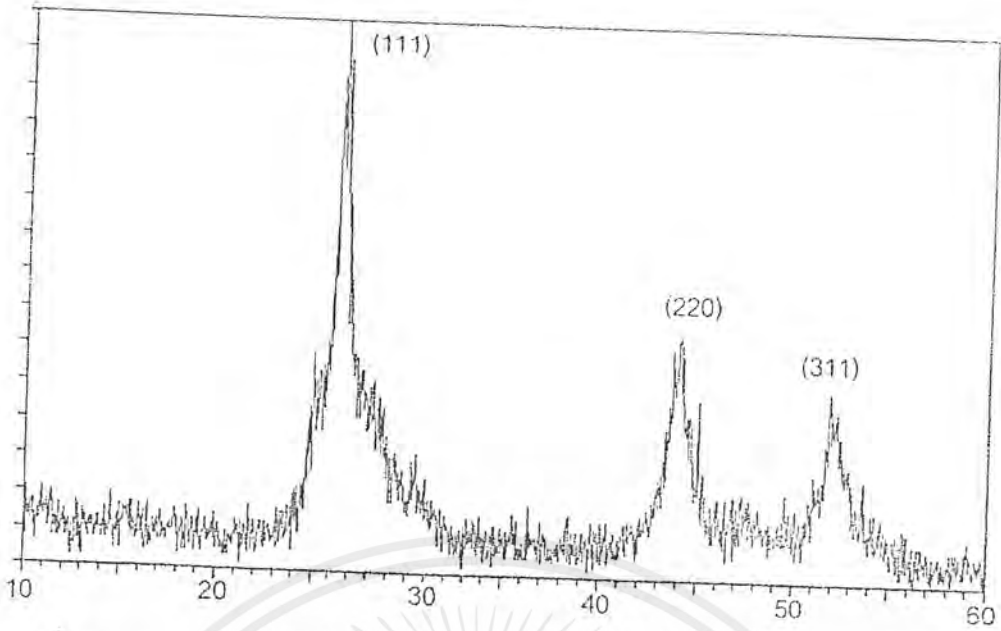
เนื่องจากเราต้องการทราบโครงสร้างของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ดังนั้นจึงนำชิ้นสารตัวอย่างไปวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากรูปที่ 6.8 เมื่อแอนนิตที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจะคมชัดมากขึ้นกล่าวคือ ความกว้างของพีคจะลดลงและความเข้มพีคจะสูงขึ้น ส่วนผลึกที่ตกตะกอนภายในและเคลือบข้างบิกเกอร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะแสดงผลดังรูปที่ 6.9 จากรูปที่ 6.10 เป็นการเปรียบเทียบพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางกับพีคการเลี้ยวเบนของผลึกผง Cds ที่มี โครงสร้างแบบเฮกซะ โกนอล พบว่าพีคของการเลี้ยวเบนที่ได้จากระนาบต่างๆของฟิล์มบางที่ปรากฏออกมา พีคการเลี้ยวที่ได้จากระนาบของผลึกผงที่มี โครงสร้างแบบเฮกซะ โกนอลนั้นนอกจากตำแหน่งของพีคที่ได้จากฟิล์มบางยังมีการเลื่อนไปจากตำแหน่งของพีค ( 111 ) ของผงผลึกที่ตกตะกอนที่ โครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก เนื่องจากพีคที่ปรากฏจากฟิล์มบางมีเพียงพีคเดียวเท่านั้นจึงทำให้ไม่สามารถสรุปผลได้แน่ชัดว่าเป็นพีคที่ได้จากระนาบการเลี้ยวเบน (002) ที่มี โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล หรือ (111) ที่มี โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

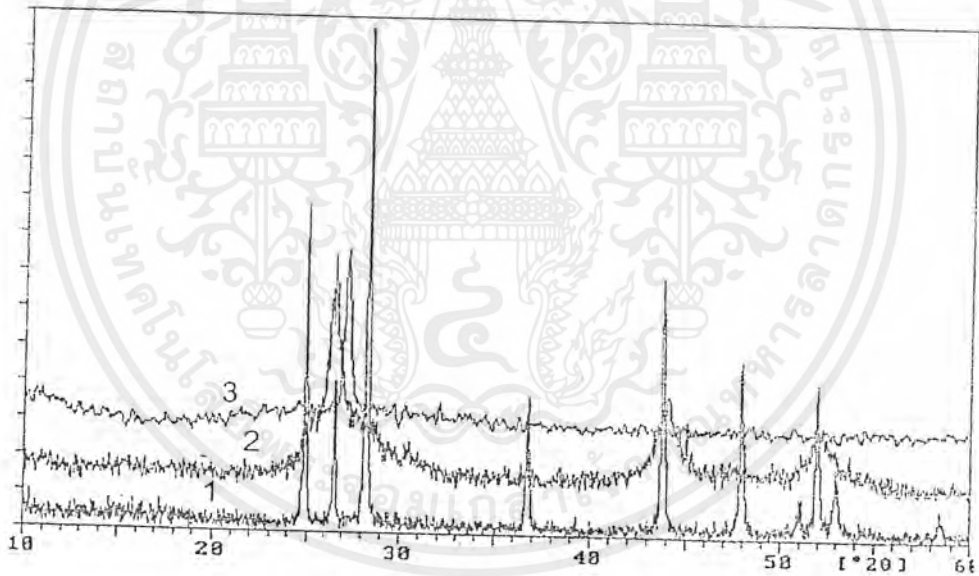


รูปที่ 6.8 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ภายใต้เงื่อนไขการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงผลของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ดังต่อไปนี้ (111),(220),(311) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก



รูปที่ 6.10 แสดงการเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก CdS มาตรฐาน (กราฟเส้นที่ 1) ผงผลึกที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ (กราฟเส้นที่ 2) และผลึกที่เคลือบบนฟิล์มบาง (กราฟเส้นที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

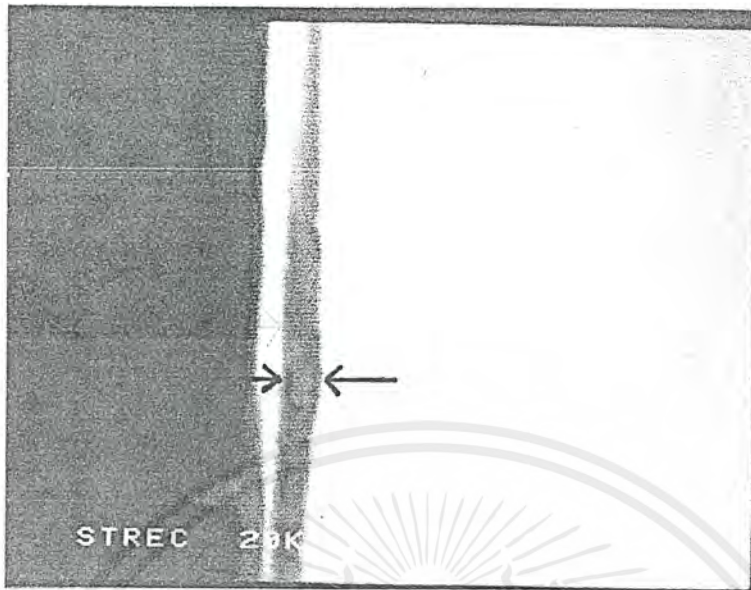
#### 6.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDXS

จากรูปที่ 6.11 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JEOL,model : JSM - 6400) ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยความต่างศักย์ที่ใช้เท่ากับ 25 kV มีกำลังขยาย 60000 เท่า ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีพอสมควร ดังนั้นจึงไม่ต้องฉาบผิวหน้าด้วยฟิล์มของทองคำ พบว่าขนาดของเกรนมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร ส่วนกลุ่มสี่ขาจำนวน 2 กลุ่มในรูปที่ 6.11 คือผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ติดอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบาง เนื่องจากขจัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกไม่หมด ส่วนรูปที่ 6.12 คือภาพถ่ายของด้านตัดขวางของกระจกใสโลกที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่ พบว่าความหนาของฟิล์มบางมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร

จากเทคนิคของ EDXS สามารถใช้หาองค์ประกอบของธาตุสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมได้ มีอะตอม Cd และ S เป็นองค์ประกอบส่วนอะตอม Na, Ca, Si, O และ Mg ในรูปที่ 6.13 มาจากกระจกใสโลก ซึ่งเป็นฐานรองของฟิล์มบาง



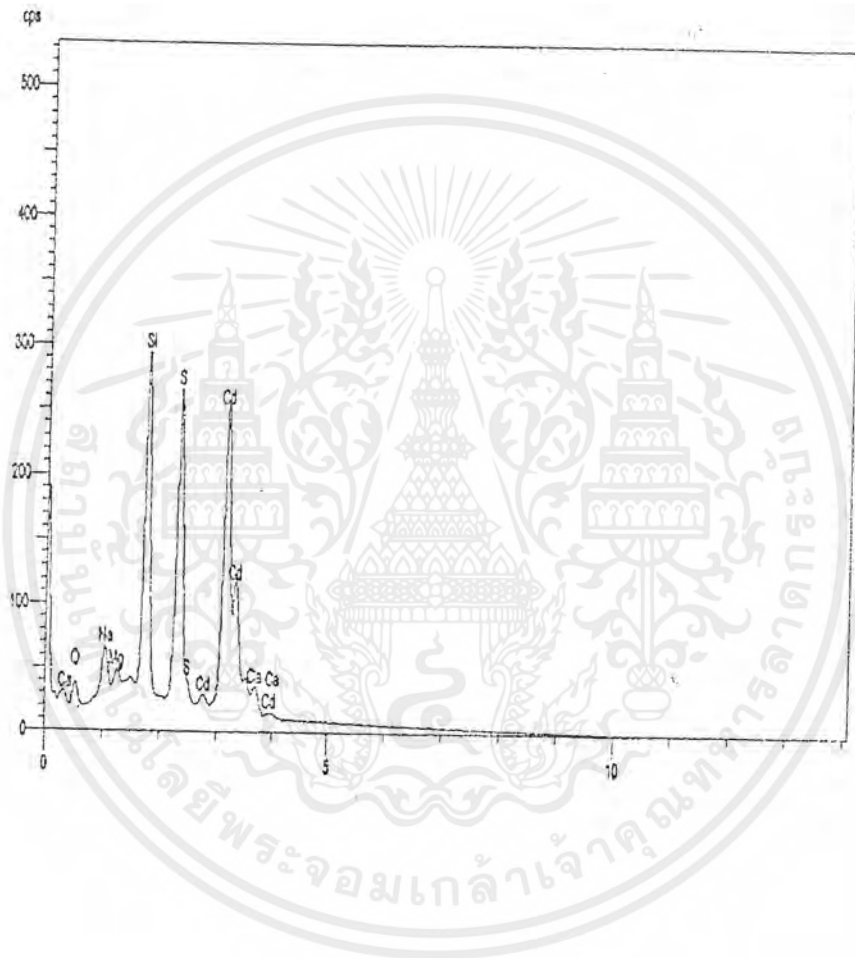
รูปที่ 6.11 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่กำลังขยาย 60,000 เท่า จากรูปจะเห็นเป็นผงฝุ่นจำนวน 2 กลุ่ม ซึ่งหลุดออกไม่หมด



รูปที่ 6.12 แสดงภาพถ่ายด้านตัดขวางของกระจกสไลด์ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่ เพื่อวัดความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ซึ่งมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร

จากนั้นได้ทำการวัดองค์ประกอบธาตุที่ปนอยู่ในฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการวัดแบบ EDXS ซึ่งเป็นหลักการขั้นพื้นฐานของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์มาอธิบายกล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนเข้าไปกระทบเป้าซึ่งในที่นี้เป็นสารตัวอย่าง CdS จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมของสารตัวอย่างถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (จากระดับพลังงานชั้น  $K \rightarrow M$  หรือ  $K \rightarrow L$ ) เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่สถานะพลังงานเดิมหรืออิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าตกกลับลงมาสู่สถานะพลังงานนั้นจะปลดปล่อยพลังงานรังสีเอ็กซ์ในย่าน  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$  ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

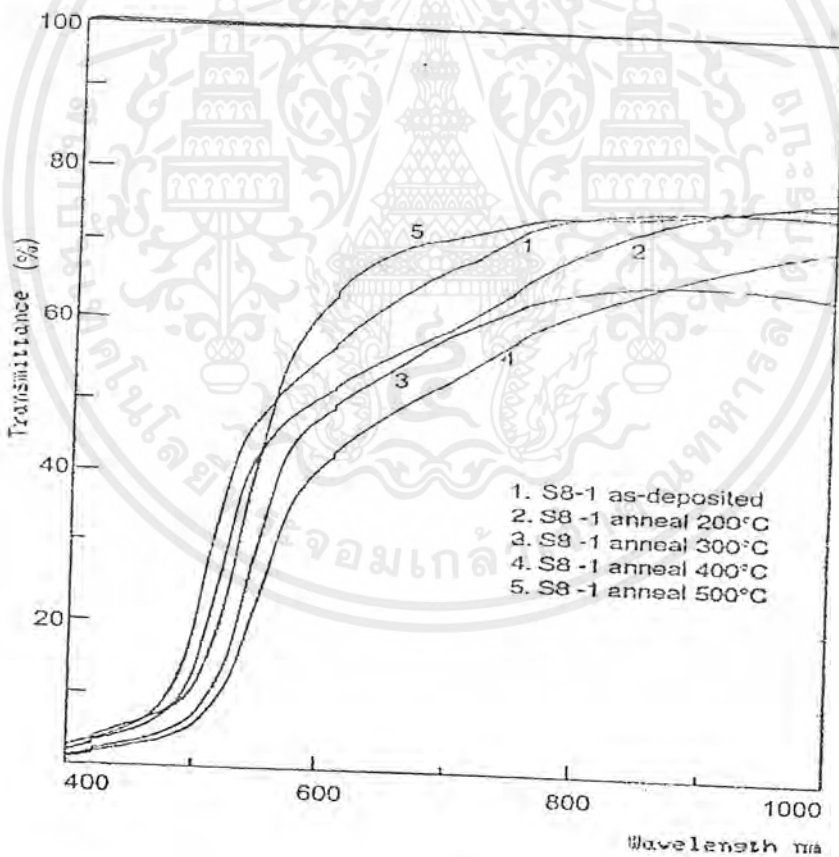


รูปที่ 6.13 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านของแสงเพื่อกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงาน

รูปที่ 6.14 เป็นการวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางตระกูล SS-1 ซึ่งได้เตรียมพร้อมกันจำนวน 8 แผ่น จะเห็นได้ว่าชั้นสารตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแอนนีส ช่วงของความยาวคลื่นที่แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 540 นาโนเมตร สามารถส่งผ่านออกไปได้ แต่เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส, 400 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียส ขอบของการส่งผ่าน (transmission edge) ซึ่งก็คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ส่งผ่านได้จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางมากกว่า 60% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มบาง จากผลการทดลองจึงประมาณได้ว่าฟิล์มบางแผ่นที่นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความหนามากที่สุด ขอบของการส่งผ่านจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลงเมื่อ แอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

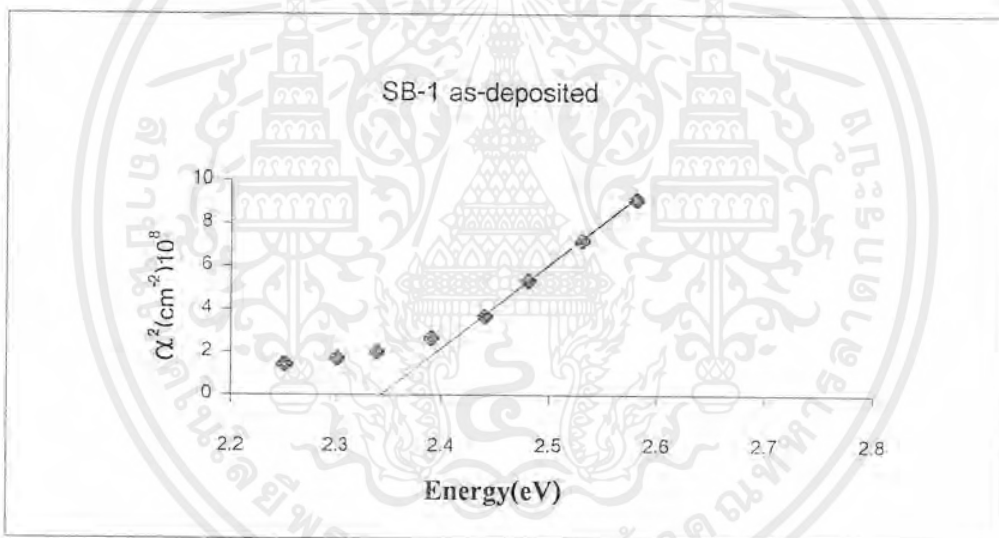


รูปที่ 6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของสารตัวอย่าง SS-1 ภายใต้เงื่อนไขการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส

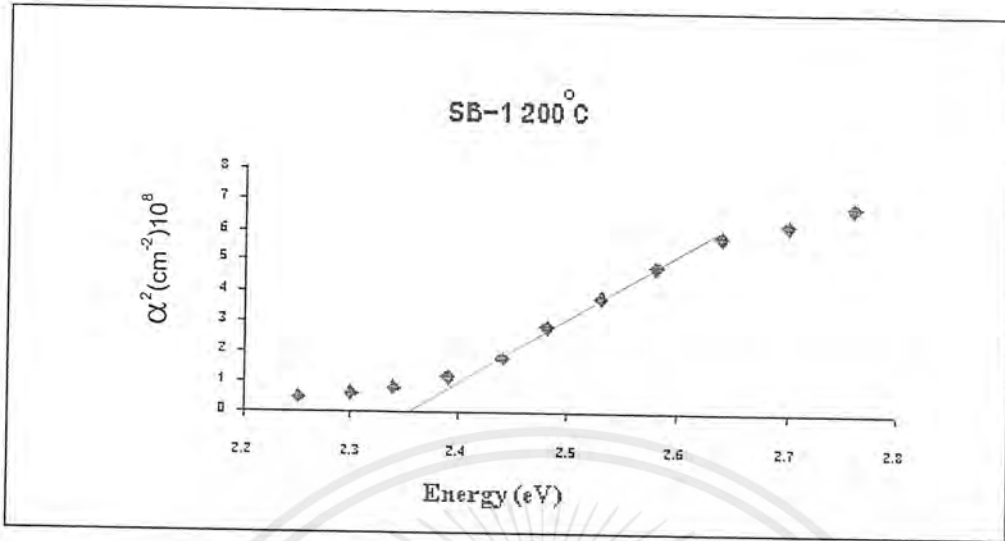
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.15 – 6.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์  $\alpha^2$  กับ  $h\nu$  ของสารตัวอย่างตระกูล SB-1 จากการลากต่อส่วนที่เป็นเส้นตรงไปตัดกับแกนนอน จะเป็นขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากฟิล์มบางมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยวเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้ [11]

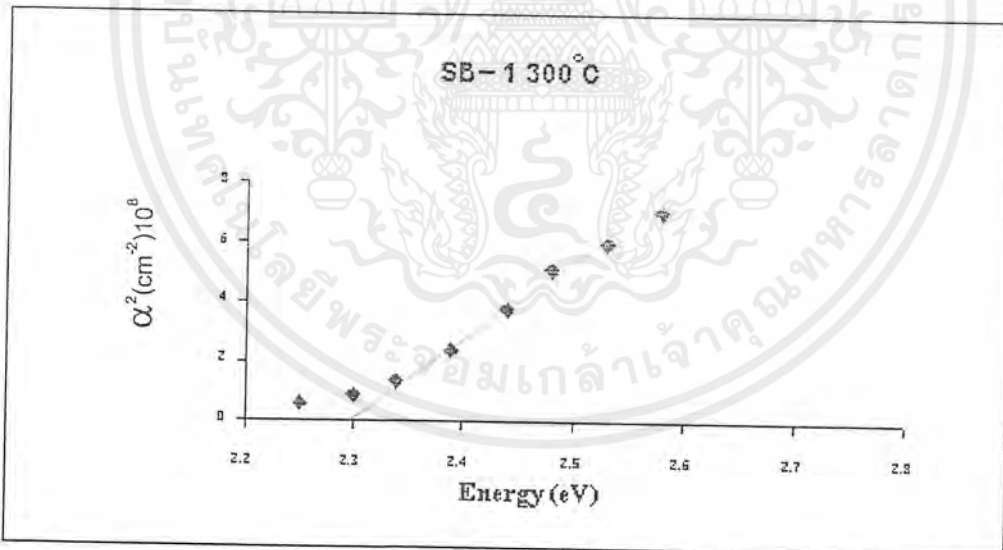
ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารตัวอย่าง SB-1 ที่แอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ และ สำหรับรูปที่ 6.20 แสดงขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีส กล่าวคือ เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 300 และ 400 องศาเซลเซียส ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิของการแอนนีสเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ ผลของผู้ที่ได้รายงานไว้ [12]



รูปที่ 6.15 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของ สารตัวอย่าง SB-1 ที่ไม่ได้ทำการแอนนีส (as – deposited)

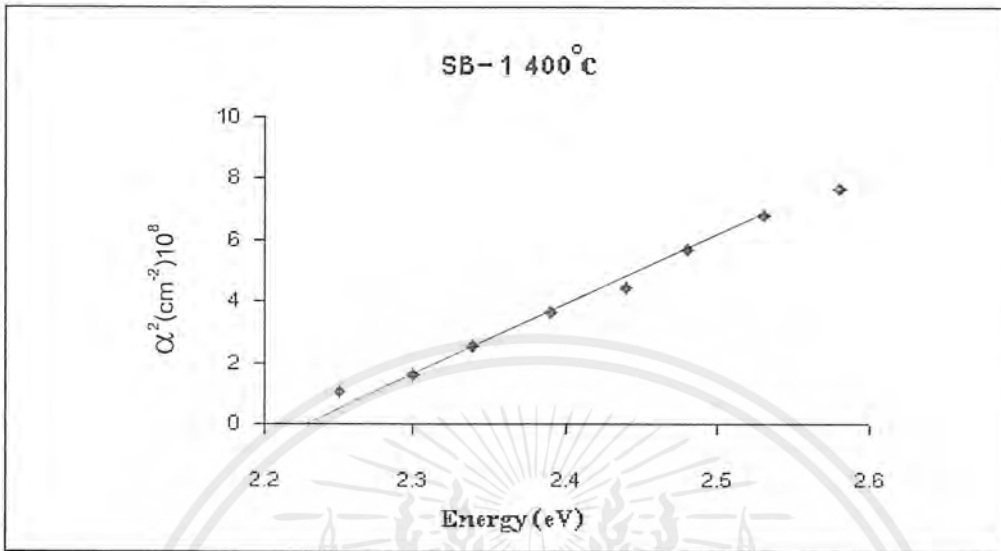


รูปที่ 6.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนีกัล ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 20 นาที

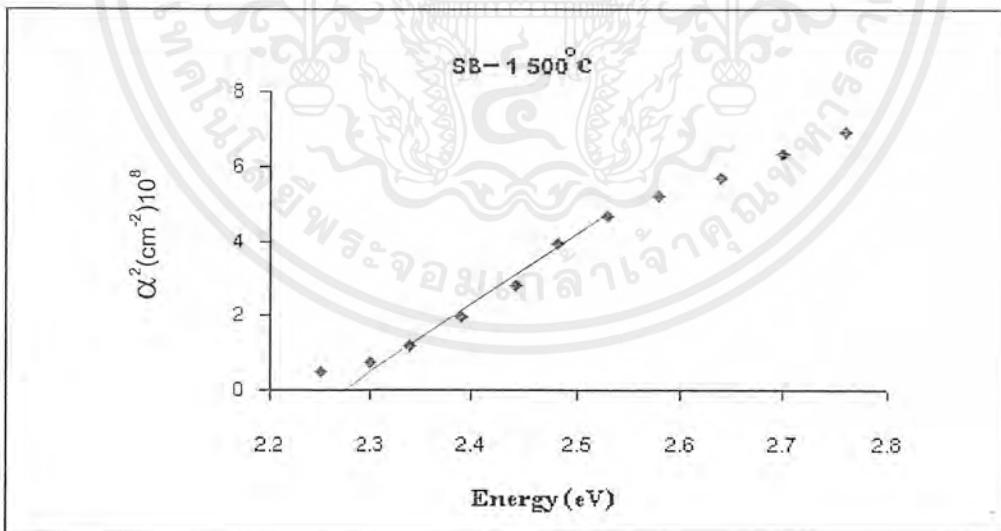


รูปที่ 6.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนีกัลสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha^2$  กับพลังงานโฟตอน (hV) ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนัลสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 20 นาที

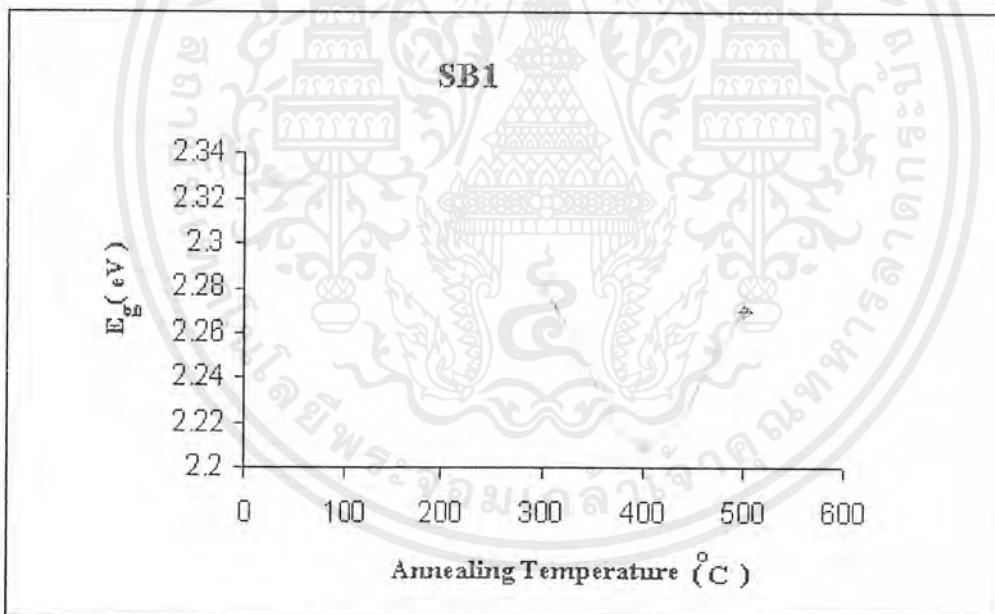


รูปที่ 6.19 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha^2$  กับพลังงานโฟตอน (hV) ของสารตัวอย่าง SB-1 เมื่อทำการแอนนัลสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารตัวอย่าง SB-1 ที่แอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิแอนนีส ( °C )	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) (eV)
as – deposited	2.33
200 °C	2.31
300 °C	2.28
400 °C	2.21
500 °C	2.27



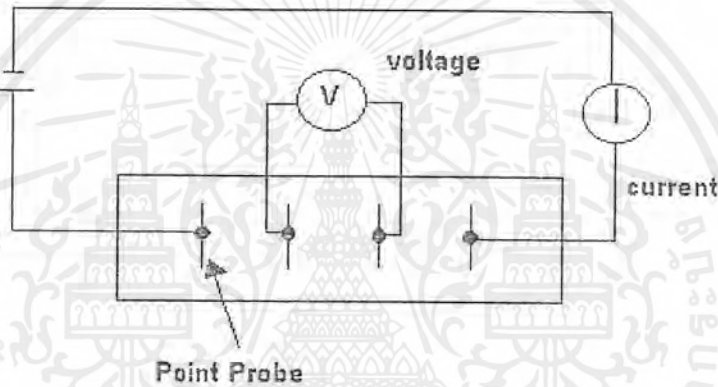
รูปที่ 6.20 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของสารตัวอย่าง SB-1 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.6 วิธีและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

### อุปกรณ์ที่ต้องใช้

1. กาวเงินนำไฟฟ้า (silver paste)
2. แหล่งจ่ายไฟ 30 V
3. อิเล็กทรอนิกส์ Keithley 610 CR
4. มัลติมิเตอร์ Fluke 8842A
5. หลอดฮาโลเจน 500 w



รูปที่ 6.21 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น

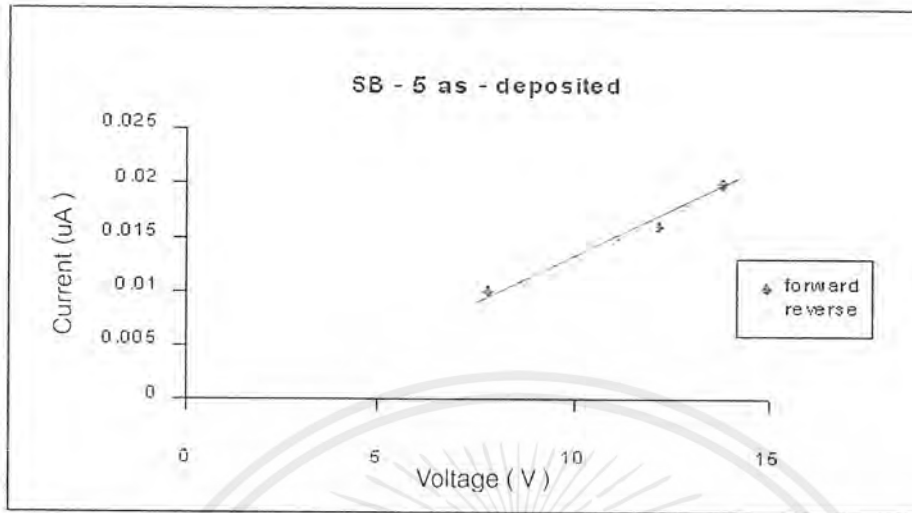
### วิธีการทดลอง

- 1) นำฟิล์มบางมาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงิน แฉกบนผิวหน้าของฟิล์มบางโดยแบ่งระยะระหว่างจุดที่แฉกเท่ากันเป็นจำนวน 4 จุดดังรูปที่ 6.21
- 2) ต้องวงจรตามรูปที่ 6.21
- 3) จ่ายกระแสให้แก่วงจรแล้ววัดค่าแรงดันที่ได้ โดยทำการวัดทั้งหมดประมาณ 10 ค่า ซึ่งกระแสที่จ่ายควรมีค่าน้อยๆ เช่น  $0.1 \mu\text{A}$ ,  $0.2 \mu\text{A}$ ,  $0.3 \mu\text{A}$ ,  $0.4 \mu\text{A}$ ,  $0.5 \mu\text{A}$  เป็นต้น
- 4) ทำการทดลองเหมือนขั้นตอนที่ 3 แต่สลับขั้วแหล่งจ่ายกระแส (reverse bias)
- 5) จ่ายกระแสให้แก่วงจรแล้ววัดค่าแรงดันที่ได้ 10 ค่า พร้อมกับสลับขั้วแหล่งจ่าย เช่นเดิม แต่มีการฉายแสงจาก หลอดฮาโลเจนลงสู่ผิวหน้าของฟิล์มบาง ด้วยความเข้ม  $3 \text{ mW/m}^2$
- 6) นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

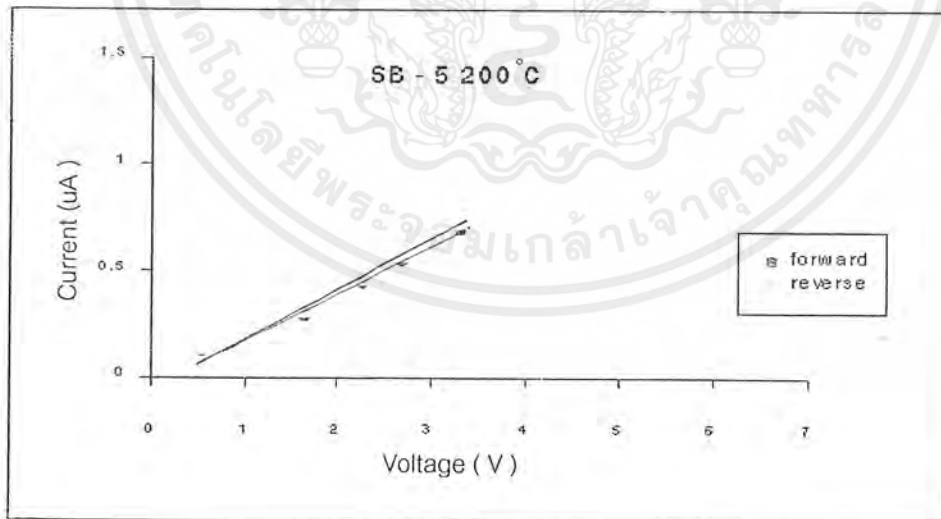
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขณะไม่มีการฉายแสงความเข้มของเส้นกราฟขณะไบอัสตรงและไบอัสกลับทางมีค่าเท่ากัน แสดงว่ารอยต่อไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส อีกทั้งการวัดความต่างศักย์ที่ขั้ว 2 และ 3 เป็นการหลีกเลี่ยงผลของรอยต่อของขั้วที่ 1 และ 4 ส่วนรูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่แอนนีกัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากการทดลองฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้ม  $3 \text{ mW/cm}^2$  พบว่าความต้านทานของสารตัวอย่างจะลดลง (ดังรูปที่ 6.24-6.27) ส่วน ตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.25 แสดงความต้านทานแผ่นของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของการแอนนีกัลภายในเงื่อนไขการฉายแสงและไม่ฉายแสงซึ่งพบว่าเมื่อมีการแอนนีกัลสารตัวอย่างจะทำให้ความต้านทานแผ่นลดลงและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีกัล 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อแอนนีกัลที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกจะทำให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่เร็วมากนัก เมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส

นอกจากนั้นการแอนนีกัลที่อุณหภูมิในช่วง 200-300 องศาเซลเซียส ความต้านทานแผ่นจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อมีการฉายแสง แต่เมื่อแอนนีกัลที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ความต้านทานแผ่นจะเปลี่ยนแปลงไปมากภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสง

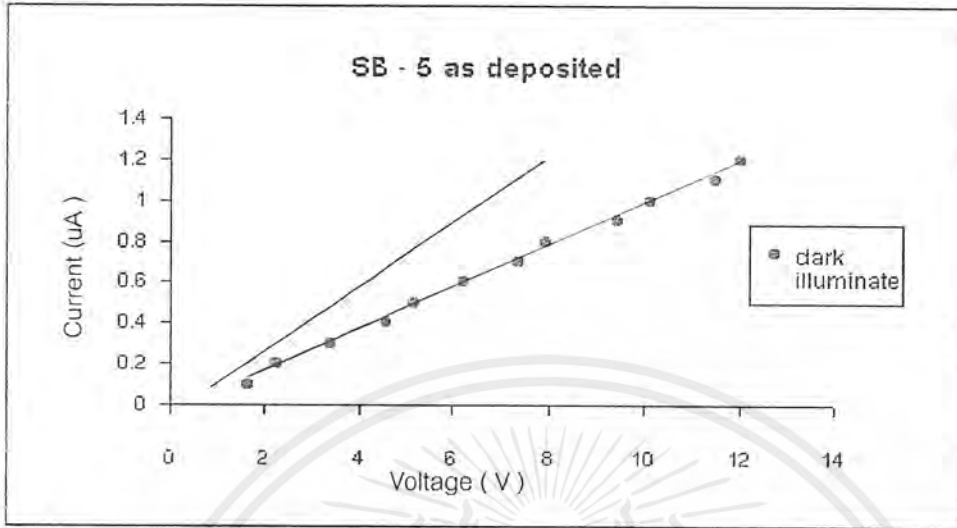


รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและไม่ได้ทำการแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสง (โดยที่  $\blacklozenge$  คือ ไบอัสตรง (forward bias) ซึ่งหมายถึง การให้ กระแสไหล จากขั้วหมายเลข 1 ออกทาง หมายเลข 4 ส่วน  $\bullet$  คือ ไบอัสกลับทาง (reverse bias) ซึ่งหมายถึง การให้กระแสไหลจาก ขั้วหมายเลข 4 ออกทางขั้วหมายเลข1)

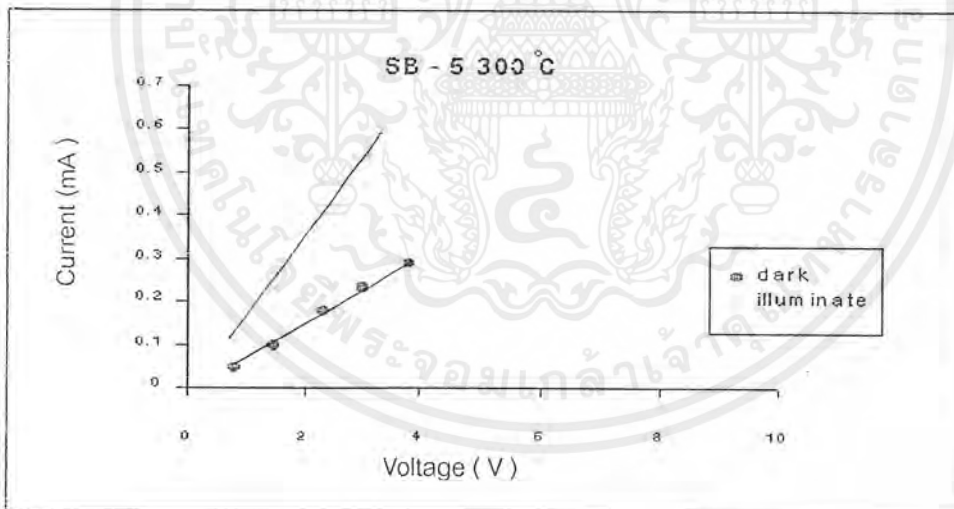


รูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์(I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

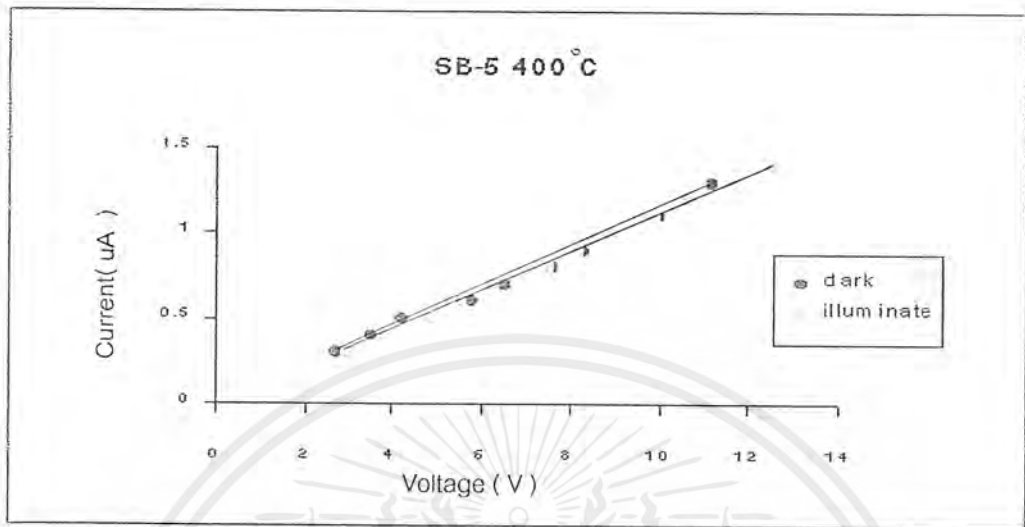


รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและไม่ได้ทำการแอนนัล ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้ม  $3\text{mW/cm}^2$

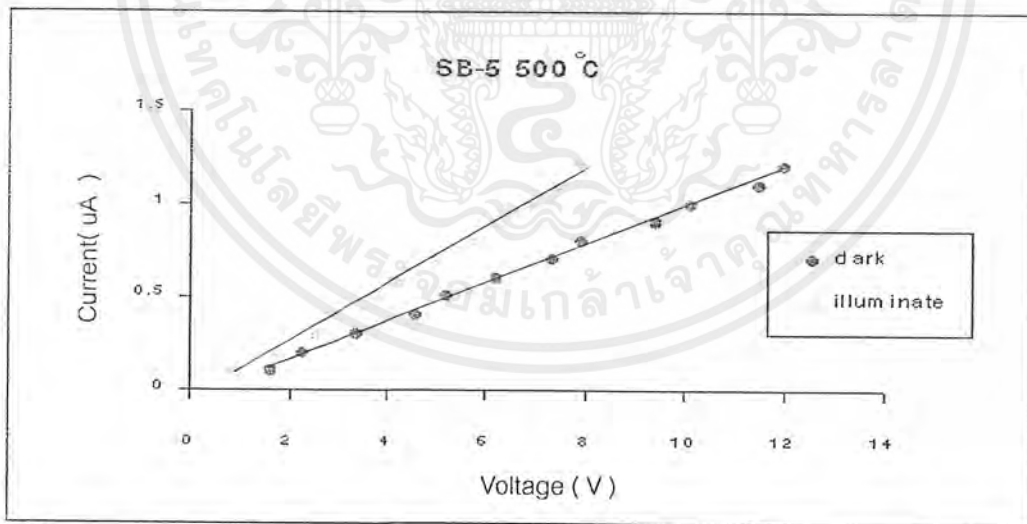


รูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาทีขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนด้วยความเข้ม  $3\text{mW/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของสารตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนด้วยความเข้ม  $3 \text{ mW/cm}^2$



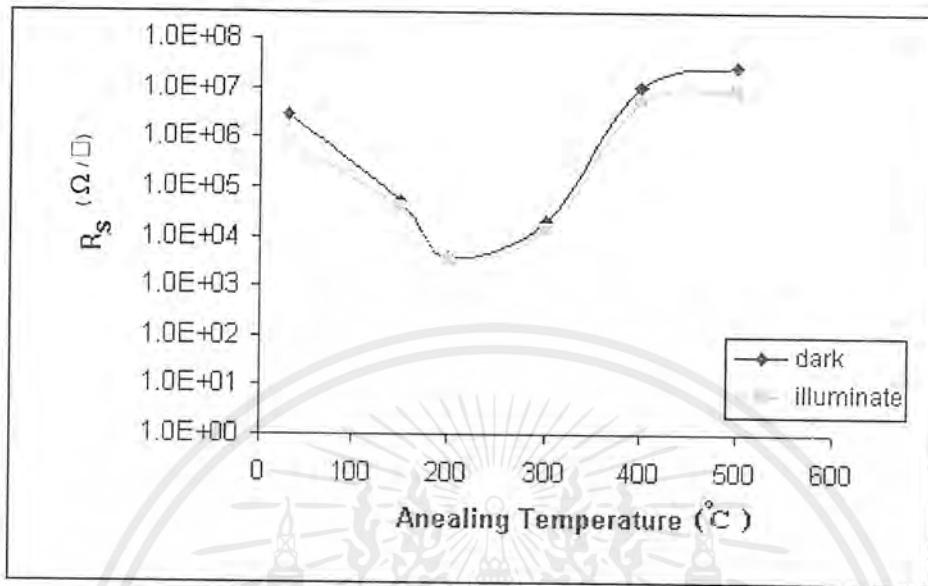
รูปที่ 6.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ (I-V Characteristics) ของสาร ตัวอย่าง SB-5 ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนด้วยความเข้ม  $3 \text{ mW/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ของสารตัวอย่าง  
ฟิล์ม กระจก SB-5 ที่อุณหภูมิแอนนีสลค่าต่างๆ เมื่อไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง

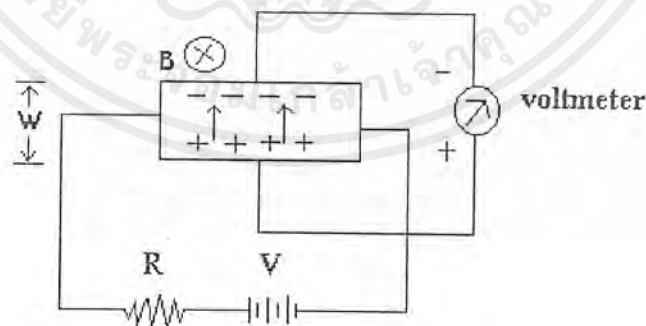
อุณหภูมิแอนนีสล ( ° C )	ค่าความต้านทานแผ่น ( $\Omega / \square$ )	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
ไม่ทำการแอนนีสล ( as – deposited )	$2.9 \times 10^6$	$7.9 \times 10^5$
150	$5.0 \times 10^4$	$4.0 \times 10^4$
200	$3.7 \times 10^3$	$3.4 \times 10^3$
300	$2.1 \times 10^4$	$1.4 \times 10^4$
400	$1.1 \times 10^7$	$5.4 \times 10^6$
500	$2.6 \times 10^7$	$9.1 \times 10^6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีย์ลค่าต่างๆ ของสารตัวอย่าง SB-5 เมื่อมีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสง

### 6.7 วิธีและผลการทดลองหาชนิดการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์



รูปที่ 6.29 แสดงแผนภาพการศึกษาชนิดการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างโดยวิธีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการทดลอง

1. ทำการต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 6.29
2. วางแผ่นฟิล์มบางในระหว่างขั้วแม่เหล็ก
3. เลือกค่ากระแสที่ไหลผ่านขั้วขึ้นสารให้คงที่ค่าหนึ่ง(ขนาดกระแสอาจใช้เพียง 2-3mA) จากนั้น ทำการวัดค่า  $V_H$  เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของ สนามแม่เหล็ก
4. เลือกค่าสนามแม่เหล็ก(ขนาดประมาณ 1-2 kGauss) จากนั้นทำการวัดค่า  $V_H$  เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแส
5. ตรวจสอบหาชนิดการนำไฟฟ้าของพาหะได้โดยสังเกตจากโวลต์มิเตอร์ของรูปที่ 6.29 จะเห็นว่าถ้าต่อ โวลต์มิเตอร์เพื่อวัดค่าที่เกิดขึ้น โดยที่เมื่อขั้วบวกอยู่ด้านล่างและขั้วลบอยู่ด้านบนจะพบว่าแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อขั้วลบอยู่ด้านล่างและขั้วบวกอยู่ด้านบนจะพบว่าแรงดันมีค่าลดลง ลักษณะนี้จะ สามารถพิจารณาได้ว่ากระแสที่ไหลเป็นกระแสอิเล็กตรอนดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็มีวิธีการทดสอบทำนองเดียวกัน จากการทดลองในครั้งนี้พบว่า Cds ที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้ [3] ซึ่งมีสาเหตุมาจากอะตอมซัลเฟอร์ขาดหายไปจากโครงผลึก ( S- vacancy) [2]

## บทที่ 7

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอาบสารละลายเคมี ซึ่งปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  และ  $\text{NH}_3$  (25%) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ  $2.5 \cdot 10^{-2}$  โมลาร์  $3.5 \cdot 10^{-2}$  โมลาร์ และ 1.68 โมลาร์ ตามลำดับ มาทำการผสมกันในบีกเกอร์ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีน้ำปอดคประจุอยู่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นใช้น้ำปอดคประจุปรับปริมาตรรวมให้ได้ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่า pH ที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่าง 11.2-11.4 และช่วงอุณหภูมิที่ใช้ระหว่าง 65-90 องศาเซลเซียส ทั้งนี้จะมีการหมุนกระจกสโกลด์หรือไม้ก๊อกก็ได้ และควรที่จะมีตัวคนสารเพื่อให้สารละลายผสมเข้ากันได้ดี ใช้เวลาในการอาบประมาณ 30 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางที่เตรียมเสร็จแล้วทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 150, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที (เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากกว่านี้อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับฟิล์มบางได้) ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีลักษณะสีเหลือง ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางเรียบสม่ำเสมอ ไม่หลุดลอกง่าย และเมื่อทำการแอนนีกที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สีของฟิล์มบางเข้มมากขึ้น

เมื่อเราได้ศึกษาโครงสร้างของผลึกที่เตรียมได้จากฟิล์มบางด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จะพบว่าเมื่อมีเพียง 1 พีก ซึ่งอาจจะเป็นพีกที่ได้จากระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก หรือ (002) ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ขนาดของเกรนที่พบโดยเฉลี่ยมีขนาด 100 นาโนเมตรเช่นกัน และเมื่อวิเคราะห์ธาตุต่างๆที่อยู่ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDXS จะพบธาตุดังนี้ Cd, S นอกจากนี้เรายังพบธาตุ Si, O, Mg, Na, Ca ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกระจกสโกลด์จากนั้นเราได้นำฟิล์มบางไปวัดค่าการส่งผ่านแสงซึ่งจะมีปรากฏการณ์การส่งผ่านในช่วงความยาวประมาณ 540 นาโนเมตร และนำไปวัดค่าความต้านทานแผ่น จะอยู่ในระดับประมาณ  $10^3 - 10^7 \Omega/\square$  ทั้งนี้ฟิล์มบางที่ได้จะมีผลต่อแสงที่ตกกระทบซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานแผ่นลดและจากการตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์ พบว่าฟิล์มบางที่ได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นเอ็น และเมื่อคำนวณช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) จะมีค่าไม่เกิน 2.27-2.41 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีความหนาของฟิล์มที่ทำการจุ่มใน 1 ครั้ง มีความหนาประมาณ 50 นาโนเมตร

สำหรับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีก กล่าวคือเมื่อแอนนีกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 300 และ 400 องศาเซลเซียส ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงแต่เมื่ออุณหภูมิของการแอนนีกเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มบางขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่มีการจ่ายกระแสขณะไบอัสตรงและไบอัสกลับทางมีค่าเท่ากันแสดงว่า รอยต่อไม่แสดงผลในการจัดขวางการไหลของกระแส แต่เมื่อมีการฉายแสงค่าความต้านทานค่าความต้านทานแผ่นจะลดลง และเมื่อมีการแอนนีสตาร์ตัวอย่างจะทำให้ความต้านทานแผ่นลดลงและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีสตาร์ 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อแอนนีสตาร์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกจะทำให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่เร็วมากนัก เมื่ออุณหภูมิแอนนีสตาร์สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นการแอนนีสตาร์ที่อุณหภูมิในช่วง 200-300 องศาเซลเซียส ความต้านทานแผ่นจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก เมื่อมีการฉายแสงแต่เมื่อแอนนีสตาร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ความต้านทานแผ่นจะเปลี่ยนแปลงไปมาก ภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสง

### ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี จะพบเงื่อนไขหลายประการที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง แต่ประการหนึ่งซึ่งผู้ทดลองอยากเสนอแนะให้ผู้ที่สนใจในเรื่องนี้นำไปปฏิบัติ ซึ่งอาจจะเป็นเทคนิคเล็กๆน้อยๆ และอาจเกิดจากข้อสังเกตของตัวผู้ทดลองเอง ดังนี้

- ในการเทสารตั้งต้นลงในบีกเกอร์ ทั้งที่เป็นผลึกกึ่งดีหรือสารละลายกึ่งดี จะพบว่า จะมีสารตั้งต้นคั่งที่ข้างภาชนะ คั่งนั้นทุกครั้งที่ทำกรเตรียมฟิล์มบาง ต้องใช้น้ำปอดคประจุคั่วให้สารตั้งต้นเหล่านั่นลงในบีกเกอร์ให้หมด
- กรณีที่ใช้ตัวคนสาร ระวังอย่าใช้ความเร็วสูงเกินไป เนื่องจากจะทำให้ฟิล์มบางของ CdS ไปเคลือบบนแท่งแก้วในปริมาณมาก และนอกจากนั้นยังทำให้สารละลายเกิดการหมุนวนส่งผลให้ผิวหน้าของสารละลายไม่สม่ำเสมอ
- ขณะที่สารตั้งต้นกำลังทำปฏิกิริยาจะเป็นเหลือง พยายามอย่าเติมน้ำปอดคประจุเพื่อปรับปริมาณ เพราะจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด
- กรณีที่ฟิล์มที่เตรียมได้มีความบางมากเกินไป เราสามารถทำการอาบด้วยสารละลายเคมีซ้ำอีกครั้งด้วยเงื่อนไขเดิม จะทำให้ได้ความหนาของฟิล์มบางมากขึ้น
- และเพื่อผลที่แน่ชัดในการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกจึงควรนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (TEM) ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ เนื่องจากฟิล์มบางมีความต้านทานสูงดังนั้นกระแสที่วัดได้จึงมีค่าต่ำมากดังนั้นในการวัดกระแสในระดับนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลอย่างมากในการรบกวนค่าที่วัดได้ดังนั้นจึงควรวัดในห้องที่มีการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือใช้กระแสเป็นพัลส์เพื่อลดความร้อนที่ขึ้นในชิ้นสารตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Santamaria , J. “ Characteristics of CdS/CuInSe<sub>2</sub> Heterojunction ” , Solar Cells , Vol.28, 1990 : 31-33.
2. Mathur,P.C., Shishodia, P.K. and Chauchan,G. “ Growth and Characterization of CdS Thin Films Suitables for Device Applications ” , Proceedings of the Sixth International Workshop , 2-6 December 1991,New Delphi, India : 407-413.
3. Gaewdang ,Ng.and Gaewdang, T. “ Preparation and Some Properties of Cadmium Sulfide Semiconductor” , Journal of Science Ladkrabang , Vol.9,No.2 ,1999:25-29.
4. Ma , Y.Y. , Farenbruch , A.L. and Bube , R.H. “ Cadmium Sulfide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis ” , Applied Phys. Lett.,Vol.33,1997 : 423-428.
5. Dona , J.M. and Herrero ,J. “ Chemical Bath Deposition of CdS Thin Films : An Approach to the Chemical Mechanism Through Study of the Films Microstructure ” , J.Electrochem.Soc. Vol.144 ,No.11,1997 : 4081-4090.
6. สิงห์เดช แดงจวง “ การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี “ วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539.
7. Niki , S. ,Makita, Y.,Yamada ,A.,Obara ,A. , Igarashi,O.,Misawa,S.,Kawai, M.,Nakanishi,H.,Taguchi, Y.and Kutsuwada,N. “ Photoluminescence Properties of CuInSe<sub>2</sub> Grown by Molecular Beam Epitaxy ” ,Solar Energy and Solar Cells , vol.35,1994 : 141-147.
8. ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInSe<sub>2</sub>)” , โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2539
9. วิรุฬห์ มังคละวิรัช และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ “ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน” วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่1 ฉบับที่2 พฤษภาคม 2534 หน้า 129-165.
10. Muller,R.S. and Kamins, T.I. “ Device Electronics for Integrated Circuits ” 2<sup>nd</sup> Edition , John Wiley & Sons,Inc., 1986: 42-45.
11. Chu, T.L.,Chu ,S. S.,Schultz,N.,Wang,C.and Wu,C.Q. “Solution-Grown Cadmium Sulfide Films for Photovoltaic Device ” ,J.Electrochem Soc,Vol.139.No.9.1992 : 2443-2446.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Dona , J.M. and Herrero, J. “ Dependence of Electro – Optical Properties on the Deposition Conditions of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films ”, J. Electrochem.Soc., Vol .144,No.11,1997: 4091-4098.
- 13 Nakanishi , T.and Ito,K. “ Properties of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films ” Solar Energy Materials and Solar Cells ,Vol.35, 1994 : 171-178.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## แสดงโปรแกรมและวงจรของอุปกรณ์สื่อสารหลายรอบได้

## Program

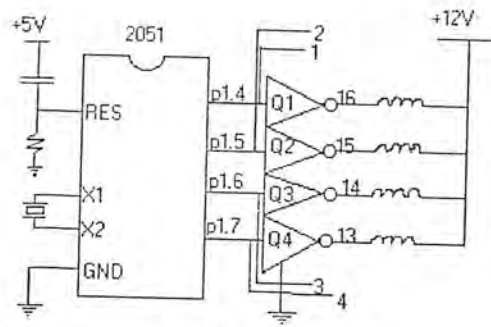
```

#include C:\mc51\8051io.h /* include i/o header file */
#include C:\mc51\8051reg.h
extern register char cputick;
/* put constant 8-byte for half step driving */
unsigned char step[8] = { 0xa0,0x80,0x90,0x10,0x50,0x40,0x60,0x20};
/* use upper half nibble to drive,ie.,P1.4,P1.5,P1.6,P1.7 */

main( )
{
    int i;
    char j;
    serinit(9600);
    cputick = 0;
    while(chkchr ( ) != '*')
    {
        j = 0;
        for (i = 0; i < 400; i++);
        {
            while ( cputick < 1 );
            cputick = 0;
            P1 = step [ j ];
            j++;
            if ( j >= 8)
                j = 0;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แสดงวงจรอุปกรณ์ถนสารละลายปรับรอบได้

ตารางที่ 1 แสดง Half - Step Sequencing

Step No.	Q1	Q2	Q3	Q4
0	1	0	1	0
1	1	0	0	0
2	1	0	0	1
3	0	0	0	1
4	0	1	0	1
5	0	1	0	0
6	0	1	1	0
7	0	0	1	0

ขอแนะนำสำหรับผู้ทำควรมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ สเต็ปมอเตอร์ Programming 89cxx51 และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ 89c2051 หาอ่านได้จากคู่มือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051 ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นาย จักรพันธ์ ทองเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2520 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จ การศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียน เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า และได้เข้ารับการศึกษาระดับ อุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2539

นาย อภิวัฒน์ กมลทวีกุล เกิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2520 เป็นคนจังหวัดอุบลราชธานี โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ณ โรงเรียน เบ็ญจมะมหาราชและได้เข้ารับ การศึกษาในระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะ วิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้