

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เจือด้วย In



ว/พ.  
๑๙๙๓  
๙๕๕๙

เลขที่.....  
เลขทะเบียน.....**62306**  
วัน,เดือน,ปี.....- 8 ส.ค. 2549

.b. 11๖20110  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Some Properties of In Doped $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ Thin Films**



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor  
of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science


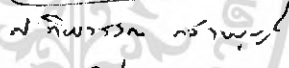

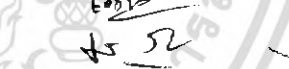

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เจือด้วย In  
**นักศึกษา** นายเอกลักษณ์ ธรรม์ชวงค์  
 นายชนววรรณ ศรีอรนันต์  
 นายเอกณพ ศรีสุขสมวรรณ  
**ภาควิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์  
**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม  
**ปีการศึกษา** 2548  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.งามนิศย์ วงษ์เจริญ  
**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อ.สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์	
กรรมการ	อ.ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี	
กรรมการ	รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.งามนิศย์ วงษ์เจริญ	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ	

.....  
 (รองศาสตราจารย์ วิชาญ เศษิตธีระ)  
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เจือด้วย In

นักศึกษา นายเอกลักษณ์ ธรรม์ชวงศ์  
นายธนวรรณ ศรีอรนันต์  
นายเอกณพ ศรีสุขสมวรรณ

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2548  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิศย์ วงษ์เจริญ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

#### บทคัดย่อ

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี จากนั้นจึงนำเอาฟิล์มบางที่ได้ไปทำการแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:In$  และ  $CdS:In$  ที่ยังไม่ได้อันนัล จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ โครงสร้างของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:In$  จะเปลี่ยนจากซิงค์เบลนด์เป็นเวิร์ทไซท์เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ส่วนโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $CdS:In$  จะยังคงเป็นซิงค์เบลนด์ ในช่วงอุณหภูมิแอนนัล 100-500 องศาเซลเซียส จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  พบว่าขนาดของเกรนจะลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ In เพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  สามารถหาได้จากการวัดการส่งผ่านแสง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:In$  และ  $CdS:In$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือ In เพิ่มขึ้น สำหรับความต้านทานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:In$  เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส จะมีค่าต่ำสุดประมาณ  $5.13 \times 10^8 \Omega/\text{square}$  พลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่วัดได้จากอุณหภูมิในช่วง 20-150 องศาเซลเซียส พลังงานกระตุ้นเหล่านี้เกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น ความสูงของกำแพงศักย์ของเกรนผลึกสถานะพลังงานของกัมดักที่ปรากฏในบริเวณขอบของเกรนหรือข้อบกพร่องอันเกิดจากปริมาณของอะตอมในผลึกแตกต่างกันไปจากสโตยลยอซิโอเมตรี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Special Project Title**                      Some Properties of In Doped Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S Thin Films

**Name**    Ekaluk Tonchowong  
    Tanawat Srioranon  
    Ekanop Srisuksomwan

**Department**                                      Applied Physics    Faculty of Science

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

**Academic Year**                                      2005

**Special Project Advisor**                      Assoc.Prof.Ngamnit Wongchalem

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

### ABSTRACT

Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S thin films doped with indium have been prepared on glass substrates by chemical bath deposition (CBD). As-deposited films are thermally annealed in a controlled N<sub>2</sub> atmosphere with annealing temperature in the range 100-500 °C for 30 min. X-ray diffraction studies suggest that the all as-deposited of the both Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S:In and CdS:In thin films are belong to zincblende structure. The crystal structure of the annealed Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S:In films was changed from zincblende to wurtzite structure when annealing temperature beyond 400 °C. However, any change of a crystal structure of CdS:In films was not observed in this annealing temperature range. From the SEM micrographs, the grain size of Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S:In and CdS:In thin films decreases when the indium content increases. Energy gap value of the both Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S:In and CdS:In thin films were evaluated from the optical transmission measurements. Energy gap value of the both Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S:In and CdS:In increases when the indium content increases. The appearance of the minimum sheet resistance around 5.13 x 10<sup>8</sup> Ω/square was observed in the Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>S:In films annealed at 200 °C. The activation energy, evaluated from the electrical resistance as a function of temperature ranging from 25 to 150 °C, are attributed to barrier height of grain boundary, trap states at intergrain boundary and/or stoichiometric defects in the films.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ยามนิศย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดงและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูร์กษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ตลอดมา รวมไปถึงการปลุกฝังสิ่งที่ฝังใจให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance โดยรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่น  $1.5406 \text{ \AA}$  ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจําใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงษ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง ยูวี-วิสทิเบต ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลตและย่านตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย ขาวประเสริฐ คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะและคุณชำนาญ จันทร์ขุ่ม เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ คุณประชน ประจวบโชค คุณฐิติกร จรรยาธรรม นักศึกษาปริญญาโท คุณสุกฤษฎี เกิดแสง นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและคุณณัฐพร พรหมรส ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างและซ่อมอุปกรณ์การอบสารละลายเคมี แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา



เอกลักษณ์ ธรรม์ชวงศ์  
ธนวรรณ ศรีอรันต์  
เอกณพ ศรีสุขสมวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างของผลึกในอุดมคติ	4
2.1.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก	6
2.1.1.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ	8
2.1.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	9
2.1.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	10
2.1.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	10
2.1.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	12
2.1.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	12
2.1.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น	13
2.1.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	14
2.1.2 ศึกษาโครงสร้างผลึก	15
2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	18

2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน	18
--------------------------------	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.1.1 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะสารกึ่งตัวนำ	18
2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	20
2.3 การส่งผ่านแสง	21
2.3.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง	24
2.4 สมบัติทางไฟฟ้า	25
2.4.1 สภาพนำไฟฟ้า	26
2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	27
2.4.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง	27
2.4.2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	28
2.4.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	29
2.5 หลักการทำงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
2.5.1 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง	32
2.5.1.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น	32
2.5.1.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น	32
2.5.2 กำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ	35
2.5.3 หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน	36
2.6 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอาบสารละลายเคมี	36
2.6.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	36
2.6.1.1 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ CdS	37
2.6.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ ZnS	38
2.6.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	41
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	41
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ และ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In	42
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับ	42
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	46
4.1 ลักษณะของฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS:In ที่เตรียมได้	46
4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdS:(5%In)	49
4.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdS:In	51
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS:In เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	53
4.5 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:In$ และ CdS:In	82
4.5.1 ค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิห้อง	82
4.5.2 ความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	88
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	104
5.1 สรุปผลการทดลอง	104
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวก ก. ข้อมูลมาตรฐานเกี่ยวกับ CdZnS	108
ประวัติผู้เขียน	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	5
2.2	5
2.3	8
4.1	51
4.2	76
4.3	76
4.4	77
4.5	77
4.6	78
4.7	78
4.8	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9	79
แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS:(15%In) ทั้งที่ไม่มี การแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจน บริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	
4.10	84
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉาย แสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	
4.11	84
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(10\%In)$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(15\%In)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและ แอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	
4.12	86
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS และ CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการ อบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้ บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉาย แสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	
4.13	87
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS:(10%In) และ CdS:(15%In) ที่เตรียม โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมี การฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	
4.14	102
แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$ ปริมาณ ต่าง ๆ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่ อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	
4.15	102
แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdS และ CdS:(5%In) ปริมาณต่าง ๆ ที่เตรียม โดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ	4
2.2	การบอกระนาบต่าง ๆ ของผลึก	7
2.3	แสดงพื้นระนาบระนาบของสารประกอบตระกูล II – VI	9
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	9
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS	10
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซท์ของ CdS	11
2.7	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซท์และซิงค์เบลนด์	11
2.8	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	12
2.9	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	13
2.10	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	14
2.11	แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน	14
2.12	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.13	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	16
2.14	แสดงวิธีการหา $\beta_{00}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	17
2.15	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ (ค) ฉนวน	19
2.16	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง	20
2.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีการเกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง	22
2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	24
2.20 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารตัวอย่าง	26
2.21 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	28
2.22 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
2.23 อัตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง	32
2.24 แผนภาพแสดงผลกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบางที่เตรียม โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี	37
2.25 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการไฮโมจีเนียส	38
2.26 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส	38
2.27 แสดงการเกิดฟิล์ม ZnS บนฐานรองรับโดยกระบวนการไฮโมจีเนียส	39
4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	46
4.2 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	47
4.3 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(10\%In)$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	47
4.4 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(15\%In)$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	47
4.5 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	48
4.7 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS:(10%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	48
4.8 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS:(15%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	49
4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อยังไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	50
4.10 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่มีการแอนนัล	52
4.11 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่มีการแอนนัล	52
4.12 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่มีการแอนนัล	52
4.13 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C	53
4.14 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C	54
4.15 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(10%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C	54
4.16 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(15%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C	55
4.17 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C	56
4.19 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS:(10%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C	56
4.20 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS:(15% In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C	57
4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	58
4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	58
4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	59
4.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	59
4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	60
4.26 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	60
4.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	61
4.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	62
4.30 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	62
4.31 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	63
4.32 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	63
4.33 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อยังไม่ทำการแอนนัลเพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	64
4.34 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อยังไม่ทำการแอนนัลเพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	64
4.35 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	65
4.36 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	66
4.38 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	66
4.39 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	67
4.40 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	67
4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	68
4.42 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	68
4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อหาค่า E <sub>g1</sub>	69
4.44 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อหาค่า E <sub>g2</sub>	69
4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล	70

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 °C	70
4.47 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C	71
4.48 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C	71
4.49 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C	72
4.50 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C	72
4.51 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล	73
4.52 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 °C	73
4.53 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C	74
4.54 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C	74
4.55 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C	75
4.56 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C	75
4.57 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน $E_{g1}$ และ $E_{g2}$ ของฟิล์มบาง Cd <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> S เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	80

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน $E_{g1}$ และ $E_{g2}$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$ เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	80
4.59 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง Cds เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	81
4.60 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง Cds:(5% In) เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	81
4.61 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์วัดความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ	82
4.62 วงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานสูงของสารตัวอย่าง	83
4.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในวงจรกับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมฟิล์ม	83
4.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	85
4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\% In)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	85
4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง Cds ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	87
4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง Cds:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.68	แสดงวงจรถ่ายที่ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานของฟิล์มบางที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	89
4.69	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีก	90
4.70	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	90
4.71	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียม โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $200\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	91
4.72	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	91
4.73	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียม โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	92
4.74	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียม โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	92
4.75	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\% \text{ In})$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนีก	93
4.76	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\% \text{ In})$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	93
4.77	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\% \text{ In})$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $200\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	94
4.79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\% In)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	95
4.80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\% In)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	95
4.81 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล	96
4.82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	96
4.83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $200\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	97
4.84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	97
4.85 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	98
4.86 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	98

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.87 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส	99
4.88 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	99
4.89 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	100
4.90 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	100
4.91 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	101
4.92 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS:(5% In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	101
4.93 ภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเป็นกึ่งตัวนำออสกิลกรอน โดยที่ $\phi$ คือความสูงของกำแพงศักย์และ $x$ คือระยะทาง	103
4.94 แสดงระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ ( $E_d$ )	103

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในชีวิตประจำวันนั้นต้องอาศัยสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ มักเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งอำนวยความสะดวกเหล่านี้ส่วนแล้วแต่อาศัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นหัวใจสำคัญในการทำงานเพราะสารกึ่งตัวนำมีสมบัติเฉพาะตัว คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ แสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงมาตกกระทบซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนและ โลหะ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้สามารถสร้างสิ่งประดิษฐ์ได้มากมาย เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ วงจรรวม เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากแหล่งพลังงานในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมัน ถ่านหิน นิวเคลียร์ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่สร้างมลภาวะ ในขณะใช้งานและไม่ทำลายสภาพแวดล้อม เพียงแต่ติดตั้งไว้ในที่ ๆ มีแสงอาทิตย์ก็สามารถใช้งานได้ มีอายุการใช้งานเกินกว่า 20 ปี เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทรอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรต์ (chalcopyrite structure) ที่มี  $Cu(In,Ga)Se_2$  เป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber) กำลังได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยมีส่วนประกอบเป็นชั้น ๆ ตัวอย่างเช่น  $MgF_2 / ZnO / CdS / Cu(In,Ga)Se_2 / Mo / \text{sodalime glass}$  มีประสิทธิภาพสูงถึง 18.8% และเนื่องจากในชั้นหน้าต่าง (windows)  $CdS$  ซึ่งมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานตรงกับความยาวคลื่น 516 นาโนเมตรนั้น ยังมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำ ดังนั้นถ้าสามารถหาสารกึ่งตัวนำตัวอื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดีกว่ามาทดแทน ก็จะทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นได้

ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้ดีและสามารถดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังมีปริมาณแคดเมียมน้อยลงด้วย จึงเป็นสารกึ่งตัวนำที่น่าจะนำมาทดแทน  $CdS$  ที่เป็นชั้นหน้าต่าง (windows) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่สัดส่วน  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.82 อิเล็กตรอน โวลต์ [Kumar, 1998] มีการดูดกลืนแสงดีมากเพราะมีขนาดของเกรนใหญ่ ผิวหน้ามีลักษณะคล้ายปริามิคฐานสี่เหลี่ยม ความสูงจากฐานถึงยอดมีค่าสูงสุด

โดยมีรายงานว่า CdS เมื่อเจือด้วยอินเดียมความเข้มข้นของฟิล์มจะลดลง จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำการเจืออินเดียมใน  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  มีกระบวนการเตรียมได้หลากหลายวิธี ได้แก่ วิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) และวิธีอบสารละลายเคมี (Chemical bath deposition : CBD) เป็นต้น โดยวิธีอบสารละลายเคมีนั้นเป็นกระบวนการเตรียมที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนในการผลิตต่ำ ฟิล์มบางมีเตรียมได้คุณภาพดี สามารถเตรียมฟิล์มได้ครั้งละมาก ๆ เหมาะสำหรับการเป็นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมและปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมบนแผ่นฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยใช้วิธีการเตรียมฟิล์มด้วยการอบสารละลายเคมีและนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ CdS ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction : XRD)
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ CdS ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
4. ศึกษาสมบัติของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ CdS เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
5. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ CdS โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีการเตรียมที่ให้ประสิทธิภาพสูงและต้นทุนไม่สูงจนเกินไป จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ทางด้านฟิสิกส์ ได้แก่ การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน สมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติทางด้านแสง ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี พร้อมทั้งจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย
2. ทำการเตรียมฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมลงบนแผ่นฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยใช้เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100-500^{\circ}C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซ ใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
4. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
5. ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$
6. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมบนแผ่นฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี ที่มีคุณภาพดี มีข้อบกพร่องน้อย ความต้านทานต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง
2. ทราบถึงอิทธิพลของ Zn และอุณหภูมิแอนนัลที่มีผลต่อสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$
3. ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ที่มีคุณภาพดี เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์
4. ได้เรียนรู้วิธีการตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  เช่น สมบัติทางด้านไฟฟ้า สมบัติทางแสง โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก

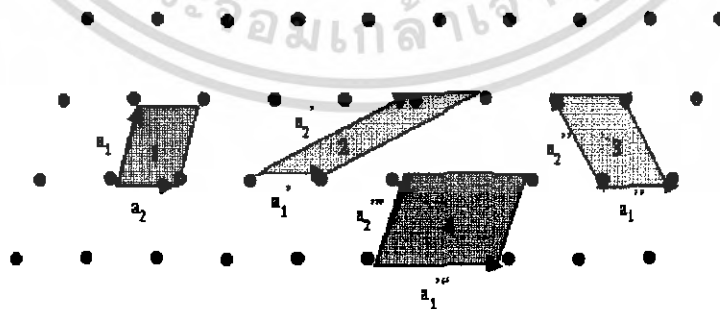
ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline material) และวัสดุที่เป็นอสัณฐาน (amorphous material) ในที่นี้จะสนใจแต่วัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

#### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากอะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันเป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระนาบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลาย ๆ อะตอมหรือหลาย ๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมาและเรียกตำแหน่งต่าง ๆ ของอะตอมในระบบ 3 มิติว่า โครงผลึก (lattice)

ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะไม่จำกัด แต่โดยปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ แสดงดังรูปที่

2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเลือกหน่วยเซลล์ใน โครงผลึก 2 มิติ



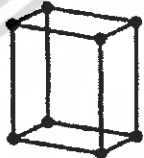

ในระบบ 2 มิติ ค่าคงที่ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\bar{a}$  และ  $\bar{b}$  และมุม  $\gamma$  ที่เป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียง 5 แบบ ดังตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของโครงผลึกของหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ




โครงผลึกในระบบ 2 มิติ	ค่าคงที่ของโครงผลึก	มุม
สี่เหลี่ยมจตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าอิตเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน $60^\circ$ ( $60^\circ$ rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้ง 7 แบบ ในระนาบ 3 มิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุม	รูปทรงขนาดผลึกของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (tetragonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
โรมโบอิคโรด (rhombohedral)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้ง 7 แบบ ในระนาบ 3 มิติ (ต่อ)

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุม	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
เฮกซะโกนอล (hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมโนคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

ในระนาบ 3 มิติ ค่าคงที่ของโครงผลึกได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ , และ  $\vec{c}$ , และมุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่าง ๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงผลึกขึ้นมา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 14 แบบใน 3 มิติซึ่งจัดได้เป็น 7 กลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนอล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รมบโอบีครอล (rhombohedral) และเฮกซะโกนอล (hexagonal)

#### 2.1.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุอย่างแน่นอนว่ากำลังศึกษา ลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่จะกล่าวถึงคือ ตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

### หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึกมีดังนี้

1. การระบุตำแหน่ง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $x, y, z$  มีเครื่องหมาย “;” คั่นแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น 1,2,3 หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x \equiv 1, y \equiv 2$  และ  $z \equiv 3$

2. การระบุทิศทาง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[hkl]$  ใช้วงเล็บก้ามปูและไม่มีเครื่องหมาย “;” คั่นระหว่างแต่ละค่า

ตัวอย่าง การระบุทิศทางที่ศึกษาจะใช้แนวที่ผ่านจุดเริ่มต้นของแกนผลึก คือ จุด 0,0,0 ซึ่งสามารถใช้ค่าเดียวกันนี้ระบุทุก ๆ แนวทิศทางที่ขนานกันและจะใช้จุดที่เป็นค่าจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดที่แนวนั้นตัดผ่านเป็นตัวระบุ เช่น ทิศทาง  $[111]$  มีจุดจำนวนนับไม่ถ้วนมีทิศทางนี้ตัดผ่าน เช่น จุด 0,0,0 จุด 1,1,1 นอกจากนี้ยังผ่านจุด 2,2,2 และ  $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$  และจุดอื่นๆอีกนับไม่ถ้วน

ถ้าเป็นทิศทางลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือบาร์ไว้บนตัวเลขนั้น ๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}21]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

3. การระบุระนาบ จะใช้อักษร  $(hkl)$  ใช้วงเล็บและไม่มีเครื่องหมาย “;” คั่นค่า  $hkl$  เรียกว่า

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

ระนาบ	ดัชนีมิลเลอร์ $hkl$	ระยะตัดแกนผลึก $x,y,z$	ส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ $1/h \ 1/k \ 1/l$
(010)	0,1,0	$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{0} \ \frac{1}{1} \ \frac{1}{0}$
( $\bar{1}11$ )	-1,1,1	-1,1,1	$\frac{1}{-1} \ \frac{1}{1} \ \frac{1}{1}$
( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )	-1,-1,-1	-1,-1,-1	$\frac{1}{-1} \ \frac{1}{-1} \ \frac{1}{-1}$
(224)	2,2,4	0.5,0.5,0.25	$\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{4}$
(220)	2,2,0	0.5,0.5, $\infty$	$\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{0}$

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

- สำหรับระบบเอียงะ โคนอลจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hki) โดยมีกฎเกณฑ์ว่า ดัชนีตัวที่ 3 (หรือ i) เพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนี 2 ตัวแรก (h และ k) ดังนี้

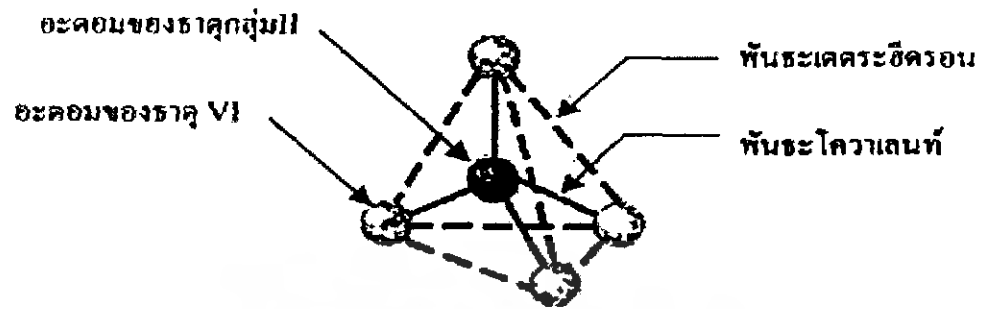
$$i = -(h+k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า (11 $\bar{2}$ ) ในระบบเอียงะ โคนอล

- สำหรับระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีเหมือน ๆ กัน นั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

### 2.1.1.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ

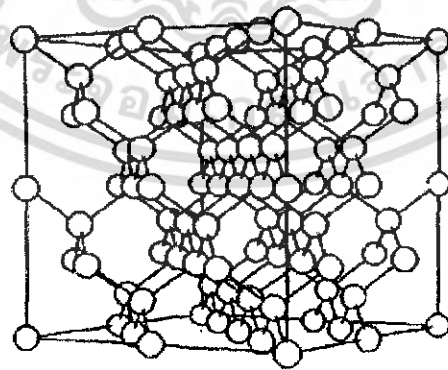
โครงสร้างแถบพลังงานของสาร ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพของสารนั้น ๆ เรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกคล้ายโครงสร้างผลึกของเพชร มีพันธะเคมีของโมเลกุลแบบพันธะโคเวเลนต์ คังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงพันธะเตตระฮีดรอนของสารประกอบตระกูล II-VI

#### 2.1.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุในกลุ่ม IV คือ *C*, *Si*, *Ge* และ  $\alpha$ -*Sn* อาจพิจารณาได้ว่า โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-centers cubic lattice : fcc ;  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ) สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทางของเส้นทแยงมุมโดยหนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและแต่ละอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันและอยู่ที่ตำแหน่ง  $000$ ,  $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ ,  $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$ ,  $\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$ , และ  $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$  แต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงสร้างแบบผลึกนี้เป็นรูปคิวบิกที่บิดเบี้ยวไปได้อย่างมาก โครงสร้างผลึกแบบนี้จึงสมมาตรมากที่สุดในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

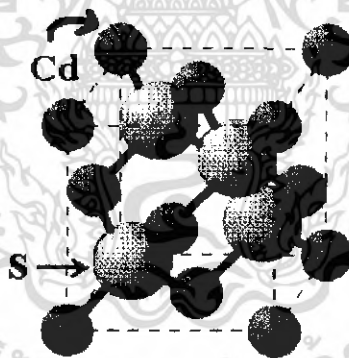


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zincblende Structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในการกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ 2 ชนิดหรือเรียกว่าสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น *GaAs*, *InSb* สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น *ZnSe*, *ZnS* เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก 2 โครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงสร้างผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม เช่น ใน *ZnS* อะตอมของ *Zn* จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $000$ ,  $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$  และ  $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$  ส่วนตำแหน่งอะตอมของ *S* จะอยู่ที่  $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$ ,  $\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$  และ  $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$  จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า โครงสร้างผลึกแบบเพชรดังแสดงในรูปที่ 2.5 สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ *ZnS*, *CuCl*, *AgI*, *CuF*, *SiC* และ *CdS* เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง



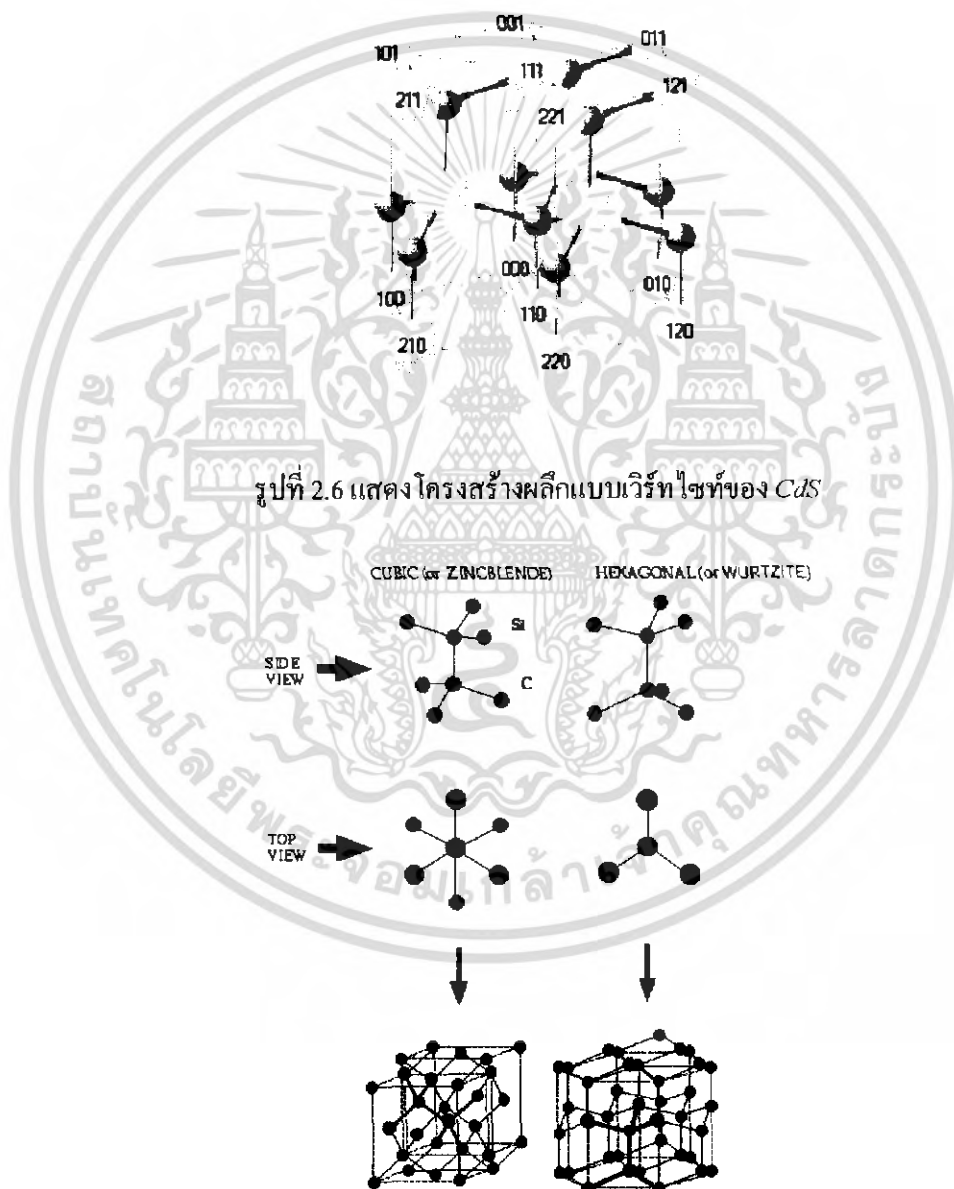
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ *CdS*

### 2.1.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ (Wurtzite Structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีอะตอมของธาตุต่าง ๆ อยู่ 2 ชนิด วางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $\frac{5}{8}$  ตามแนวแกน *c* หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นพันธะเตตระฮีดรอนและมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระยะนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระยะนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB ... หรือ 0101 ... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระยะนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC ... หรือ 012012 ... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ *CdS*, *ZnS* เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์

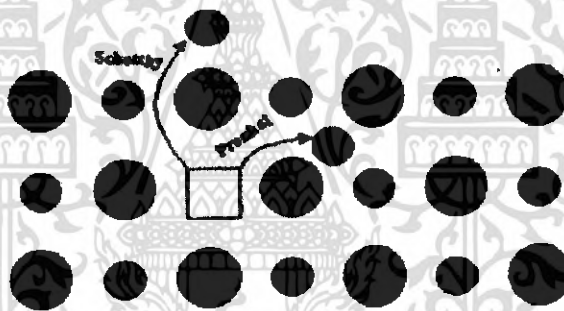
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วย โดยความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องโครงผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

#### 2.1.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.8 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมใน โครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องแบบจุดของ โครงผลึก

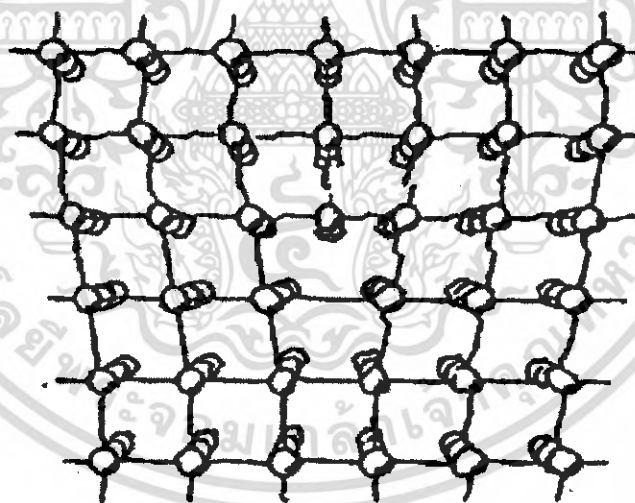
- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบเวคานซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออน หลุดหายไป โดยถ้าหากเป็นกรณีที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของ โครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่บนผิวหน้าของสาร จะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึก แบบชอตต์กี (schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบาง อะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ในตำแหน่งของ โครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่าง ตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีอยู่ ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

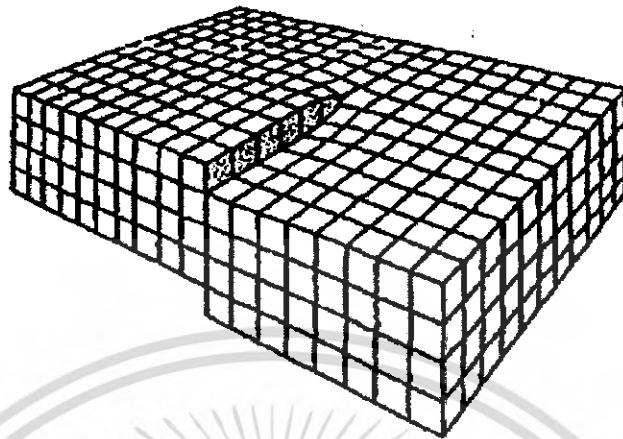
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรนเคิล (frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของ โครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ โครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

### 2.1.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน (dislocations) เกิดจากความผิดปกติของจุดแลตทิซตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดอาการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.9 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ

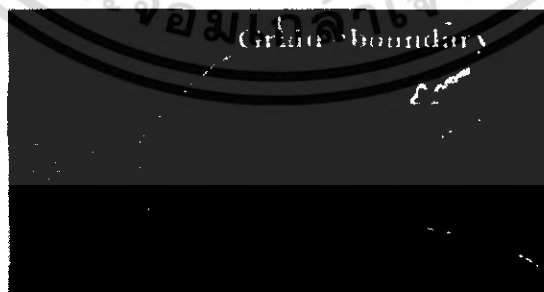


รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องคิสโตเคชั่นแบบสกรู

#### 2.1.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planes) เกรนและขอบเขตของเกรน (grain and grain boundaries)

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนดังรูปที่ 2.11 ในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางตรงข้ามกันและมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางที่ต่างกันเรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) เกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.11 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยวิธี  $\theta - 2\theta$  ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยการใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวกระทบกับสารตัวอย่าง อาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ โดยสารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้นหรือระนาบของอะตอมโดยสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

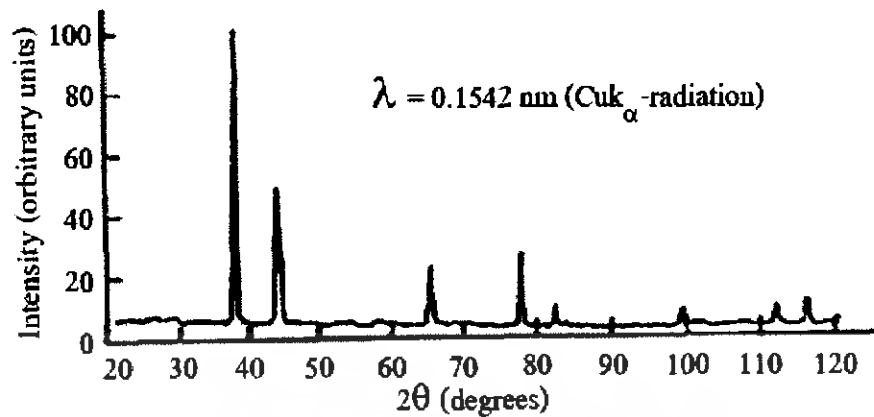
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ	$d_{hkl}$	คือ	ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
	$\theta$	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ที่ทำกับระนาบของผลึก
	$n$	คือ	ลำดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) โดยมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ  $2\theta$  ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

จากรูปที่ 2.13 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) โดยธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน โดยสังเกตได้จากพิกัดในรูปแบบการเลี้ยวเบน สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรน และความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ของโครงผลึกสำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ หาได้จากสมการ (2.3)

$$\frac{1}{d^2} \equiv \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ (2.4)

$$\frac{1}{d^2} \equiv \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก  
 $h, k, l$  คือ ระนาบของผลึก

ขนาดของเกรน (grain size)

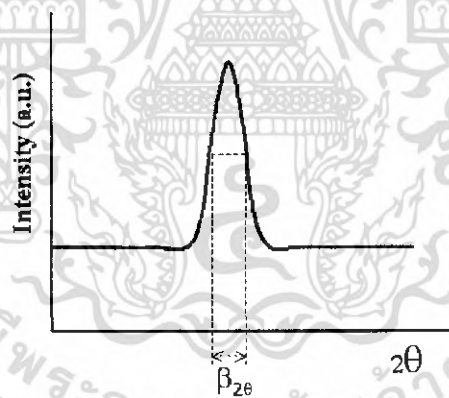
$$D \equiv \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.5)$$

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

ความเครียดในระดับอนุภาค (microstrain)

$$\epsilon = \frac{\beta_{2\theta} \cos\theta}{4} \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $\epsilon$  คือ ความเครียดระดับจุลภาค



รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เราอาจตรวจสอบข้อมูลได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่เป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ โดยได้จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการอ้างอิง

## 2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจะกล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ สเปกตรัมการส่งผ่านของแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

### 2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน

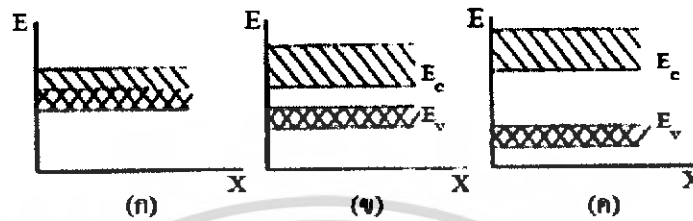
อิเล็กตรอนในโลหะที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอนและถือว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระไม่ถูกยึดอยู่ที่อะตอมหนึ่งอะตอมใด โดยเฉพาะ ไม่เหมือนกับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ไม่เป็นอิสระ อิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดกระแสอาจถูกเรียกว่า อิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electron) และในผลึกของแข็งอาจพิจารณาได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ท่ามกลางป็อสิทีฟที่เป็นคาบ (periodic potential) อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างของไอออนคอร์ (ion core) ที่มีระยะเท่ากันตลอดโดยจะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ของโครงผลึก โดยจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีได้ในแถบหนึ่งแถบใดเท่านั้น คือ แถบยินยอม (allowed band) และแถบพลังงานที่จะมีได้นี้จะถูกแบ่งกันไว้ด้วยแถบพลังงานต้องห้าม หมายถึงพลังงานในย่านนี้ อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะมีได้ แถบดังกล่าวถูกเรียกว่า “แถบต้องห้ามหรือช่องว่างแถบพลังงาน” (forbidden band or energy gap) ภายในแถบยินยอมหนึ่ง ๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนี้จะแสดงตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระทุกประการ

#### 2.2.1.1 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของของแข็งสามารถบ่งบอกสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุของแข็งนั้น ๆ ได้เป็นอย่างดี สภาพนำไฟฟ้าของสารใด ๆ จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือปริมาณของความหนาแน่นของประจุพาหะที่มีอยู่

ในกรณีที่มีการนำไฟฟ้าได้แล้ว จำเป็นที่จะต้องมีสถานะซึ่งว่างอยู่ในแถบพลังงานและเมื่อมีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ระดับต่าง ๆ ซึ่งอยู่ใต้ระดับพลังงานที่ว่างอยู่ ก็จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในสถานะที่ว่างอยู่นั้น จากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ก็จะเคลื่อนที่ตามกันไป

อย่างนี้ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนขึ้น ตัวนำที่ดีจะต้องมีพาหะซึ่งอยู่ในระดับต่าง ๆ ภายในแถบพลังงานที่ประกอบด้วยแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบนำและวาเลนซ์ซ้อนเหลื่อมกัน คือ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะนั่นเอง ดังรูปที่ 2.15 (ก)



รูปที่ 2.15 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของ

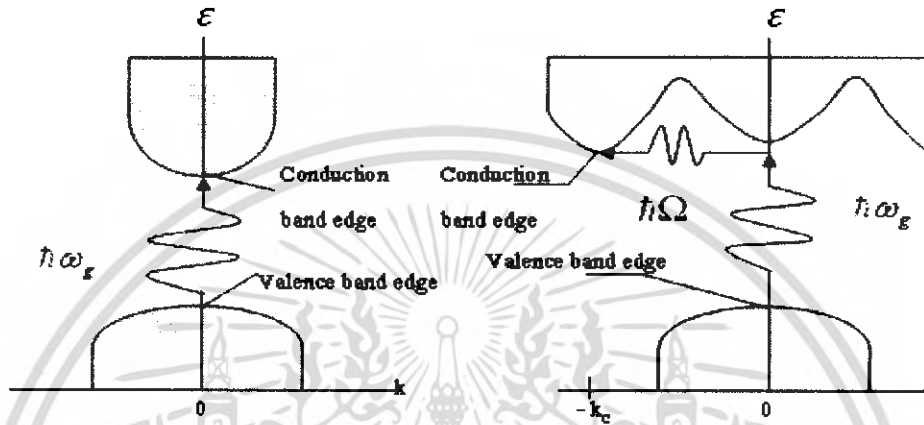
- ก) โลหะ
- ข) สารกึ่งตัวนำ
- ค) ฉนวน

กรณีของฉนวน แถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) เป็นแถบที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและจะแยกจากแถบนำ (conduction band) ซึ่งเป็นแถบที่ว่าง โดยมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างหลายอิเล็กตรอนโวลต์กันอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) และที่อุณหภูมิปกติอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะมีโอกาสน้อยมากที่จะมีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำได้ ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำจึงมีน้อยและจำกัด แต่ถ้าหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูง ๆ จะทำให้ความนำเพิ่มขึ้นได้

ส่วนสารกึ่งตัวนำความนำไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ระหว่างโลหะกับฉนวนและมีโครงสร้างของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.15 (ค) หากแต่ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าน้อยกว่าฉนวนมาก โดยทั่วไปมักมีค่าไม่กี่อิเล็กตรอนโวลต์และเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่าฉนวนนี้เอง จึงทำให้แม้แต่อุณหภูมิปกติ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ก็สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างการนำไฟฟ้าในโลหะกับสารกึ่งตัวนำ คือ เมื่ออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานเพิ่มจากเดิมมากพอที่จะเข้าไปอยู่ในแถบนำได้แล้ว ก็จะทิ้งให้เกิดช่องว่างในแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดการไหลของกระแสอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของประจุในแถบวาเลนซ์อีกด้วย อาจกล่าวได้ว่ากระแสนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของโฮล และยังสามารถสรุปได้ว่าในโลหะพาหะที่ช่วยนำกระแสไฟฟ้าได้ก็คืออิเล็กตรอนอิสระ แต่สำหรับในกรณีสารกึ่งตัวนำ นอกจากอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำแล้ว ยังมีโฮลในแถบวาเลนซ์ช่วยในการนำไฟฟ้าอีกด้วย

### 2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

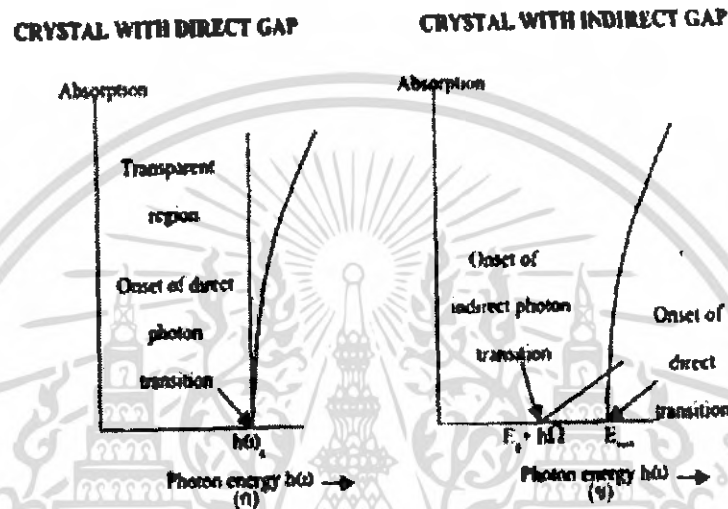
โดยทั่วไปลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบ คือ แบบตรง (direct bandgap) และแบบเฉียง (indirect bandgap) ดังแสดงในรูป 2.16 (ก) และ (ข)



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานของ อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์โดยรูป (ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น (wave vector ;  $k$ ) ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $h\nu \equiv E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นซึ่งจะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอน (absorption coefficient) กับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.17 (ก) ส่วนลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ในตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้เกิดการสร้างหรือทำลายโฟตอนเกิดขึ้น  $h\nu \equiv E_g \pm \hbar\Omega$  เมื่อ  $\Omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่

อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นทำให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุมและมีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมาจึงเกิดการสร้างโฟนอนและสร้างอิเล็กตรอนอิสระแสดงดังรูปที่ 2.16 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอน จะได้กราฟดังรูป 2.17 (ข)

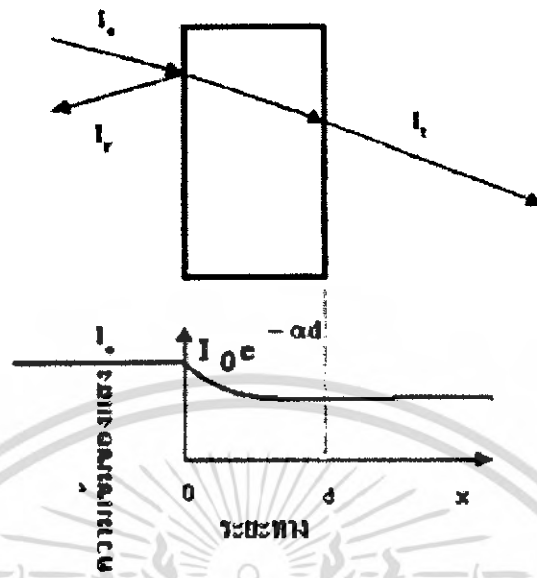


รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์โดยรูป ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง ข) แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

### 2.3 การส่งผ่านของแสง

ในการศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มของแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	$I_r$	คือ	ความเข้มแสงสะท้อน
	$I_t$	คือ	ความเข้มแสงที่ส่งผ่าน
	$I_i$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ฟิล์มบาง
	$R$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง (reflectivity)
	$T$	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (transmittance)
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
	$d$	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R \equiv \frac{I_r}{I_0} \quad (2.5)$$

หรือ

$$I_r \equiv RI_0 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น ความเข้มของแสงที่เดินทางเข้าสู่ฟิล์มบางมีค่า

$$I_i \equiv I_0 - I_r \equiv I_0 - RI_r \equiv (1 - R)I_0 \quad (2.7)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

$$I_t \equiv I_i * e^{-\alpha d} \equiv (1 - R)I_0 * e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

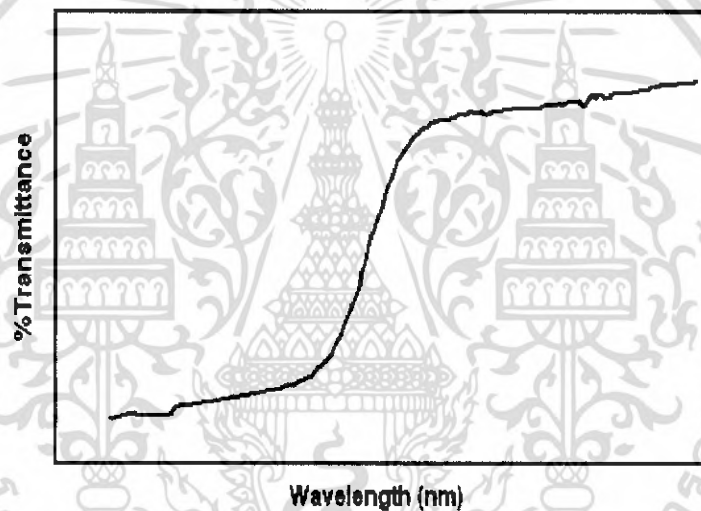
ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T \equiv \frac{I_t}{I_0} \equiv (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสง ที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานแล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกระทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.17 พลังงานโฟตอนของการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีนี้เป็น การกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ จะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง ( $T$ ) จากรูปที่ 2.18 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $R$ ) มีค่าน้อยมาก จะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln T \quad (2.13)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ที่มีลักษณะเป็นพลาโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณ ได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงาน โฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.14)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่และสมการที่ (2.14) ใช้กับสารที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง

$$(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.15)$$

เมื่อ B คือค่าคงที่และสมการที่ (2.15) ใช้กับสารที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง

#### 2.4 สมบัติทางไฟฟ้า

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆ ของสารกึ่งตัวนำ จึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.4.1 สภาพนำไฟฟ้า

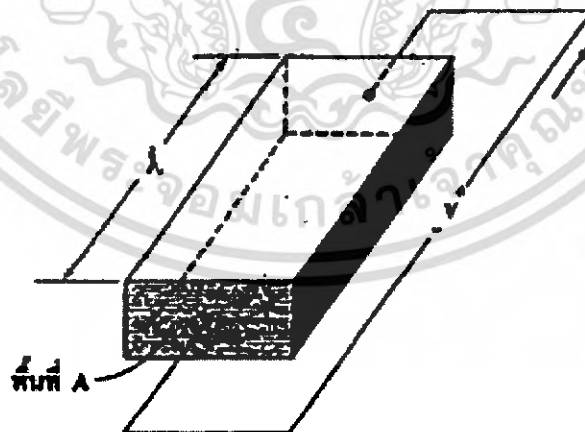
เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :  $J$ ) ต่อสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ดังสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ  
 $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity :  $\rho$ ) สามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.20 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.20 โดยให้แรงดันและเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{V} \quad (2.18)$$

และ

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.19)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.16) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l} \quad (2.20)$$

หรือ

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

สมการที่ (2.21) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้าและขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

#### 2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางมีหลายวิธีด้วยกัน ในการทดลองนี้จะใช้วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe)

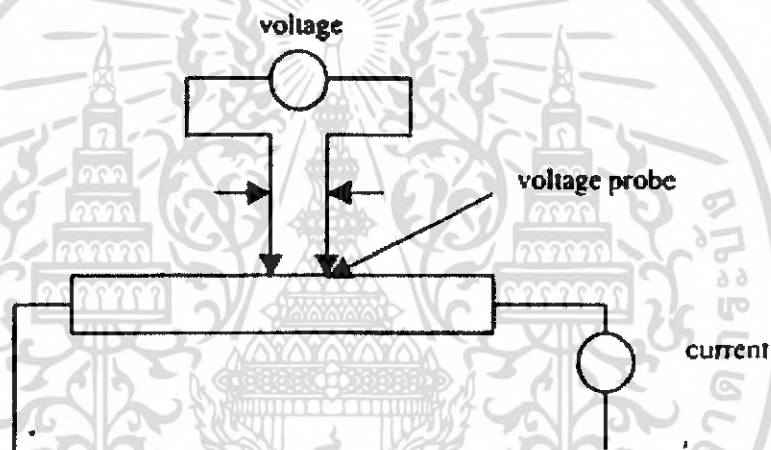
##### 2.4.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง (direct resistivity method)

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีการวัดตรงเป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้วัดค่าความต้านทานหรือวัดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทานนั้น พร้อมทั้งวัดกระแสที่ผ่านตัวต้านทานนั้นแล้วจะได้ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ส่วนด้วยกระแส วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่ความต้านทานที่วัดได้นี้มีความต้านทานที่จุดต่อขั้วไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย แต่สามารถลดค่าความต้านทานที่เพิ่มเข้ามานี้ โดยทำการปรับแต่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวต้านทานขึ้นอีกหลายค่าแล้วนำค่าความต่าง

ศักย์ไฟฟ้ามาเขียนกราฟกับค่าความต้านทานที่คำนวณได้ จะพบว่าค่าความต้านทานจะค่อย ๆ ลดลง และจะคงที่ในที่สุดและค่าความต้านทานที่คงที่นี้คือค่าที่ใกล้เคียงค่าจริงที่สุด

#### 2.4.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับการวัดโดยตรง ข้อแตกต่างอยู่ตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.23 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีพัฒนาจากชนิดแรก เพื่อที่จะจำกัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถที่จะตรวจสอบความสกปรกพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.21 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้าและกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือปนไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณวัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อยตรงบริเวณนั้น ทำให้การวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ไฟฟ้าโดยการวัดบริเวณจุด

ตรงที่คิดว่า เส้นต่าง ๆ ของศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะห่างที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้าและกระแสออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการหนึ่ง คือ โครงสร้างว่ามีโครงสร้างผลึกชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้ จะสามารถแยกความต้านทานจำเพาะที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.4.3 การนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นมีที่โดดเด่นอยู่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ 2 แบบด้วยกัน โดยการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิสูงสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองของซีดี (seto model) ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้น ในบริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนหรือไม่ก็เกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน โดยขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกึ่งตัวนำประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรนและความยาวของเดอรับายน์ ที่ความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-1/2} \exp\left[\frac{-\phi_b}{kT}\right] \quad (2.26)$$

เมื่อ	$\phi_b$	คือ	ค่าแกงศักย์
	A	คือ	ค่าคงที่
	T	คือ	อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน
	k	คือ	ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์ = $1.38 \times 10^{-23} J/K$

ในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้น การนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของมอทท์ (Mott Model) โดยจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) โดยจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของ

อะตอมแบบไม่เป็นระเบียบการนำไฟฟ้าแบบนี้โคเคนในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียงและพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน โดยสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกส์อิมิสชัน โดยพื้นที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมีที่กระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{-1/4} \right] \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$T_0 = \frac{k^4 T^5}{\phi_b^4} \quad (2.28)$$

## 2.5 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

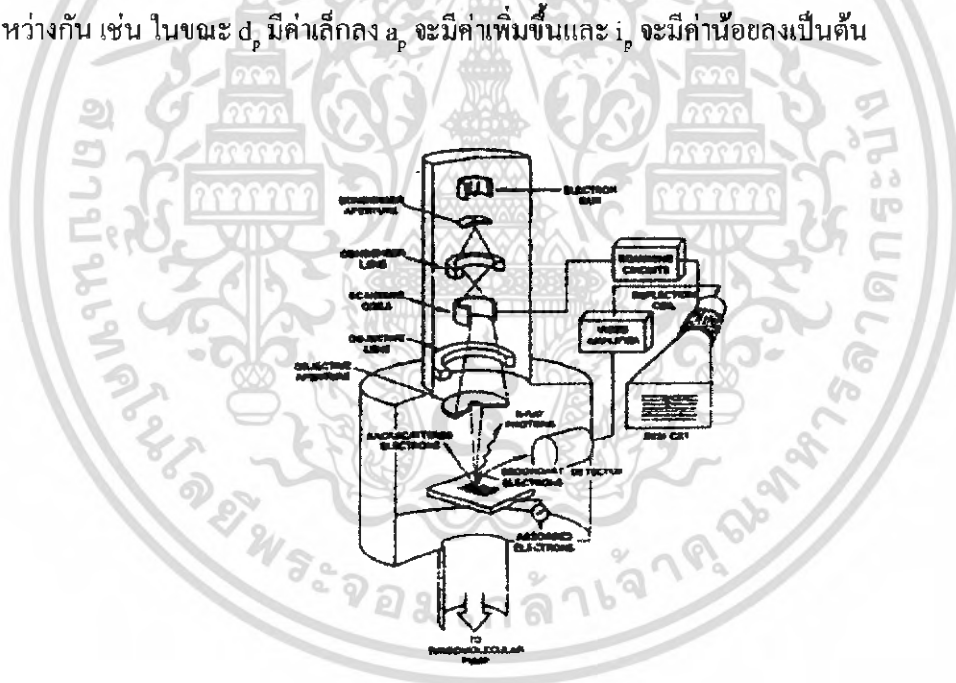
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแบบฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของสารตัวอย่างขนาดเล็กที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM เป็นภาพที่มีความลึกประเภทสามมิติ SEM เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 ทั้ง ๆ ที่การประดิษฐ์อุปกรณ์ชนิดนี้ได้มีมาในระยะเวลาระหว่างปี ค.ศ. 1929-1931 ทั้งนี้เพราะการคิดแปลงอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณอันเกิดจากลำอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ภาพที่ปรากฏออกมาในจอภาพจึงพร่ามัวขาดรายละเอียดหรืออีกนัยหนึ่งคือ มีการแจกแจงรายละเอียดต่ำ ฉะนั้นความสนใจในด้าน SEM จึงหยุดชะงักไประยะหนึ่งจนถึงปี ค.ศ. 1965 เมื่อ SEM เครื่องแรกได้ปรากฏออกสู่วงการวิทยาศาสตร์อีกครั้ง อันเป็นผลจากการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงทั้งระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทำให้บรรดานักวิทยาศาสตร์ด้านวิทยาศาสตร์กายภาพสนใจอุปกรณ์ชนิดนี้เป็นอย่างมากนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆของ SEM ในรูปที่ 2.24 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด (filament) และเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1-40 kV พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนด้วยระบบเลนส์ (condenser lens) และภาพโฟกัสโดย (objective lens) ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron, SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์และแปลงสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอคาโทด (cathode ray tube, CRT)

สำหรับการใช้งานโดยทั่วไปสามารถพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปร ดังนี้

1.  $d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลำอิเล็กตรอน (electron probe diameter)
2.  $i_p$  คือ กระแสของลำอิเล็กตรอน (electron probe current)
3.  $a_p$  คือ มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence)

ตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีส่วนสำคัญในการปฏิบัติงานด้วยกล้อง SEM ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกัน เช่น ในขณะที่  $d_p$  มีค่าเล็กลง  $a_p$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและ  $i_p$  จะมีค่าน้อยลง เป็นต้น

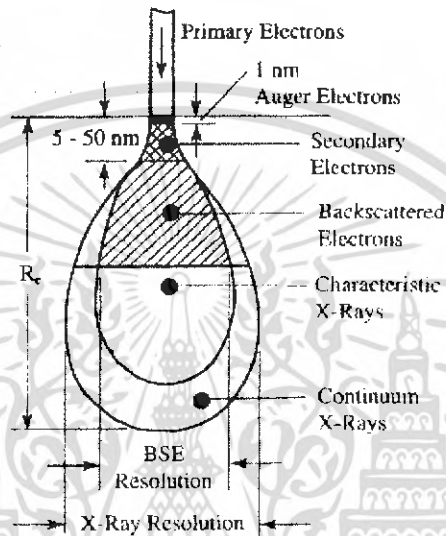


รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนผิวตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.25 โดยสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการกระเจิงชนเป็นสองลักษณะคือ 1. ยึดหยุ่น 2. ไม่ยึดหยุ่น การกระเจิงทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.23 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง

#### 2.5.1.1 การกระเจิงแบบยึดหยุ่น

ลักษณะการกระเจิงชนิดนี้สัญญาณที่ได้ คือ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จะสูญเสียพลังงานบางส่วน ให้กับอะตอมของสารตัวอย่างที่ตกกระทบ และมีการเปลี่ยนทิศทางมีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้ เรียกออิเล็กตรอนแบบกระเจิงย้อนกลับ (back scatter, BE) ภายในห้องใส่สารตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

#### 2.5.1.2 การกระเจิงแบบไม่ยึดหยุ่น

ลักษณะการกระเจิงชนิดนี้อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานลงมาให้กับอะตอมของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับความลึกจากผิวสารตัวอย่างได้รับ

อันตรกิริยาที่แตกต่างกัน โดยจะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการกระเจิงนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนออเจ รังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง คู่อิเล็กตรอน-โฮล รังสีอัลตราไวโอเลต การเปล่งแสงคาโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการกระเจิงในลักษณะนี้ เราจะได้สัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของสารตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอ็กซ์ ที่จะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างนั้น ๆ

## 1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

อิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของสารตัวอย่างหรืออิเล็กตรอนในสารตัวอย่าง ได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมาก การศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่างจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสเกิดสัญญาณ SE ยังอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิมีมาก โอกาสที่จะเกิด SE ก็จะน้อยลง หมายถึงสัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิไปกระตุ้นอะตอมของสารตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวสารตัวอย่างโอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

## 2. รังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการกระตุ้น โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง
2. รังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคุณลอมบีโกลิ้นิวเคลียส เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยาทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฏิกิริยาทำอันตรกิริยา สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \text{ (สำหรับกรณี } E_0 > E_1 \text{)}$$

$E_0$  = พลังงานของอิเล็กตรอนปฏิกิริยาทำอันตรกิริยา

$E_1$  = พลังงานของอิเล็กตรอนปฏิกิริยาทำอันตรกิริยา

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์

$\nu$  = ความถี่ของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้น

ลักษณะการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ เกิดจากอิเล็กตรอนปฏิกิริยาทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจร ทำให้ช่องว่างเกิดขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่าจึงต้องลดระดับพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รังสีเอ็กซ์) เช่น อิเล็กตรอนปฏิกิริยาทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่ พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นวงโคจร (electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้ว่ารังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากัน จึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง เป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอ็กซ์บ่งบอกปริมาณของธาตุในเนื้อสารตัวอย่างได้อีกด้วยซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

### 3. อิเล็กตรอนออเจ

อิเล็กตรอนออเจ เกิดจากอิเล็กตรอนปฏิกิริยาตกกระทบสารตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุของวงโคจรใด ๆ รังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นวงโคจรถัดออกไป ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรอิเล็กตรอนเรียกว่าอิเล็กตรอนออเจ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 การวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอนออเจนี้มีประโยชน์

ในการวิเคราะห์ผิวสารตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุ (ที่มีเลขอะตอมต่ำ) ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

#### 4. การเปล่งแสงคาโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่าง แสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองเห็นเกิดจากอะตอมของสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับสู่สภาวะปกติ อิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสภาวะกระตุ้นและสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างมากนัก เมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

##### 2.5.2 กำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SE)

เมื่ออิเล็กตรอนจากหลอด โทหร้อนถูกปลดปล่อยและถูกโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของสารตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนนี้จะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็ก เป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกระจัดของลำอิเล็กตรอน ไปบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง การกระจัดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกระจัดบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกัน สัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกระจัดของอิเล็กตรอน ในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT โดกว่าพื้นที่สแกนบนผิวของสารตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

กำลังขยาย =  $\frac{\text{พื้นบน CRT (display space)}}{\text{พื้นที่ของการกระจัดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$

ชุดของขดลวดกำเนิดสนามแม่เหล็กนี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ผิวของการกระจัดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกระจัดแล้ว ยังควบคุมความเร็วในการกระจัดอีกด้วย ลักษณะความเร็วในการกระจัดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกระจัดสูง เราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วต่ำในการกระจัด

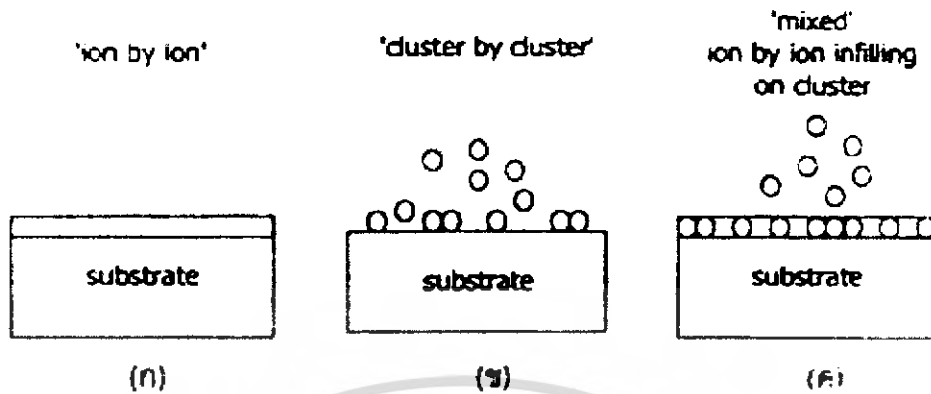
### 2.5.3 หัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (electron detectors)

เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยากับผิวของสารตัวอย่าง จะมีสัญญาณหลายชนิดคั้งนั้น จะต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์ทุติยภูมิจะถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้า จากตัวหัววัด โดยจะประกอบไปด้วยฟาราแคย์แดง ที่ถูกไบอัสด้วยสนามไฟฟ้าประมาณ +250 V โดยสนามบริเวณนี้จะดึงสัญญาณ SE ที่มีพลังงานในช่วง  $0 < E_{SE} < 50$  eV ให้เคลื่อนเข้าสู่หัววัด การไบอัสเป็น -50 V ใช้กับสัญญาณชนิด BE โดยมีพลังงานสูงในช่วง  $0 < E_{BSE} < E_0$  ทิศทางของสัญญาณที่เกิดมีความแตกต่างกัน เช่น สัญญาณ BE จะเกิดในแนวตั้งฉากกับสารตัวอย่างเพราะมีพลังงานมาก ส่วนสัญญาณ SE จะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ไบอัสไว้ทำให้สัญญาณ SE เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณเรืองแสงที่ทำมาจากแคลเซียมไดฟลูออไรด์และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็นคอลเลคเตอร์ ไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า +12 kV จะเร่งให้สัญญาณ SE เคลื่อนที่เข้าชนฉากเรืองแสงทำให้เกิดสัญญาณโฟตอนและจะถูกส่งไปตามท่อนำแสงเพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณ ไฟฟ้า แล้วจึงทำการขยายสัญญาณต่อไป

## 2.6 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้วิธีการอบสารละลายเคมี

### 2.6.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์สามารถทำได้ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี โดยการจุ่มฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ลงในสารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วย ไทโอยูเรีย ( $SC(NH_2)_2$ ), เกลือแคดเมียมซัลเฟต ( $CdSO_4$ ), ซิงค์ซัลเฟต ( $ZnSO_4$ ), ซึ่งจะให้อิออนของซัลเฟต ( $S^{2-}$ ), อิออนของแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) และอิออนของซิงค์ ( $Zn^{2+}$ ) ตามลำดับ ในการเตรียมฟิล์มนี้จะมีค่า  $pH$  ของสารละลายในภาชนะประมาณ 11.5 และจะเกิด  $Cd^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  อย่างช้า ๆ โดย  $Zn^{2+}$  จะเข้าไปแทนที่  $Cd^{2+}$  ทำให้เกิดฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ได้ ในงานวิจัยนี้เราใช้ค่า  $Zn$  ที่มีอัตราส่วนผสมทางเคมีคือ  $x = 0.4$  โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

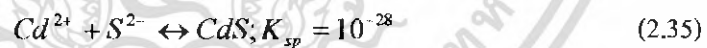
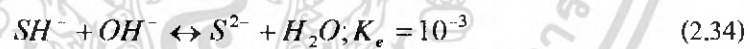
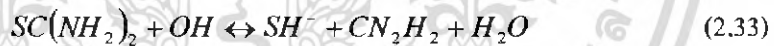
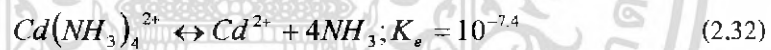


รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบางโดยใช้วิธีการอบสารละลายเคมี

โดย (ก) คือกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส (ข) คือ กระบวนการโฮโมจีเนียส และ (ค) กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรจีเนียสและโฮโมจีเนียส

#### 2.6.1.1 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ $CdS$

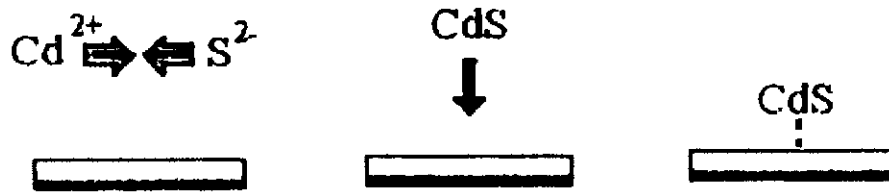
ก. กระบวนการโฮโมจีเนียสดังแสดงในรูปที่ 2.25



เมื่อ  $K_e$  คือ ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant)

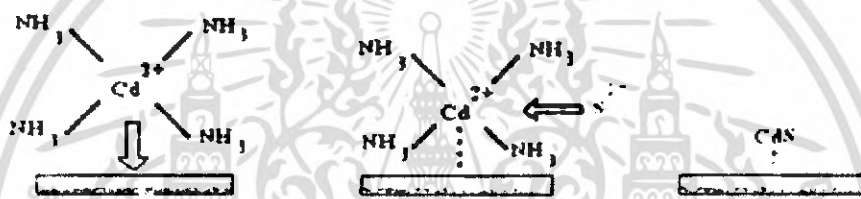
$K_{sp}$  คือ ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดฟิล์ม  $CdS$  บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส

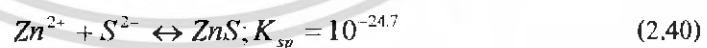
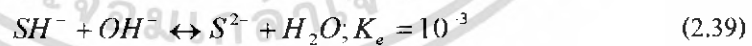
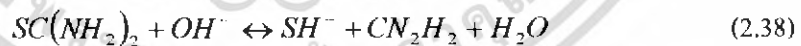
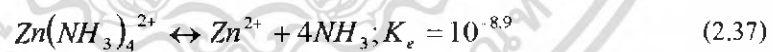
ข. กระบวนการเฮเทอโรจีเนียสแสดงดังรูปที่ 2.26

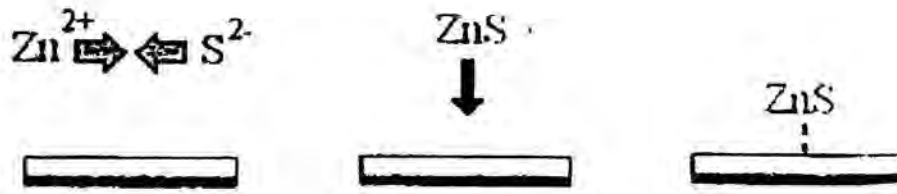


รูปที่ 2.26 แสดงการเกิดฟิล์ม  $CdS$  บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

### 2.6.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ $ZnS$

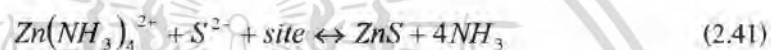
ก. กระบวนการโฮโมจีเนียสแสดงในรูปที่ 2.27





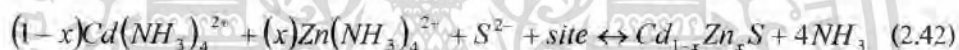
รูปที่ 2.27 แสดงการเกิดฟิล์ม  $ZnS$  บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส

ค. กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส



จากปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียสข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการเกิดฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$

แบบเฮเทอโรจีเนียส คือ



## 2.6.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกใส

ในการตกผลึกของ  $CdS$  และ  $ZnS$  ค่าผลคูณการละลาย (solubility product;  $K_{sp}$ ) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant;  $K_e$ ) ทั้งของ  $CdS$  และ  $ZnS$  มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นอัตราเร็วในการตกผลึกของ  $ZnS$  จึงช้ากว่าของ  $CdS$  ในการตกผลึกจึงเกิดกลไกได้ 2 แบบด้วยกันดังนี้คือ

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียสหรือกลไกการจับตัวกันแบบทีละกลุ่มก้อน (cluster by cluster) โดยจะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของฐานรองรับ ดังรูปที่ 2.25 และ 2.27

2. กลไกการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของฐานรองรับเรียกว่า แบบทีละไอออน (ion by ion) หรือการตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส โดยที่ตัว  $Cd^{2+}$  หรือ  $Zn^{2+}$  จะไปจับกับ  $NH_3$  กลายเป็น  $Cd(NH_3)_4^{2+}$  หรือ  $Zn(NH_3)_4^{2+}$  แล้วก็เคลื่อนมายังตำแหน่ง site บนผิวฐานรองรับเกิดการดูดซับ ทำให้โมเลกุลของแอมโมเนียหลุดออกมา ในขณะที่ไอออน  $S^{2-}$  ที่อยู่บริเวณ

น้ำจะสร้างพันธะรวมตัวกับแคดเมียมไอออนหรือสังกะสีไอออนกลายเป็น  $CdS$  หรือ  $ZnS$  ดังรูปที่ 2.26

เนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของทั้ง  $CdS$  และ  $ZnS$  มีค่าต่ำมาก ดังนั้นการควบคุมการตกตะกอนสามารถทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของไอออนอิสระ  $Cd^{2+}$  กล่าวคือต้องเลือกตัวเอเจนต์เชิงซ้อน ที่เหมาะสมเพื่อที่จะปล่อยไอออน  $Cd^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนลดกระบวนการเกิดฟิล์มแบบไฮโมจีเนียส ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดและคุณภาพ นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของ  $NH_3$  ยังช่วยลดการตกตะกอน (colloid) ของสารประกอบ  $Cd(OH)_2$  และ  $Zn(OH)_2$  ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการในปฏิกิริยาอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.1 ในการเตรียมฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  โดยวิธีการอบสารละลายเคมี

1 สารตั้งต้น ที่ใช้ประกอบไปด้วย

- แคลเซียมซัลเฟต ( $CdSO_4$ )
- ซิงค์ซัลเฟต ( $ZnSO_4$ )
- ไทโอยูเรีย ( $SC(NH_2)_2$ )
- แอมโมเนีย ( $NH_3$ )
- ไฮดราซีนโมโนไฮดรต ( $N_2H_5OH$ )
- อินเดียมคลอไรด์ ( $InCl_3$ ) 98%
- น้ำปอดประจุ (Deionized water)

2. กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นรองรับฟิล์มบาง

3. บีกเกอร์ขนาด 200 ม.ล.

4. เตาให้ความร้อน

5. แมกเนติกสติลเลอร์

6. เทอร์โมมิเตอร์

7. เครื่องชั่งดิจิตอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)

8. แท่นยึด

3.1.2 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ นั้นใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Philips รุ่น PW 1830 รังสีเอ็กซ์ มีความยาวคลื่น 1.5418 Å โดยให้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

3.1.3 การวัดการส่งผ่านทางแสง นั้นใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ JASCO 7800 ความยาวคลื่น 350 – 800 นาโนเมตร

### 3.1.4 การวัดค่าความต้านทานแผ่น ใช้ชุดการทดลองที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. อีเล็กโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. กล่องอคูมิเนียม
3. แบตเตอรี่ 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน
4. แบตเตอรี่ 9 โวลต์ จำนวน 2 ก้อน
5. สายโคแอกเซียลและคอนเนคเตอร์แบบ BNC
6. หลอดฮาโลเจน ชนิด ELH (120 โวลต์, 300 วัตต์)

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ และ $CdS$ ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In

#### 3.2.1 การเตรียมฐานรองรับ

การเตรียมฐานรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี ที่เป็นกระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้าง 12 มม. และความยาว 75 มม. มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไตรคลอโรเอททีลีน
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกักด้วยกรดคัทแควหรือไฮโครฟลูอออิก 10% เป็นเวลา 10 นาทีและล้างด้วยน้ำปอดคประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดคประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ  $95^{\circ}C$  เป็นเวลา 30 นาที
8. หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้ว จึงนำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้นี้ไปทำการเคลือบฟิล์ม  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S : In$  และ  $CdS : In$  ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

### 3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In โดยวิธีการอบสารละลายเคมี

ในการเตรียมฟิล์มบาง  $CdZnS:In$  โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ต้องใช้สารเคมี ดังนี้  $CdSO_4 + ZnSO_4$ ,  $SC(NH_2)_2$ ,  $NH_3$ , ไฮดรารซีน จำนวน 0.01, 0.05, 1.5, 3 โมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตร 10, 10, 16.8, 27.3 ม.ล. ตามลำดับ แล้วเติมน้ำปอลอคประจุ ในสารละลายทั้งหมดนั้นจนมีปริมาตร 150 ม.ล. มีชั้นตอนละเอียดดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น กลี้อแคดเมียมซัลเฟต [ $CdSO_4 \cdot (8/3)H_2O$ ], กลี้อซิงค์ซัลเฟต [ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ], ไทโอยูเรีย [ $SC(NH_2)_2$ ] ปริมาณ 0.2308, 0.1725, 0.5709 กรัม ตามลำดับและเตรียมแอมโมเนียและไฮดรารซีน ปริมาตร 16.8, 27.3 ม.ล. ตามลำดับ โดยอัตราส่วน Zn เท่ากับ 0.4
2. ละลายกลี้อแคดเมียมซัลเฟตลงในน้ำปอลอคประจุ 10 ม.ล. และกลี้อซิงค์ซัลเฟตลงในน้ำปอลอคประจุ 10 ม.ล. ที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายกลี้อไทโอยูเรียลงในน้ำปอลอคประจุ 10 ม.ล. ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำกระจกสไลด์ที่ขัดด้วยแท่งเทฟลอน ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอลอคประจุ อยู่ประมาณ 130 ม.ล. แห่อยู่ในอ่างปรับอุณหภูมิ  $80^\circ C$
5. เปิดสวิทซ์เตาให้หมุนแท่นแมกเนติกสตีลเลอร์ตลอดเวลาด้วยอัตราเร็วที่ช้ามาก ๆ
6. เทสารละลายแคดเมียมซัลเฟตและซิงค์ซัลเฟต 10 ม.ล. ตามด้วยแอมโมเนีย จากนั้นเทไฮดรารซีน, ไทโอยูเรีย ที่เตรียมไว้ลงบีกเกอร์ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำปอลอคประจุลงในบีกเกอร์ให้มีค่าประมาณ 150 ม.ล.
7. เมื่อสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี ให้วัดค่า pH ของสารละลาย โดยจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 11.5 จากนั้นรอประมาณ 1 ชั่วโมง โดยระหว่างนั้นให้ควบคุมอุณหภูมิของอ่างและควบคุมอัตราการหมุนของแมกเนติกสตีลเลอร์ให้มีค่าคงที่สม่ำเสมอและต้องเติมน้ำในอ่างให้มีระดับน้ำเท่ากับสารละลายที่มีอยู่ในบีกเกอร์ตลอดเวลา
8. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ให้นำเอาแผ่นกระจกสไลด์ออกจากบีกเกอร์จะพบว่าฟิล์มบางเคลือบติดอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ นอกจากนี้ยังมีตะกอนของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางและตกตะกอนอยู่ที่ก้นของบีกเกอร์

9. นำแผ่นกระจกที่เคลือบฟิล์มบางใส่ลงในน้ำปอลดประจุแล้วนำไปแช่ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที จากนั้นเปลี่ยนน้ำปอลดประจุแล้วทำการแช่อีก 2 ครั้ง เพื่อขจัดตะกอนที่อยู่ผิวหน้าของฟิล์มบางออกให้หมด
10. นำฟิล์มบางที่ได้มาเคลือบอีก 5 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-9 หลังจากครบแล้วนำมาเป่าให้แห้งด้วยความร้อนจากไคร้เป่าลม
11. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
13. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-800 นาโนเมตร
14. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM
15. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดค่าความต้านทาน โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

3.2.3 การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS:In โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ต้องใช้สารเคมีดังนี้  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ,  $\text{NH}_3$  จำนวน 0.01, 1.5, 3 โมลาร์ ตามลำดับ ปริมาตร 10, 10, 16.8 ม.ล. ตามลำดับ แล้วเติมน้ำปอลดประจุในสารละลายทั้งหมดนั้นจนมีปริมาตร 150 ม.ล. มีขั้นตอนละเอียดดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น เกลือแคลเซียมซัลเฟต  $[\text{CdSO}_4 \cdot (\frac{8}{3})\text{H}_2\text{O}]$ , ไทโอยูเรีย  $[\text{SC}(\text{NH}_2)_2]$  ปริมาณ 0.2564, 0.5709 กรัม ตามลำดับและเตรียมแอมโมเนีย ปริมาตร 16.8 ม.ล. ตามลำดับ
2. ละลายเกลือแคลเซียมซัลเฟตลงในน้ำปอลดประจุ 10 ม.ล. และเกลือซิงค์ซัลเฟตลงในน้ำปอลดประจุ 10 ม.ล. ที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายเกลือไทโอยูเรียลงในน้ำปอลดประจุ 10 ม.ล. ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำกระจกสไลด์ที่ขีดด้วยแท่งทฟลอน ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอลดประจุอยู่ประมาณ 130 ม.ล. ที่แช่อยู่ในอ่างปรับอุณหภูมิ 80 °C
5. เปิดสวิทซ์เตาให้หมุนแผ่นแมกเนติกสตีลเลอร์ตลอดเวลาด้วยอัตราเร็วที่ช้ามากๆ

6. เทสสารละลายแคดเมียมซัลเฟต 10 ม.ล. ตามด้วยแอมโมเนีย จากนั้นเทไทโอยูเรีย ที่เตรียมไว้ลงบีกเกอร์ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำปอดคประจุลงในบีกเกอร์ ให้มีค่าประมาณ 150 ม.ล.
7. เมื่อสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี ให้วัดค่า pH ของสารละลาย โดยจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 11.5 จากนั้นรอประมาณ 1 ชั่วโมง โดยระหว่างนั้นให้ควบคุมอุณหภูมิของอ่างและควบคุมอัตราการหมุนของแมกเนติกสติลเลอร์ให้มีค่าคงที่สม่ำเสมอและต้องเติมน้ำในอ่างให้มีระดับน้ำเท่ากับสารละลายที่มีอยู่ในบีกเกอร์ตลอดเวลา
8. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ให้นำเอาแผ่นกระจกสไลด์ออกจากบีกเกอร์จะพบว่าฟิล์มบางเคลือบติดอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ นอกจากนี้ยังมีตะกอนของแคดเมียมซัลไฟด์เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางและตกตะกอนอยู่ที่ก้นของบีกเกอร์
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางใส่ลงในน้ำปอดคประจุแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที จากนั้นเปลี่ยนน้ำปอดคประจุ แล้วทำการเขย่าอีก 2 ครั้ง เพื่อขจัดตะกอนที่อยู่ผิวหน้าของฟิล์มบางออกให้หมด
10. นำฟิล์มบางที่ได้มาเคลือบอีก 5 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-9 หลังจากครบแล้วนำมาเป่าให้แห้งด้วยความร้อนจากไดร์เป่าผม
11. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
13. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการส่งผ่านแสง ในช่วงความยาวคลื่น 350-800 นาโนเมตร
14. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM
15. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดค่าความต้านทาน โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS:In โดยการเจือ In ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเพื่อใช้ทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางทั้ง 2 ชนิด เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มบางที่เหมาะสมในการพัฒนาชั้นหน้าต่างในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

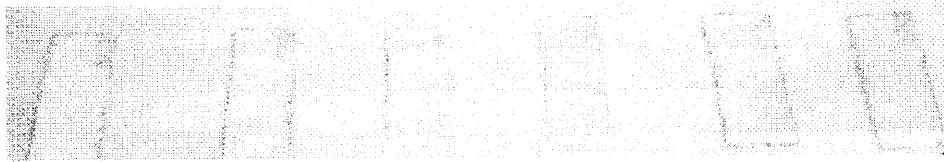
#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS:In ที่เตรียมได้

การเตรียมฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS:In โดยวิธีการอบสารละลายเคมี พบว่าฟิล์มบางที่ได้ยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม CdZnS:In พบว่า เมื่อสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้นรวมตัวกัน สารละลายที่ได้จะเป็นสีขาวขุ่นและในเวลาต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ส่วนในระหว่างขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม CdS:In เมื่อสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้นรวมตัวกัน สารละลายที่ได้จะเป็นสีขาวขุ่นและในเวลาต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม โดยสารละลายในการเตรียมฟิล์มบางทั้งสองชนิดดังกล่าวมีค่า pH ประมาณ 11.5 หลังจาก เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง นำกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์ม ไปแช่ด้วยอัลตราโซนิคเพื่อให้ตะกอนที่ติดอยู่บนผิวหน้าฟิล์มหลุดออกมาทุกครั้งหลังการเคลือบฟิล์ม เมื่อเตรียมฟิล์มเสร็จสิ้น ให้นำเอาฟิล์มบางที่ได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที จะได้ฟิล์มบางแสดงรูปที่ 4.1-4.8



As-deposited T=100 °C T=200 °C T=300 °C T=400 °C T=500 °C

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdZnS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



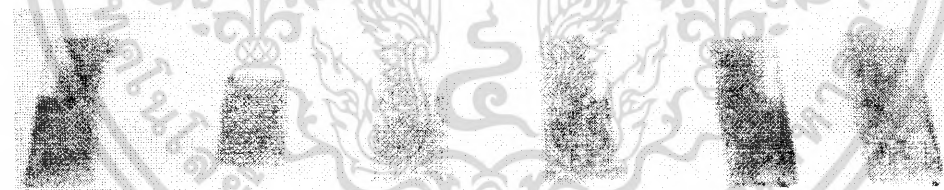
As-deposited T=100°C T=200°C T=300°C T=400°C T=500°C

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdZnS:(5%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



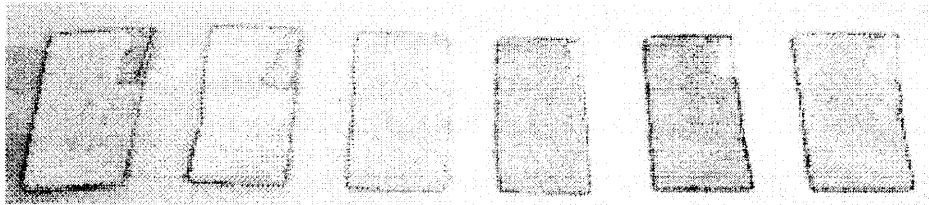
As-deposited T=100°C T=200°C T=300°C T=400°C T=500°C

รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdZnS:(10%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



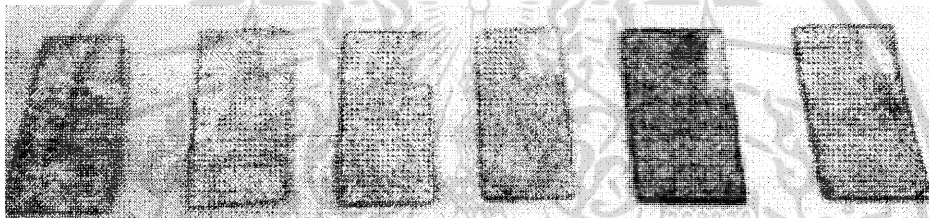
As-deposited T=100°C T=200°C T=300°C T=400°C T=500°C

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdZnS:(15%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



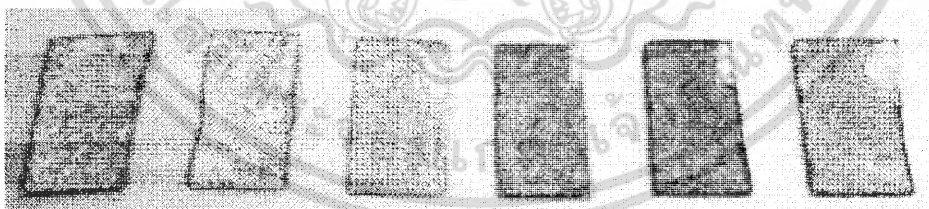
As-deposited T=100 °C T=200 °C T=300 °C T=400 °C T=500 °C

รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



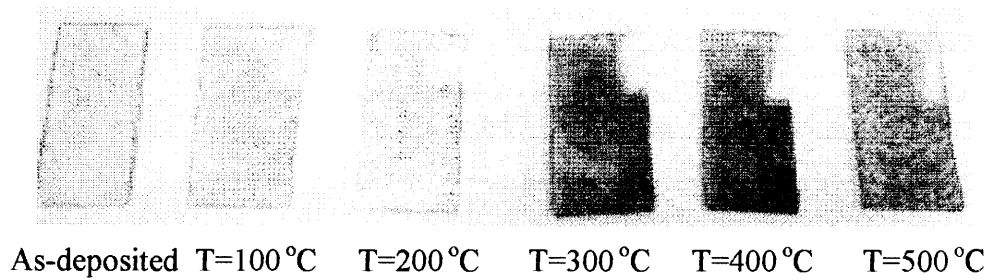
As-deposited T=100 °C T=200 °C T=300 °C T=400 °C T=500 °C

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



As-deposited T=100 °C T=200 °C T=300 °C T=400 °C T=500 °C

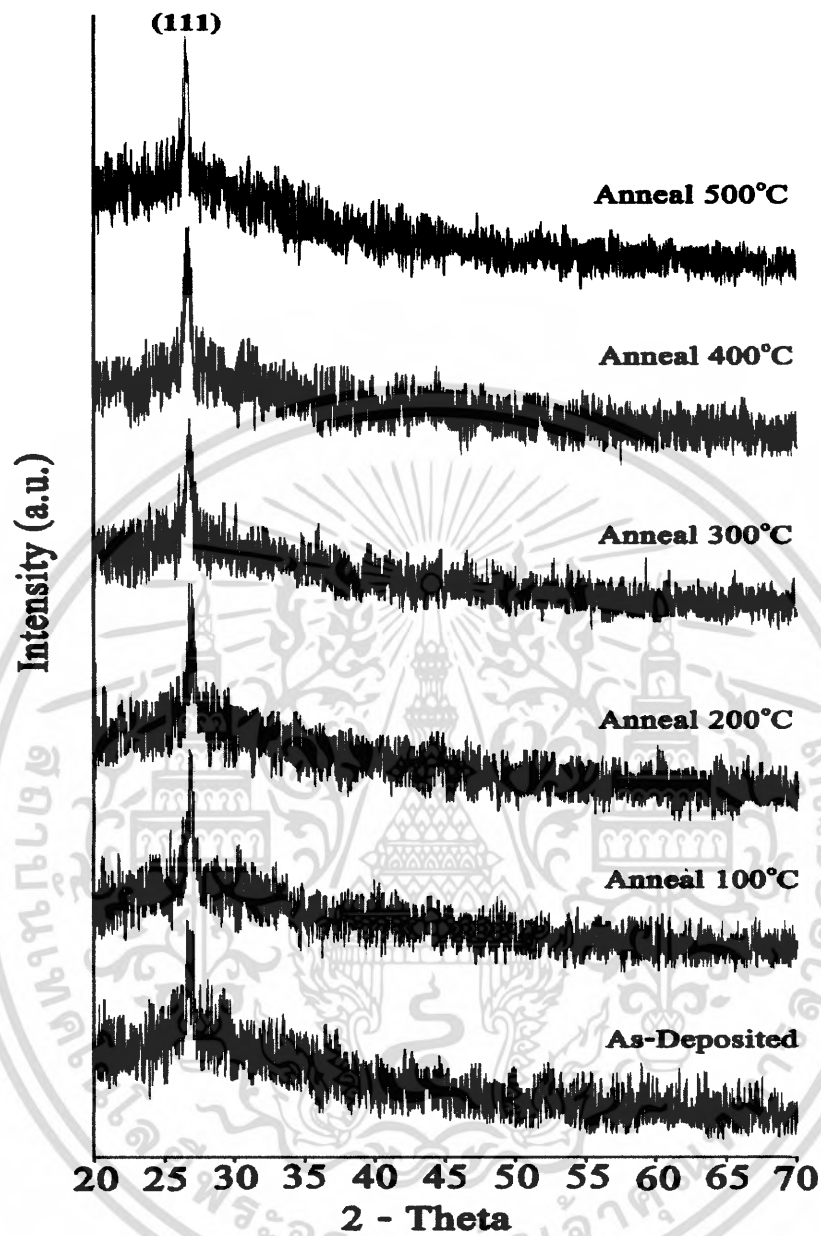
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS:(10%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง CdS:(15%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอสาละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

#### 4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdS:(5% In)

เนื่องจากต้องการทราบลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาครวมถึงพิสูจน์ว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้นั้นมีสาร CdS เป็นส่วนประกอบหรือไม่ ดังนั้นได้นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาตำแหน่งของพีคที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งของพีคมาตรฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบใด



รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อยังไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่ยังไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ 26.7° ซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐานจะอธิบายได้ว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยยังไม่แอนนัลมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและเมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C โครงสร้างผลึกยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง อาจจะเป็นเพราะ In ที่เราเจือเข้าไปมีผลต่ออุณหภูมิที่จะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลง อาจจะทำให้ต้องใช้อุณหภูมิแอนนัลที่สูงกว่านี้ โครงสร้างจึงจะเปลี่ยนแปลง

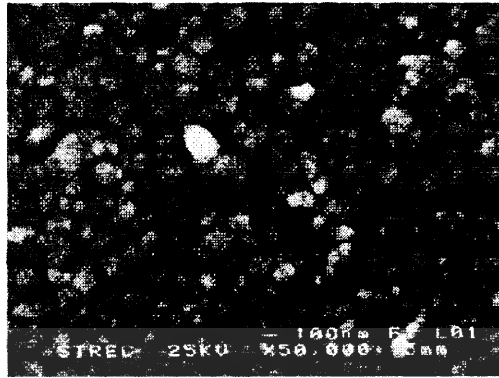
จากผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถนำไปคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนได้ โดยค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนที่คำนวณไว้จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของ โครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อยังไม่แอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Sample	Lattice constant (Å)	Grain size (nm)	$E_g$ (eV)
As-deposited	5.73	19	2.41
100	5.74	20	2.46
200	5.74	21	2.42
300	5.75	22	2.37
400	5.77	24	2.36
500	5.81	29	2.34

#### 4.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdS:In

ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdS และ CdS:(5%In) โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ปรากฏภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าฟิล์มบางแสดงดังรูปที่ 4.10-4.12



รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่มีการแอนนีก



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่มีการแอนนีก



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อยังไม่มีการแอนนีก

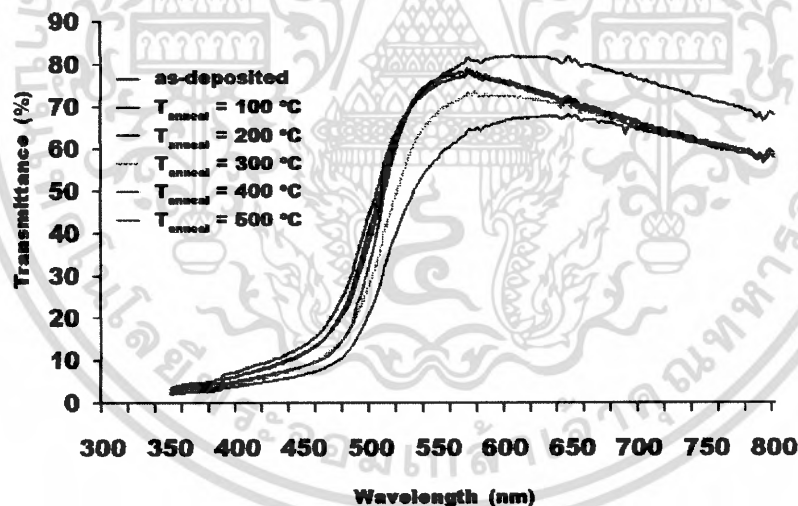
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CdS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ โดยประกอบไปด้วยเกรนที่มีขนาดใหญ่และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของฟิล์มบาง CdS:(5%In) จะเห็นว่าฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและประกอบไปด้วยเกรนที่มีขนาดเล็กลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า In ที่ทำการเจือลงไป มีผลทำให้ขนาดของเกรนเล็กลงขึ้นแต่ทำให้ความหนาแน่นของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น

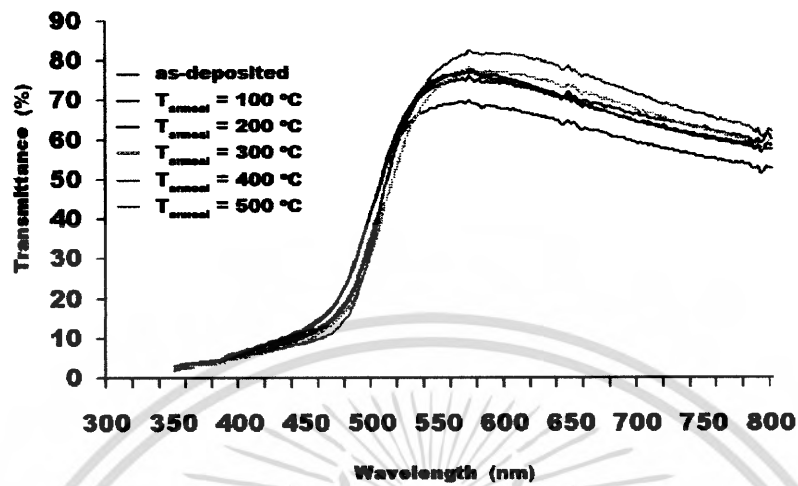
#### 4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS เพื่อคำนวณค่าช่องว่าง

##### แถบพลังงาน

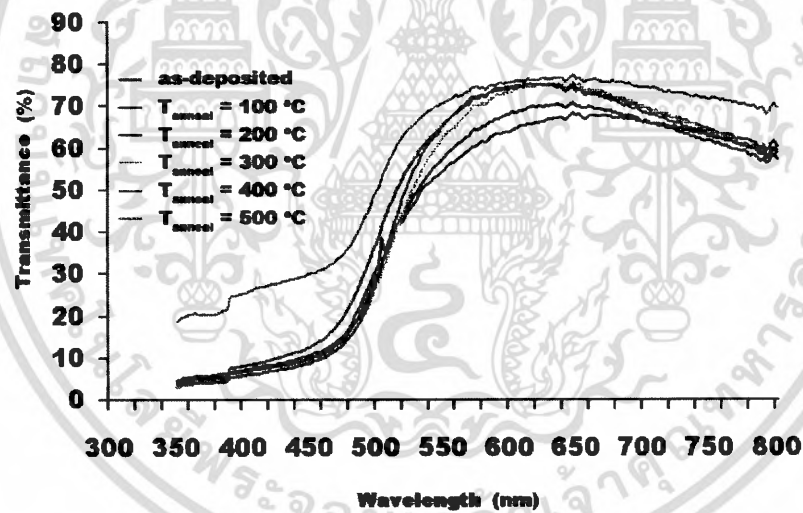
ได้ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdZnS:In และ CdS:In โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ทั้งในกรณีที่ไม่แอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที โดยวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdZnS:In ในช่วง 350-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้รุ่น 7800 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13-4.20



รูปที่ 4.13 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C

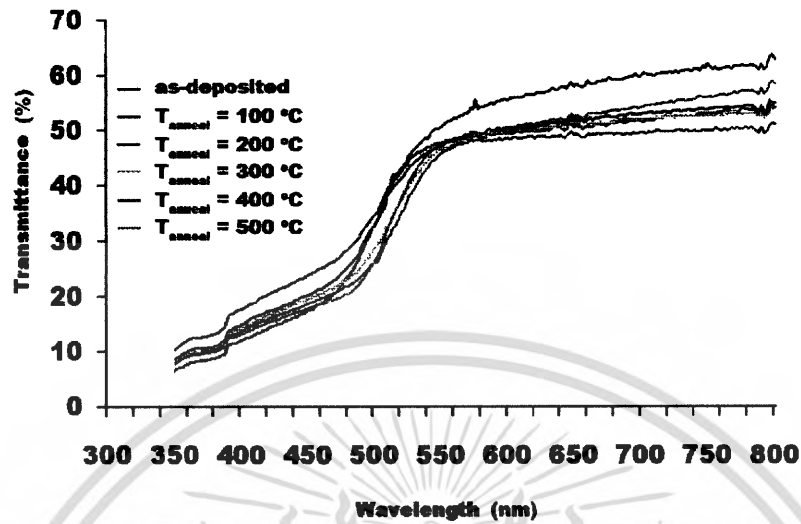


รูปที่ 4.14 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ  $100\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$

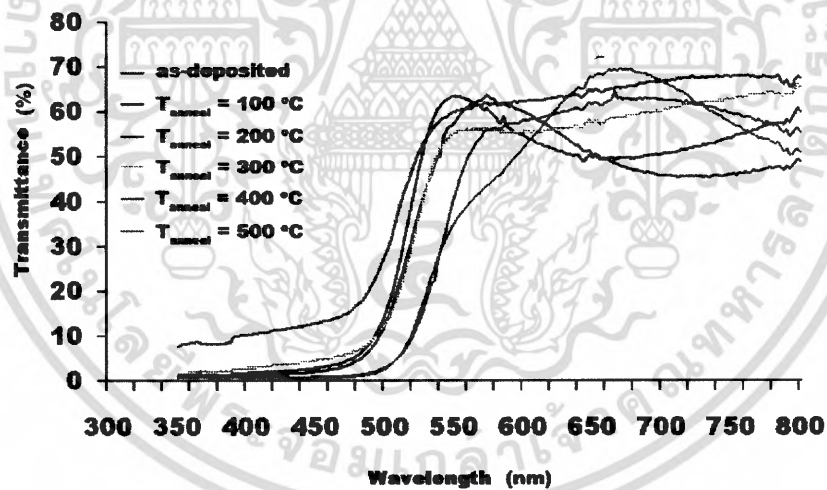


รูปที่ 4.15 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(10\%\text{In})$  ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ  $100\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

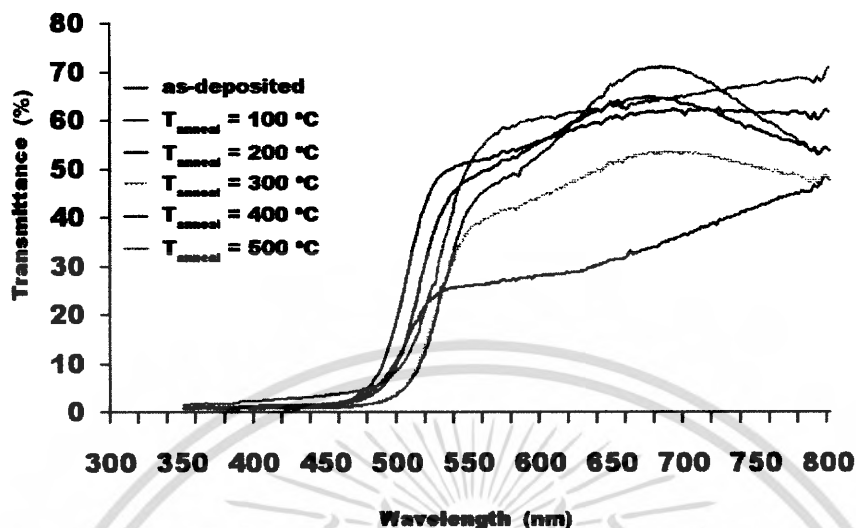


รูปที่ 4.16 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(15\%\text{In})$  ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C

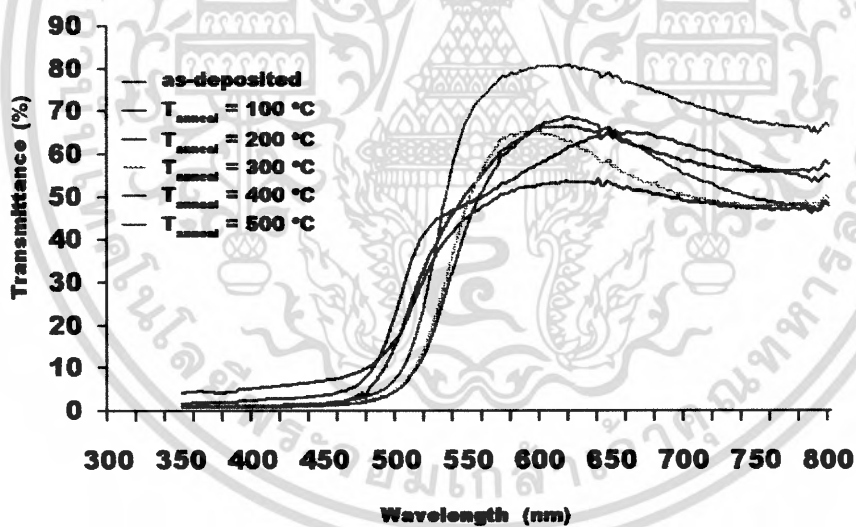


รูปที่ 4.17 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

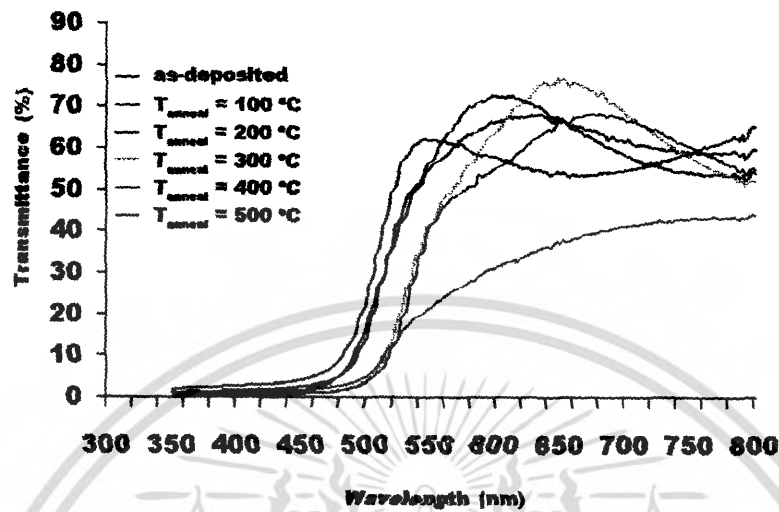


รูปที่ 4.18 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C



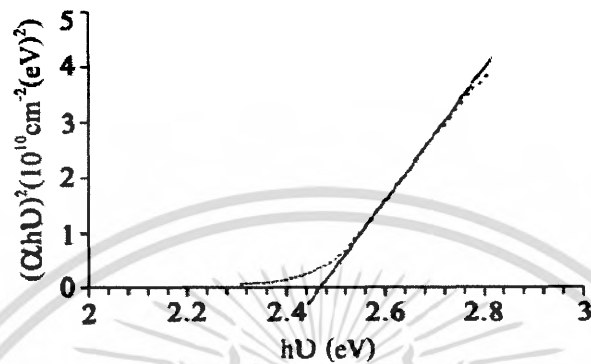
รูปที่ 4.19 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS:(10%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

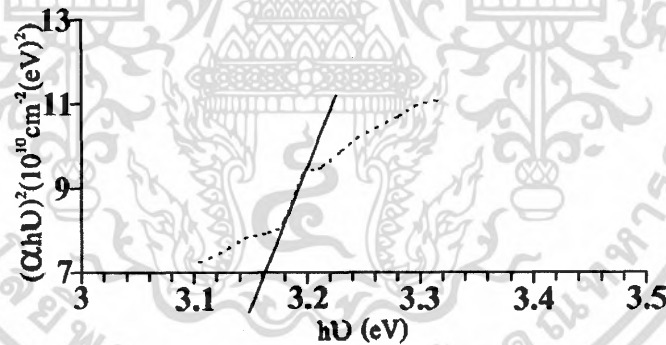


รูปที่ 4.20 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS:(15%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C

จากรูปการส่งผ่านของแสง สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง ( $\alpha^2 h\nu$ ) กับ พลังงาน โฟตอน ( $h\nu$ ) เพื่อหาขนาดของแถบช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) สามารถหาได้จากการลากเส้นตรงโดยประมาณต่อส่วนที่แสดงกราฟแบบเชิงเส้น ไปตัดแกนพลังงานโฟตอนจุดตัดกราฟที่ได้คือ ค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน โดยขนาดช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.8}Zn_{0.2}S$  จะมีค่า 2 ค่า คือ เป็นค่าแถบช่องว่างพลังงานของ CdS และ ZnS ดังรูปที่ 4.21-4.56

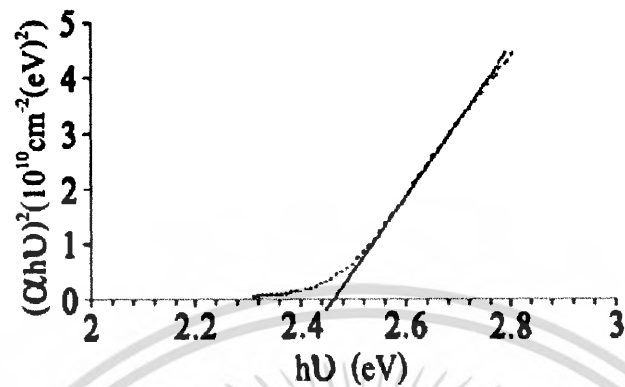


รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนihil เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

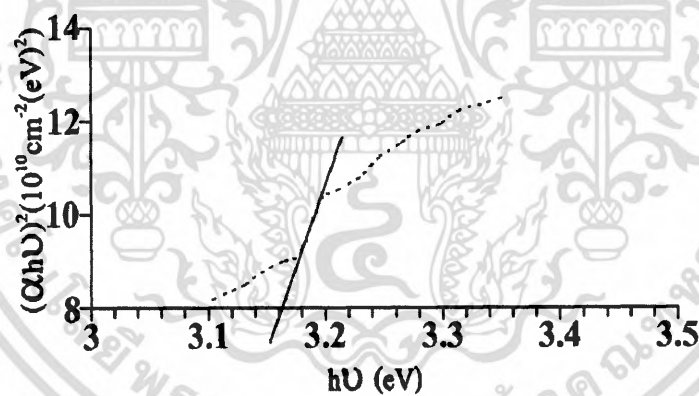


รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนihil เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

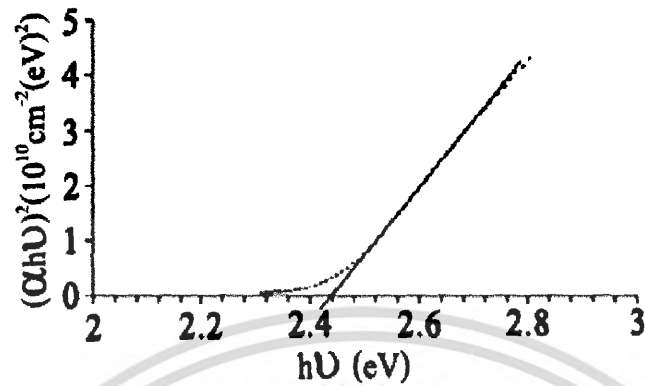


รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

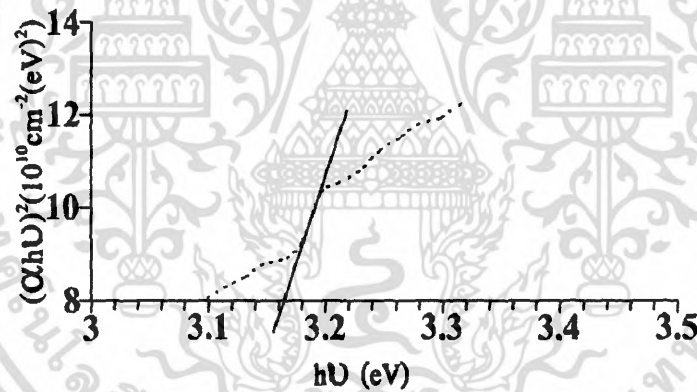


รูปที่ 4.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

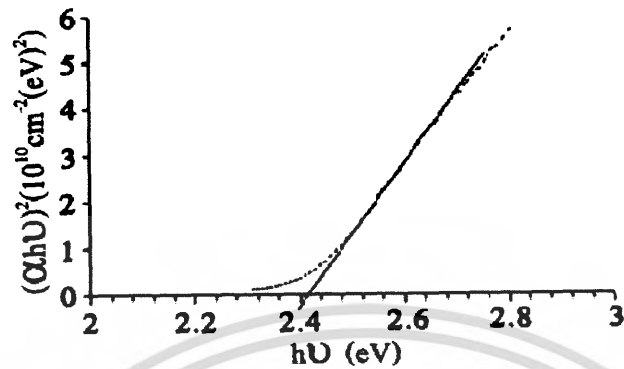
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



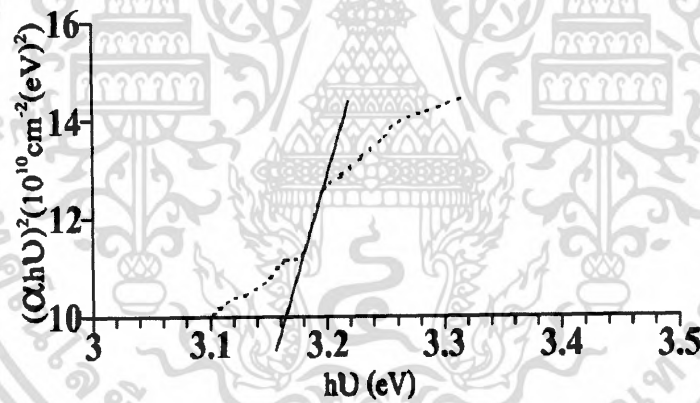
รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$



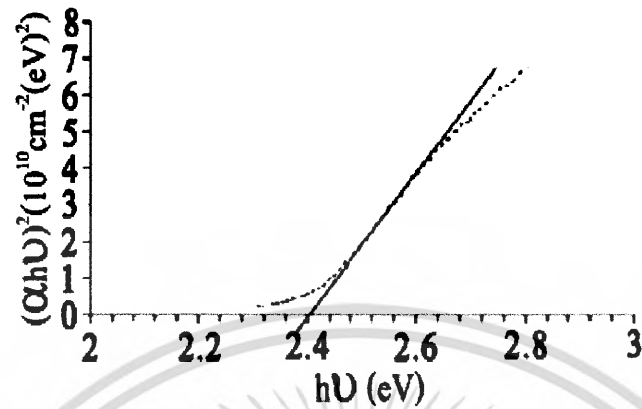
รูปที่ 4.26 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$



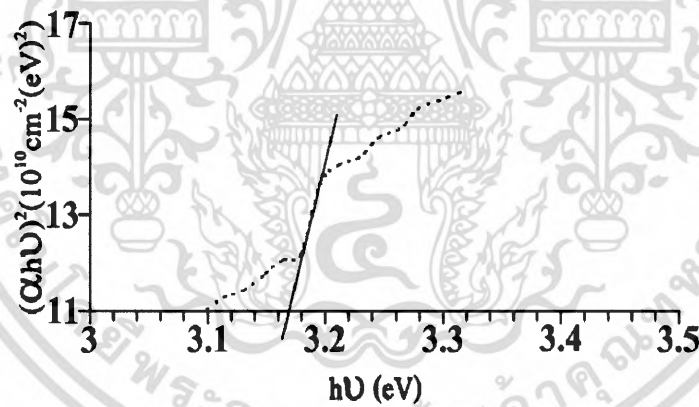
รูปที่ 4.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$



รูปที่ 4.28 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

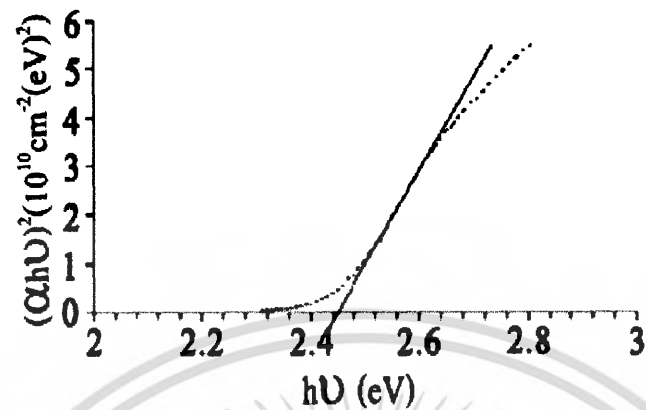


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

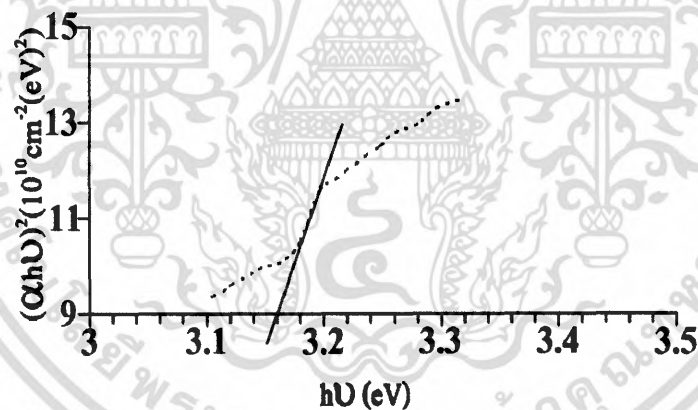


รูปที่ 4.30 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

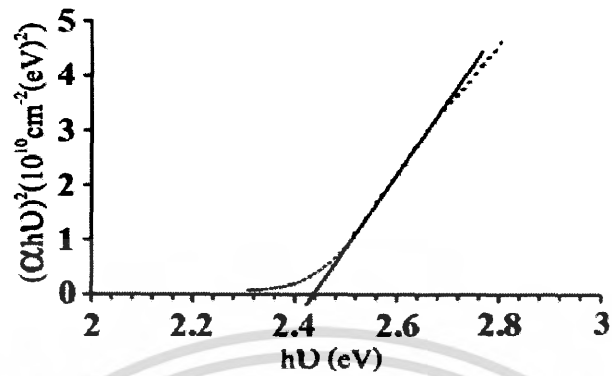


รูปที่ 4.31 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

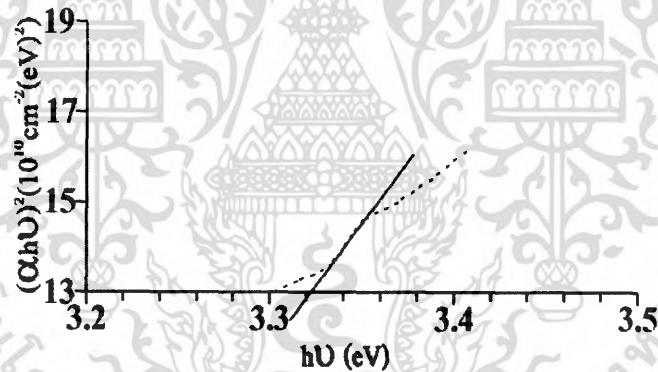


รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

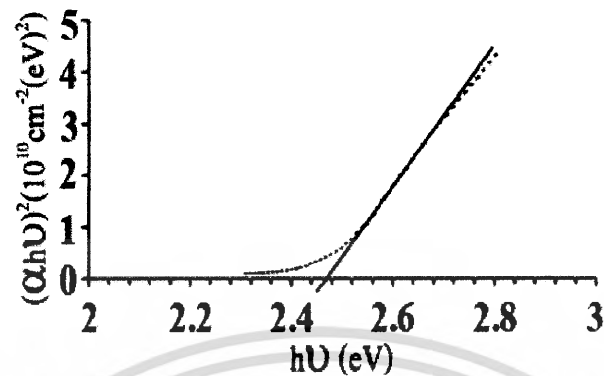


รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\% \text{In})$  เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

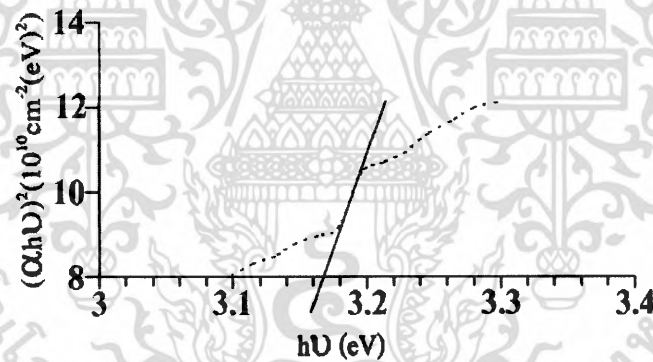


รูปที่ 4.34 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\% \text{In})$  เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

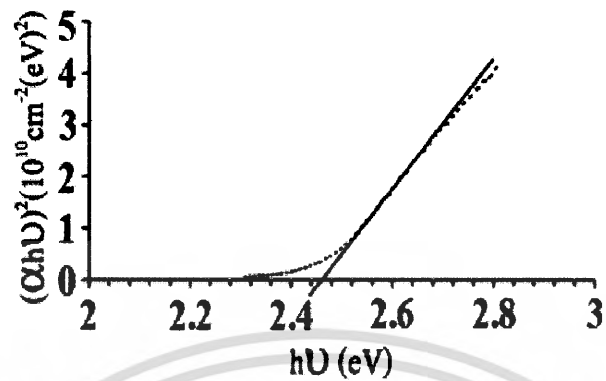


รูปที่ 4.35 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงาน โฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

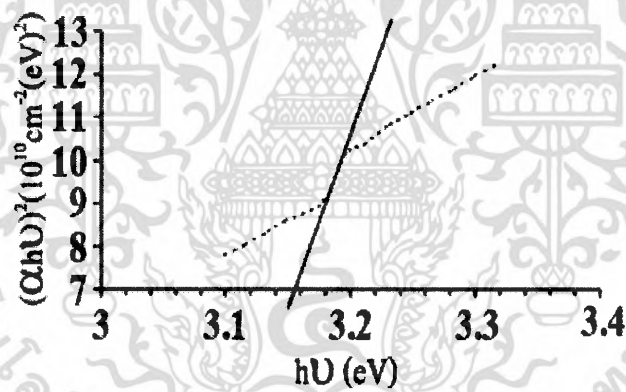


รูปที่ 4.36 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงาน โฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

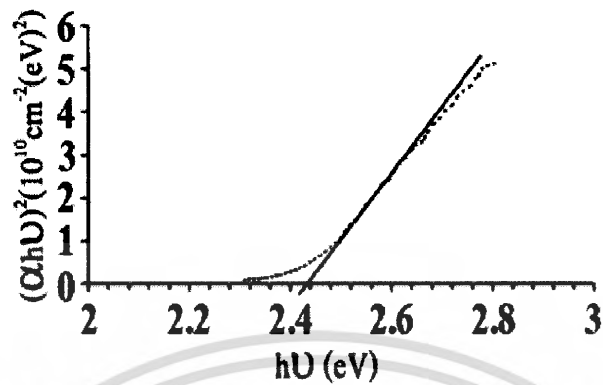


รูปที่ 4.37 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}C$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

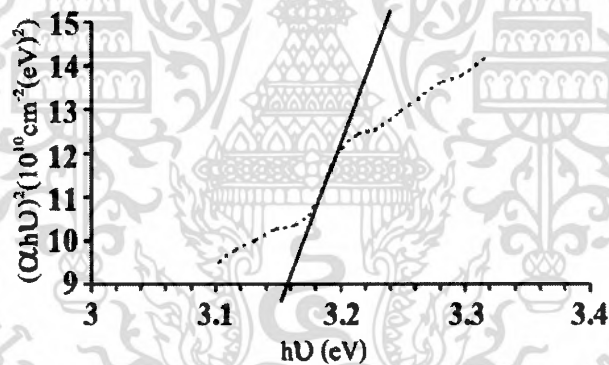


รูปที่ 4.38 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}C$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

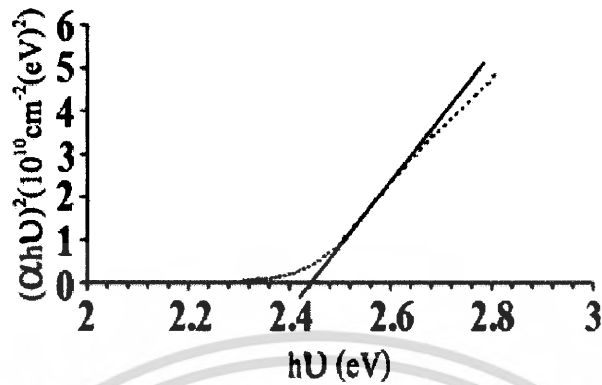
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



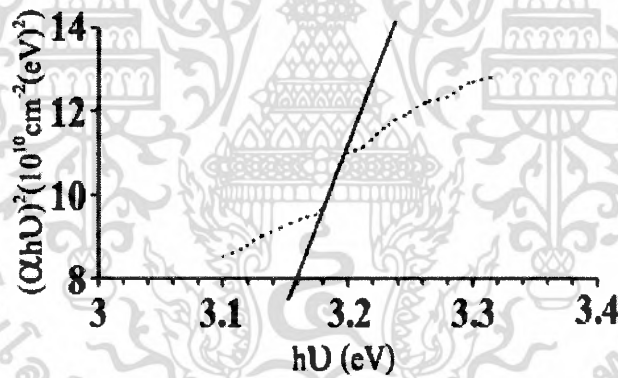
รูปที่ 4.39 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$



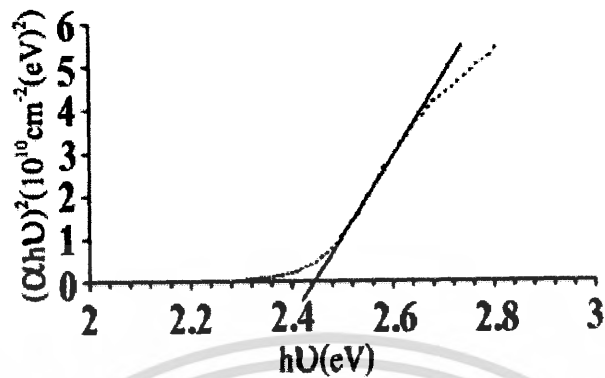
รูปที่ 4.40 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$



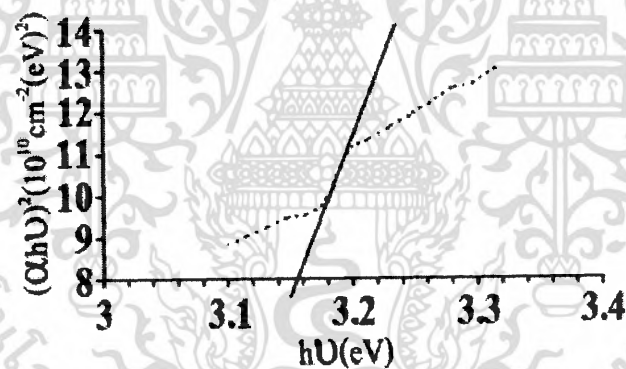
รูปที่ 4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}C$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$



รูปที่ 4.42 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}C$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

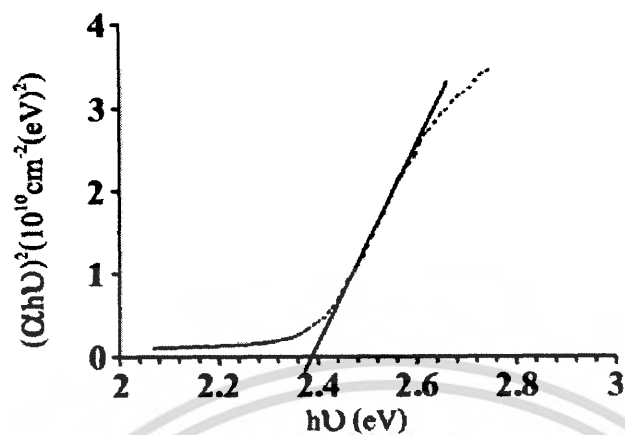


รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(\alpha h\nu)$  ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g1}$

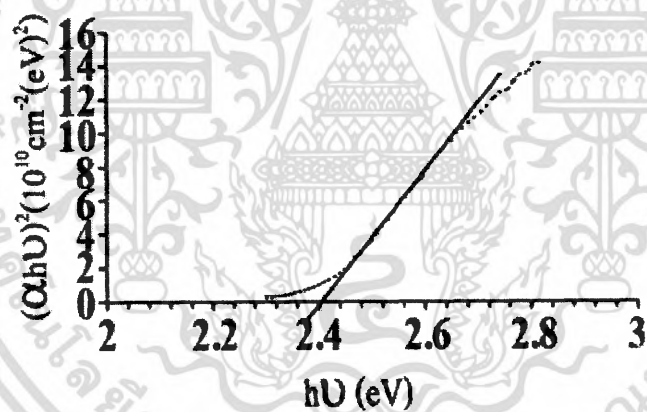


รูปที่ 4.44 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(\alpha h\nu)$  ของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เพื่อหาค่า  $E_{g2}$

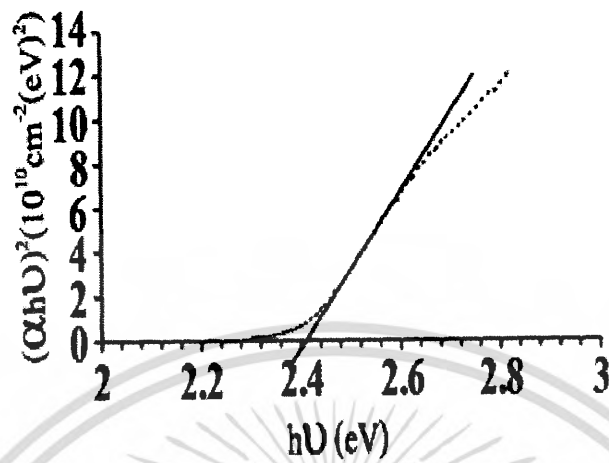
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



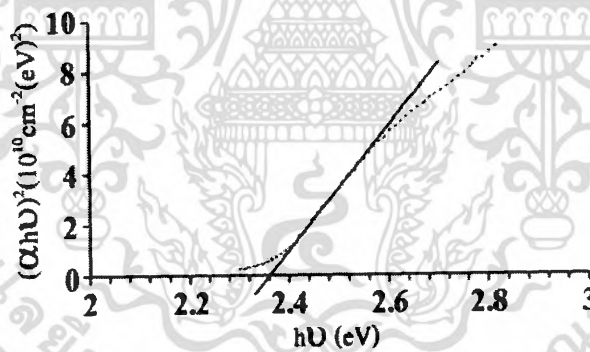
รูปที่ 4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล



รูปที่ 4.46 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 °C

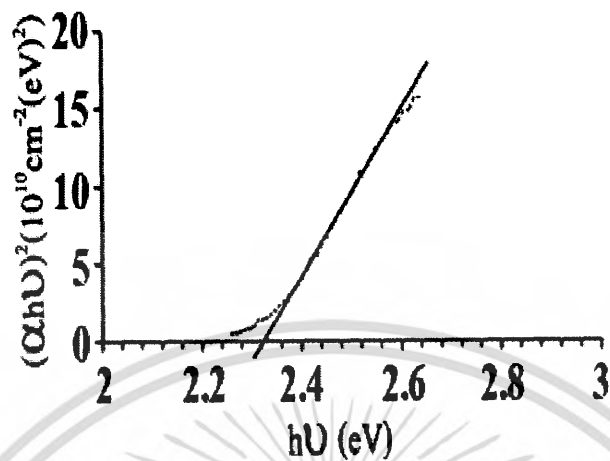


รูปที่ 4.47 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C

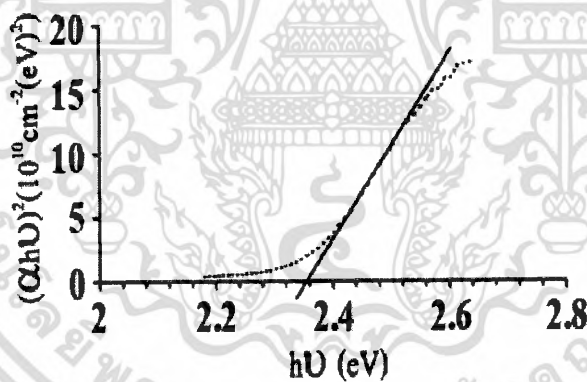


รูปที่ 4.48 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

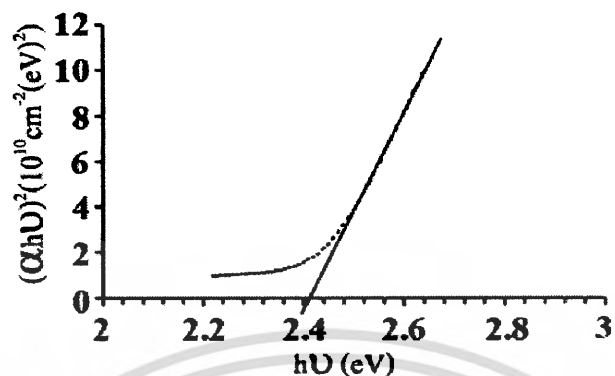


รูปที่ 4.49 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

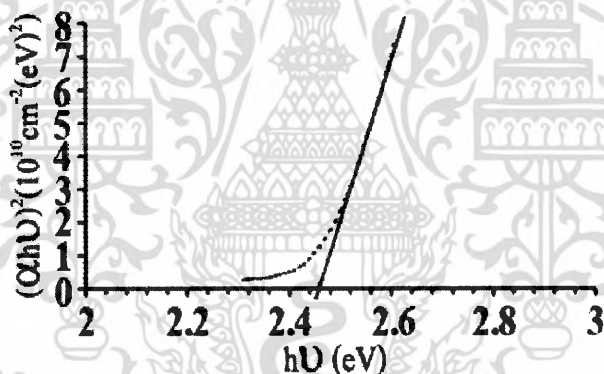


รูปที่ 4.50 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

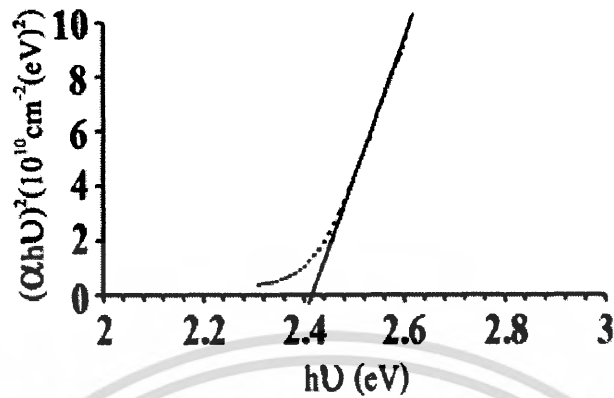


รูปที่ 4.51 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงาน โฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อยังไม่ทำการแอนนัล

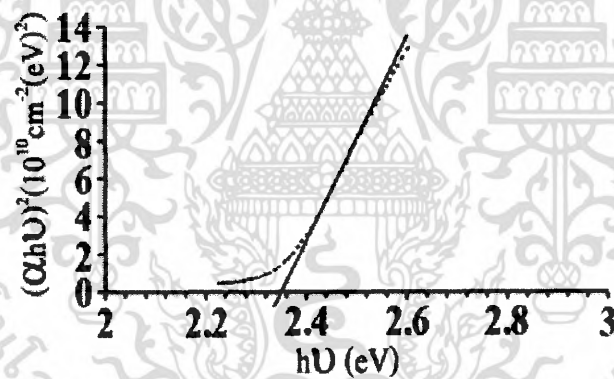


รูปที่ 4.52 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงาน โฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

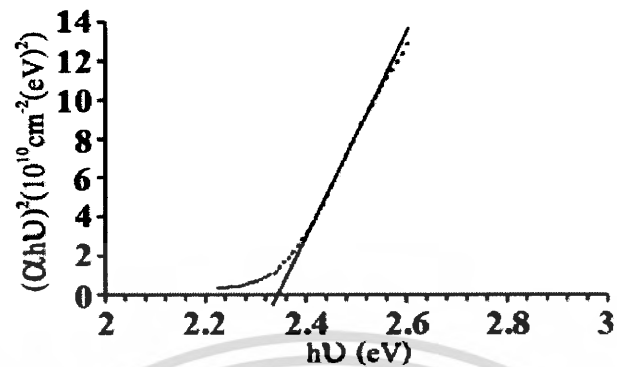


รูปที่ 4.53 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C

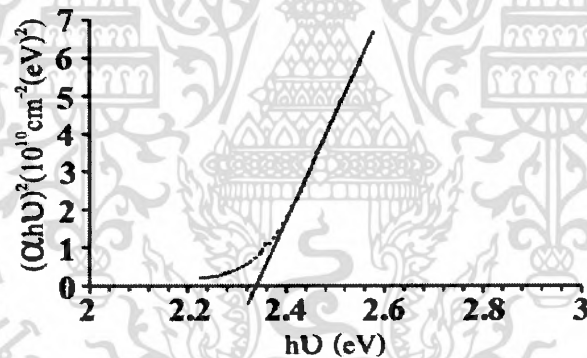


รูปที่ 4.54 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.56 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อนำมาเขียนตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่แอนนัลกับค่าแถบพลังงาน ได้ดังนี้

ตาราง 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g1}$ ) (eV)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g2}$ ) (eV)
As-deposited	2.47	3.15
100	2.46	3.15
200	2.44	3.16
300	2.42	3.16
400	2.40	3.16
500	2.45	3.15

ตาราง 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ทั้งที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g1}$ ) (eV)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g2}$ ) (eV)
As-deposited	2.44	3.31
100	2.47	3.16
200	2.46	3.16
300	2.44	3.16
400	2.44	3.16
500	2.41	3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(10\%In)$  ทั้งที่  
 ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซ  
 ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g1}$ ) (eV)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g2}$ ) (eV)
As-deposited	2.44	3.18
100	2.40	3.16
200	2.39	3.16
300	2.38	3.17
400	2.38	3.18
500	2.41	3.18

ตาราง 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(15\%In)$  ทั้งที่  
 ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซ  
 ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g1}$ ) (eV)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_{g2}$ ) (eV)
As-deposited	2.37	3.17
100	2.32	3.17
200	2.29	3.16
300	2.27	3.17
400	2.24	3.17
500	2.32	3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง CdS ทั้งที่ไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนีกัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) (eV)
As-deposited	2.38
100	2.40
200	2.41
300	2.36
400	2.32
500	2.36

ตาราง 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ทั้งที่ไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนีกัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) (eV)
As-deposited	2.41
100	2.46
200	2.42
300	2.37
400	2.36
500	2.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

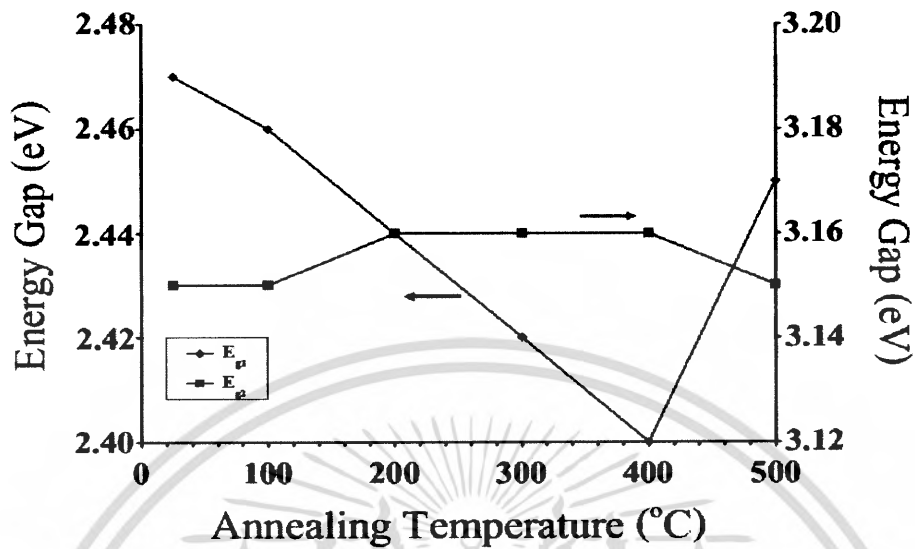
ตาราง 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง CdS:(10%In) ทั้งที่ไม่มี  
การแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซ  
ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) (eV)
As-deposited	2.43
100	2.45
200	2.38
300	2.35
400	2.30
500	2.40

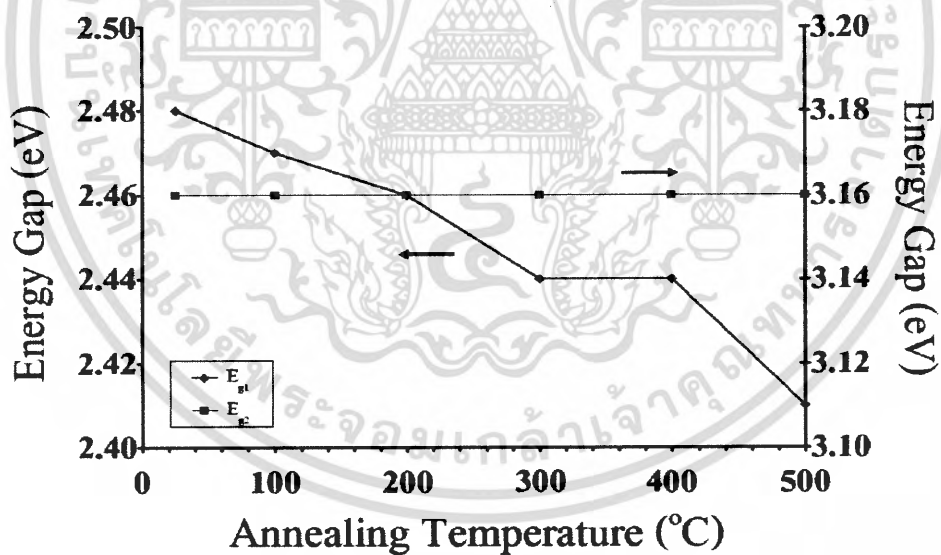
ตาราง 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง CdS:(15%In) ทั้งที่ไม่มี  
การแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซ  
ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนัล (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) (eV)
As-deposited	2.42
100	2.45
200	2.38
300	2.35
400	2.33
500	2.32

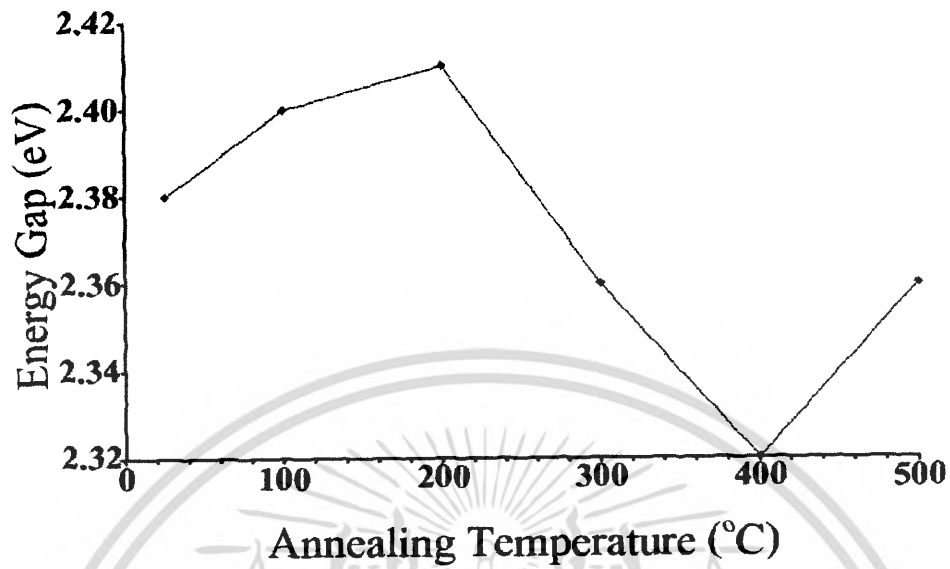
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



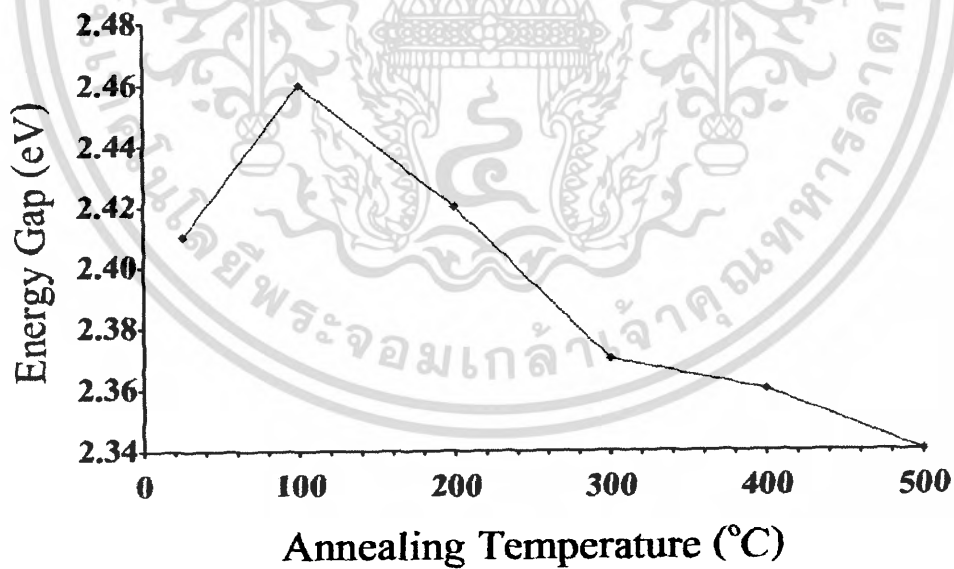
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_{g1}$  และ  $E_{g2}$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  เมื่อแอนนัลที่ อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.58 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_{g1}$  และ  $E_{g2}$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  เมื่อแอนนัลที่ อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ของฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



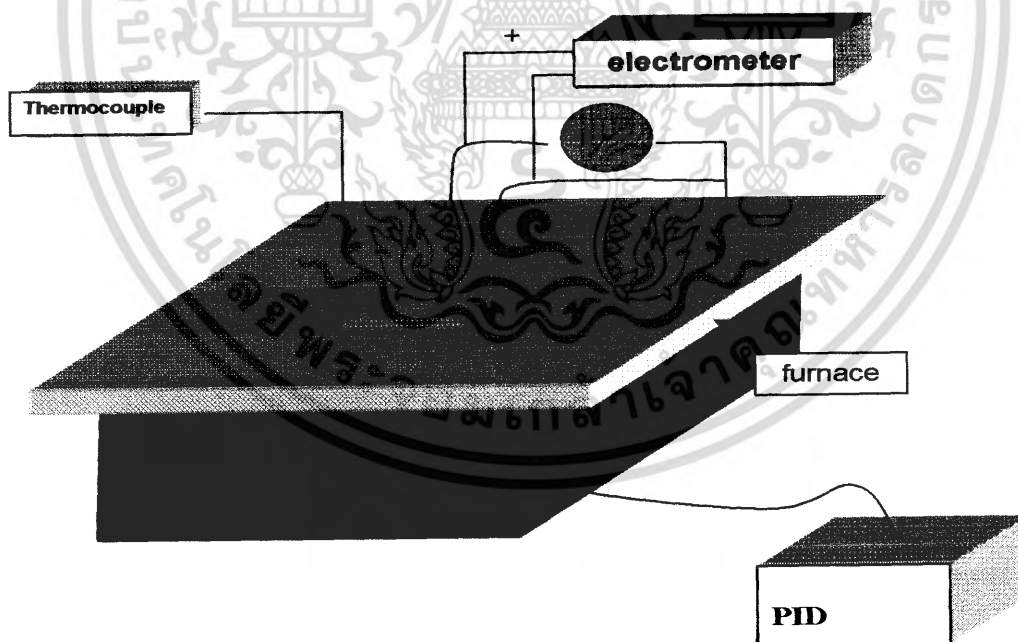
รูปที่ 4.60 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) เมื่อแอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{In}$

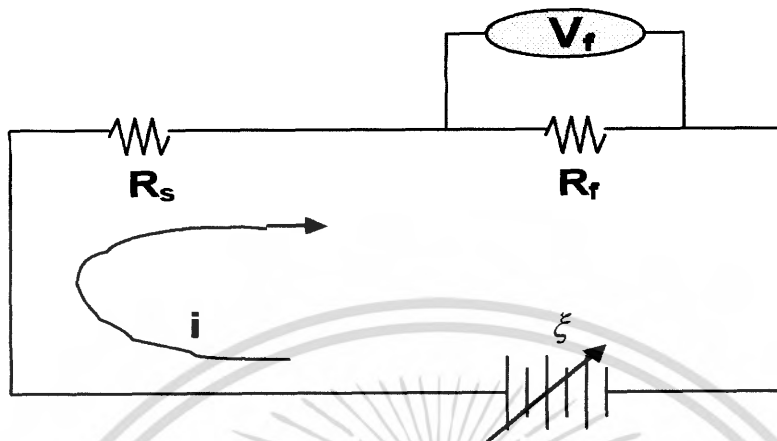
##### 4.5.1. ค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิห้อง

เนื่องจากว่าฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{In}$  ที่มีปริมาณ Zn เจือปนอยู่มากจะมีความต้านทานสูงมาก จึงทำให้ต้องมีการพัฒนาเทคนิคการวัดใหม่ ดังรูปที่ 4.62 เมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า ( $\xi$ ) ผ่านวงจรที่มีความต้านทานสองค่าคือความต้านทานของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{In}$  ( $R_f$ ) และความต้านทานจากตัวต้านทานมาตรฐานขนาด  $10^6$  โอห์ม ( $R_s$ ) แล้วทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_s$ ) คร่อมตัวต้านทานมาตรฐาน ทำให้สามารถทราบกระแสในวงจรจาก  $i = \frac{V_s}{10^6}$  โดยจะสามารถหาความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมฟิล์มบางได้จาก  $\xi - V_s$  จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอีก 5 ค่า ได้ค่ากระแสในวงจร I และความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมฟิล์มบาง ( $\xi - V_s$ ) เมื่อนำ I และ  $\xi - V_s$  มาเขียนกราฟจะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ R ดังรูปที่ 4.63

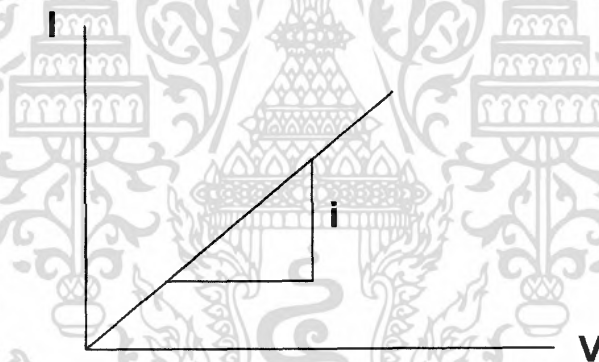


รูปที่ 4.61 แสดงการจัดชุดอุปกรณ์วัดความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 วงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานสูงของสารตัวอย่าง



รูปที่ 4.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในวงจรกับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

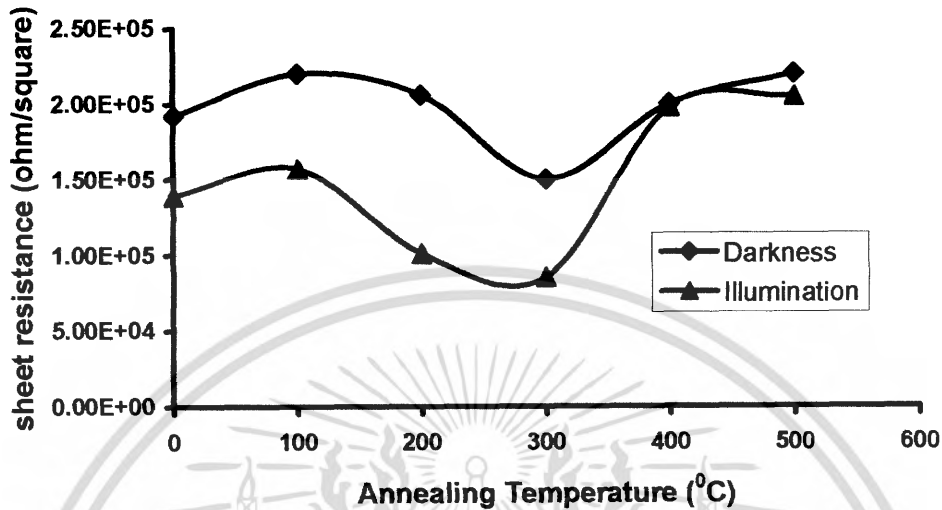
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  และ  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

Annealing Temperature (°C)	$R_s(\Omega/\text{square})$			
	$\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$		$\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$	
	Dark	Illuminated	Dark	Illuminated
As-deposited	$6.48 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$7.91 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$
100	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$6.05 \times 10^8$	$4.7 \times 10^8$
200	$5.13 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.75 \times 10^8$	$4.48 \times 10^8$
300	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.46 \times 10^8$	$4.26 \times 10^8$
400	$7.31 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$2.36 \times 10^9$	$4.94 \times 10^8$
500	$1.46 \times 10^9$	$4.94 \times 10^8$	$2.64 \times 10^9$	$4.94 \times 10^8$

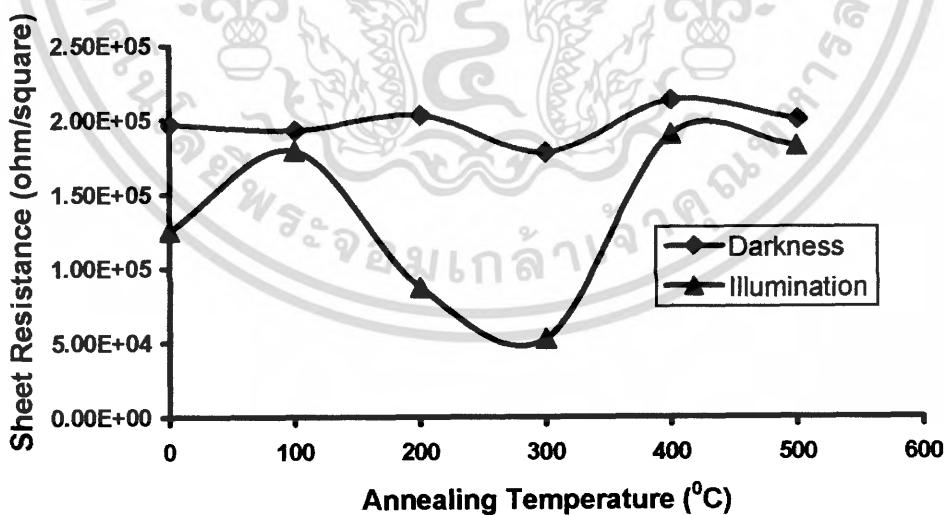
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(10\%\text{In})$  และ  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(15\%\text{In})$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

Annealing Temperature (°C)	$R_s(\Omega/\text{square})$			
	$\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(10\%\text{In})$		$\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(15\%\text{In})$	
	Dark	Illuminated	Dark	Illuminated
As-deposited	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.75 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$
100	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.75 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$
200	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$
300	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.19 \times 10^8$	$4.26 \times 10^8$
400	$2.97 \times 10^9$	$5.19 \times 10^8$	$2.64 \times 10^9$	$5.19 \times 10^8$
500	$5.19 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$	$5.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH



รูปที่ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\% \text{In})$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) ของแผ่นฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  จะเห็นได้ว่าช่วงที่ค่า  $R_s$  มีค่าน้อยคือ ช่วงอุณหภูมิแอนนัลของแผ่น 200-300 °C และเมื่อทำการฉายแสงแล้ว ค่า  $R_s$  จะเปลี่ยนแปลงไปโดยจะมีค่าลดลงแต่จะไม่เปลี่ยนแปลงมากเหมือนกับช่วงอุณหภูมิอื่นๆ ส่วนค่า  $R_s$  ของฟิล์มบางแบบที่เจือ (5%In) จะยังเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นเป็น 300 °C ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าน้อยที่สุด โดยที่เมื่อฉายแสงแล้ว ค่า  $R_{sh}$  จะเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งแตกต่างกับที่อุณหภูมิ 100 , 400, 500 °C และที่ไม่ได้มีการแอนนัล คือเมื่อฉายแสงแล้ว ค่า  $R_s$  จะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ทำให้เราทราบว่า ฟิล์ม  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และฟิล์ม  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่อุณหภูมิแอนนัล 300 °C จะมีคุณภาพดีที่สุด

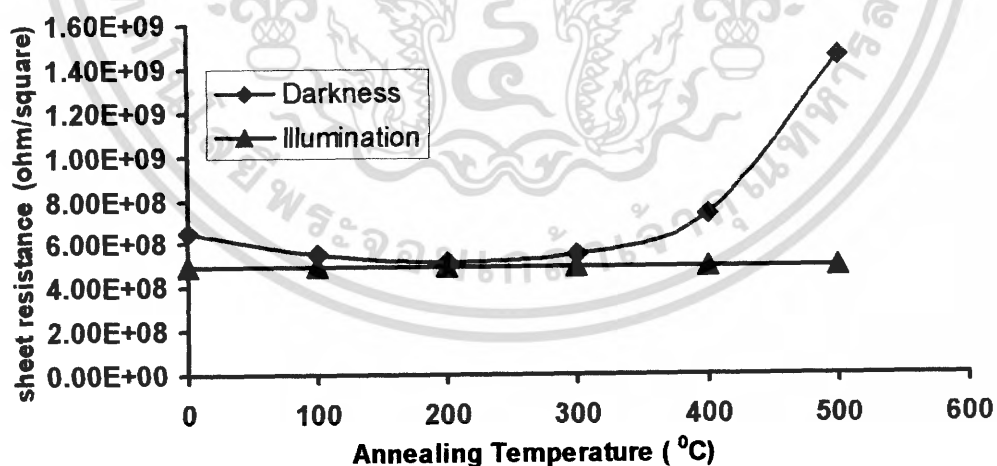
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS และ CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการออบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

Annealing Temperature (°C)	$R_s$ ( $\Omega$ /square)			
	CdS		CdS:(5%In)	
	Dark	Illuminated	Dark	Illuminated
As-deposited	$1.92 \times 10^5$	$1.39 \times 10^5$	$1.97 \times 10^5$	$1.25 \times 10^5$
100	$2.2 \times 10^5$	$1.57 \times 10^5$	$1.93 \times 10^5$	$1.79 \times 10^5$
200	$2.06 \times 10^5$	$1.01 \times 10^5$	$2.05 \times 10^5$	$8.73 \times 10^4$
300	$1.8 \times 10^5$	$8.54 \times 10^4$	$1.88 \times 10^5$	$5.26 \times 10^4$
400	$2 \times 10^5$	$1.98 \times 10^5$	$2.13 \times 10^5$	$1.9 \times 10^5$
500	$2.2 \times 10^5$	$2.05 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$1.82 \times 10^5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

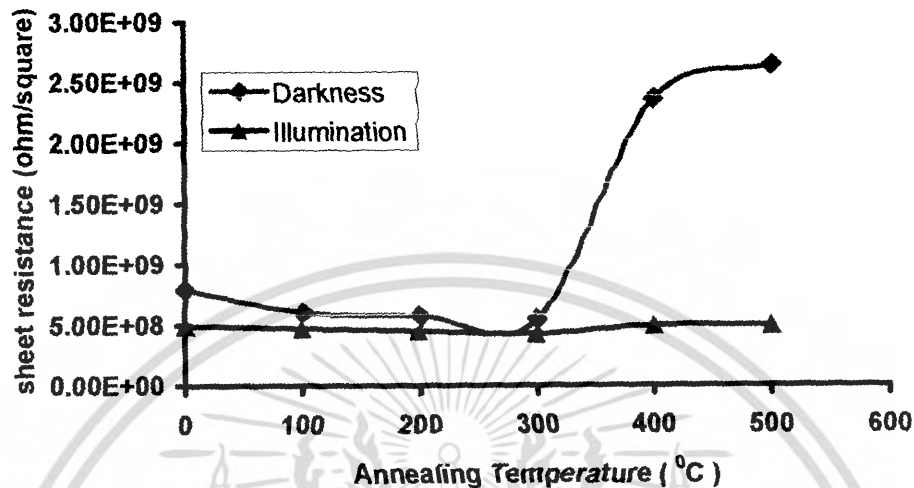
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS:(10%In) และ CdS:(15%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

Annealing Temperature (°C)	$R_s$ ( $\Omega$ /square)			
	CdS:(10% In)		CdS:(15% In)	
	Dark	Illuminated	Dark	Illuminated
As-deposited	$2.07 \times 10^5$	$1.66 \times 10^5$	$1.98 \times 10^5$	$1.94 \times 10^5$
100	$1.96 \times 10^5$	$1.85 \times 10^5$	$1.98 \times 10^5$	$1.82 \times 10^5$
200	$1.56 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$	$1.99 \times 10^5$	$1.58 \times 10^5$
300	$1.97 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$1.41 \times 10^5$
400	$1.96 \times 10^5$	$1.94 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$1.48 \times 10^5$
500	$1.97 \times 10^5$	$1.95 \times 10^5$	$1.97 \times 10^5$	$1.91 \times 10^5$



รูปที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณี ไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



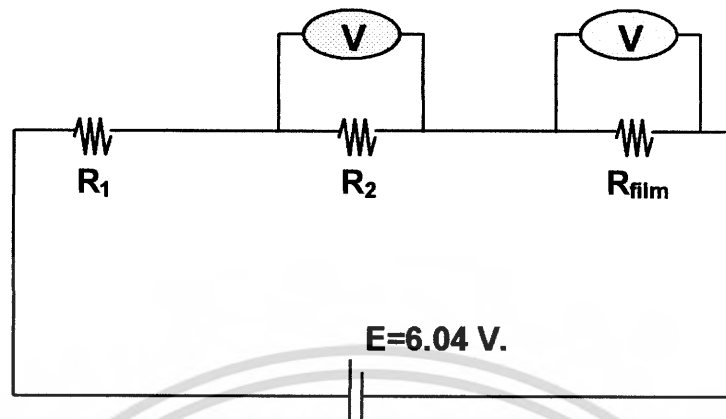
รูปที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนชนิด ELH

#### 4.5.2. ความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เนื่องจากการวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ต้องทำการวัดขณะที่ อุณหภูมิกำลังเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเป็นแบบแหล่งจ่ายกระแสคงที่ เพราะเพียงวัดความต่างศักย์คร่อมฟิล์มขณะนั้นก็จะทราบความต้านทานของฟิล์มจากความสัมพันธ์ของโอห์มกับอุณหภูมิ เตาเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มค่าให้สูงขึ้นในอัตรา 10 °C ต่อ 10 นาที และบันทึกความต่างศักย์คร่อมฟิล์มเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปทุกๆ 10 °C เช่นกัน เมื่อเสร็จสิ้นการวัดก็นำผลมาคำนวณหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำมาเขียนกราฟจะได้กราฟระหว่าง  $\frac{1000}{T}$  กับ

$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$  เมื่อ R และ  $R_0$  คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆและอุณหภูมิห้องตามลำดับ

ดังรูปที่ 4.69 ถึง 4.92



รูปที่ 4.68 แสดงวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานของฟิล์มบาง ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

โดยค่ากระแส (I) ที่วัดได้จากวงจรจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ค่าความต้านทานของฟิล์มบาง ( $R_{\text{film}}$ ) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันที่ตกคร่อมฟิล์มบาง (V) มีค่าเปลี่ยนไป แต่ส่วนใหญ่ค่าแรงดันที่ตกคร่อมฟิล์มบาง (V) จะลดลงเพราะว่าค่าความต้านทานของฟิล์มบาง ( $R_{\text{film}}$ ) จะลดลงอย่างรวดเร็ว

จากสมการความต้านทานในสารกึ่งตัวนำ

$$R = R_0 e^{\frac{E}{kT}} \quad (4.1)$$

$$\ln \frac{R}{R_0} = \frac{E_a}{kT} \quad (4.2)$$

$$\ln \frac{R}{R_0} = \left( \frac{E_a}{1000k} \right) \left( \frac{1000}{T} \right) \quad (4.3)$$

$$\text{slope} = \frac{E_a}{1000k} \quad (4.4)$$

จะได้ว่า

$$E_a = \left( \frac{(1000)(\text{slope})(1.38 \times 10^{-23})}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \text{ eV} \quad (4.5)$$

โดย  $R$  คือ ความต้านทาน ณ อุณหภูมิใดๆ

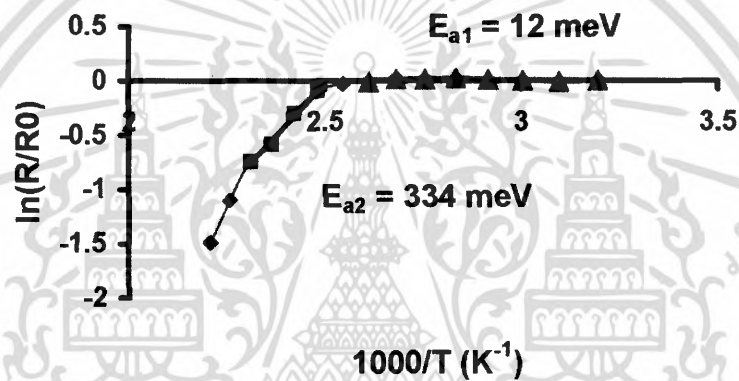
$R_0$  คือ ความต้านทาน ณ อุณหภูมิห้อง

$E_a$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

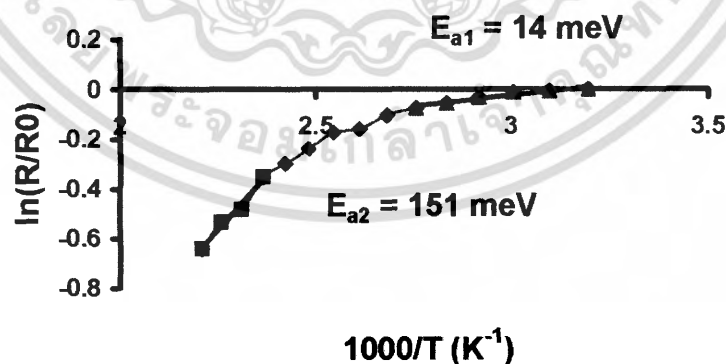
$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์ (Boltzmann constant =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน

ดังนั้นเมื่อนำสมการ (4.3) ไปเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(R/R_0)$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $E_a/k$  จึงทำให้สามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นได้จากวิธีการนี้

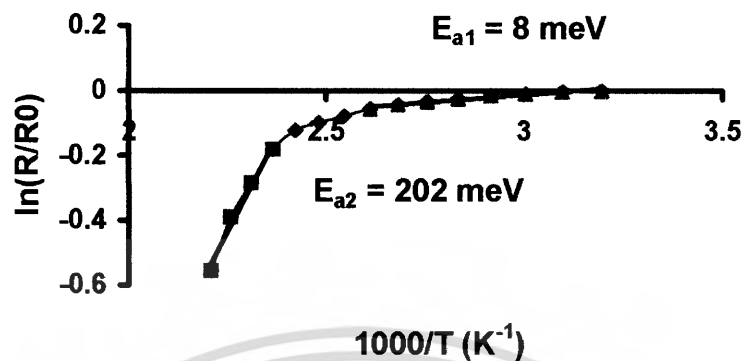


รูปที่ 4.69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

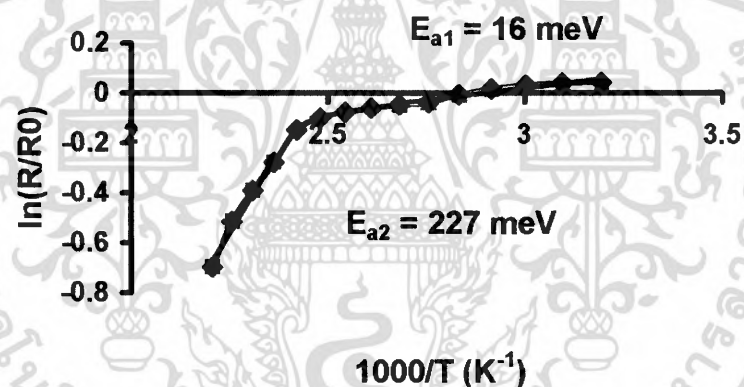


รูปที่ 4.70 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

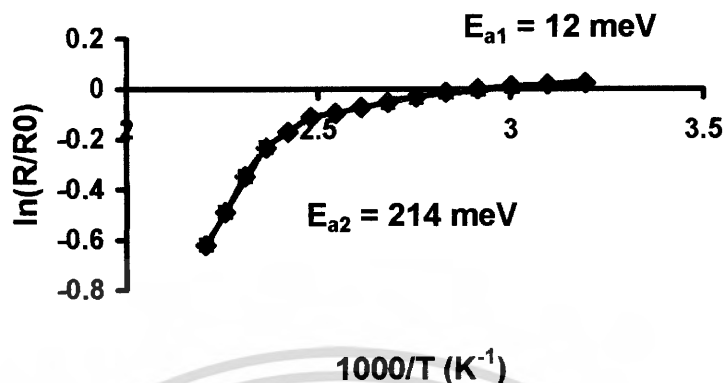
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



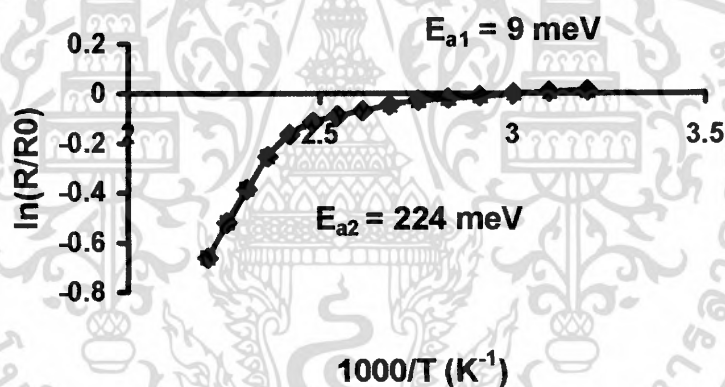
รูปที่ 4.71 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $200^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



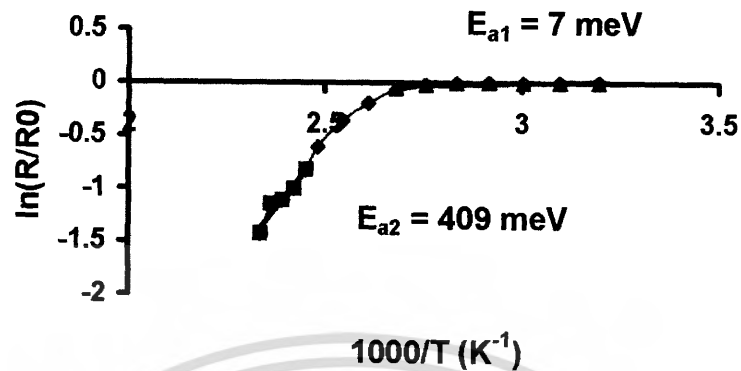
รูปที่ 4.72 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



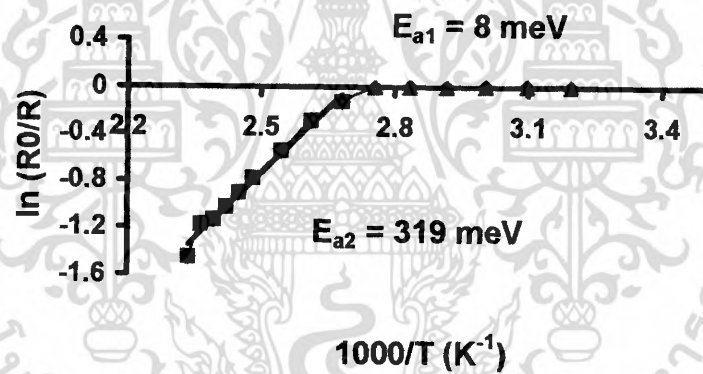
รูปที่ 4.73 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



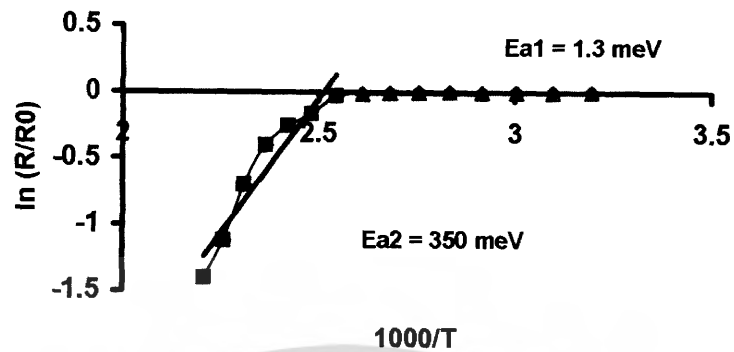
รูปที่ 4.74 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



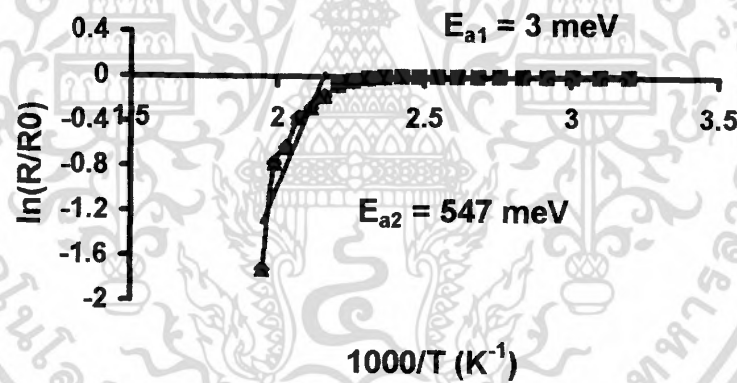
รูปที่ 4.75 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการออบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีก



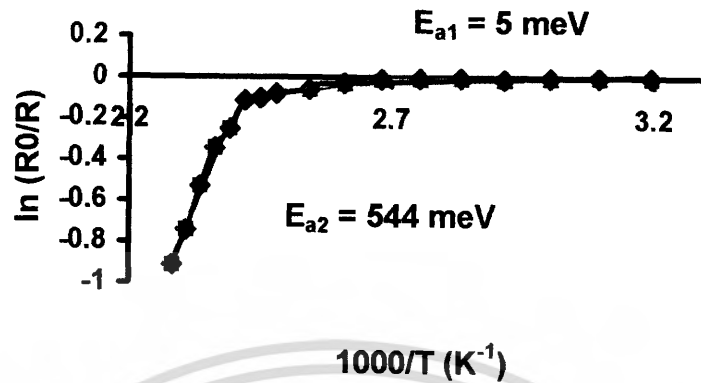
รูปที่ 4.76 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการออบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



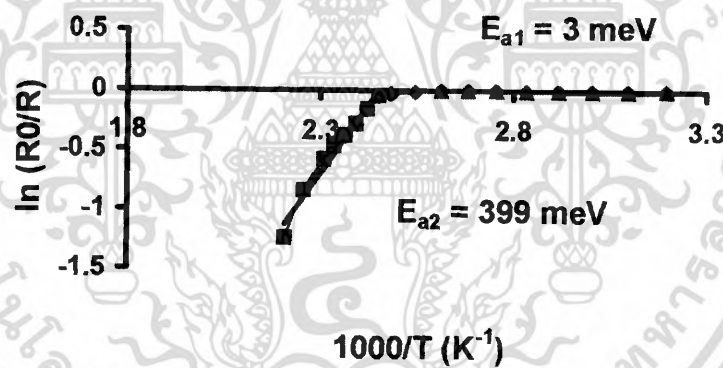
รูปที่ 4.77 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $200^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



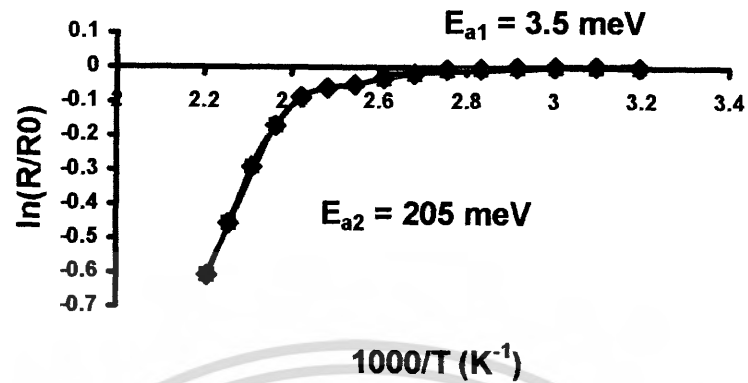
รูปที่ 4.78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



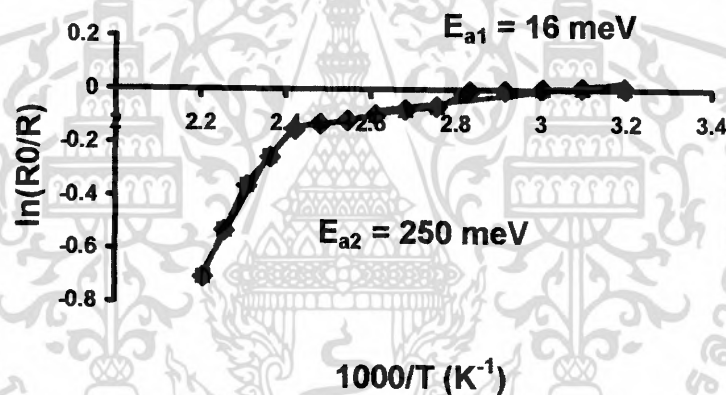
รูปที่ 4.79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



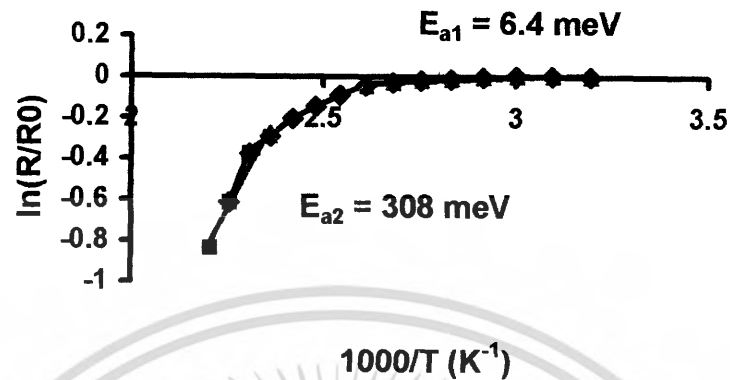
รูปที่ 4.80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500^\circ C$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



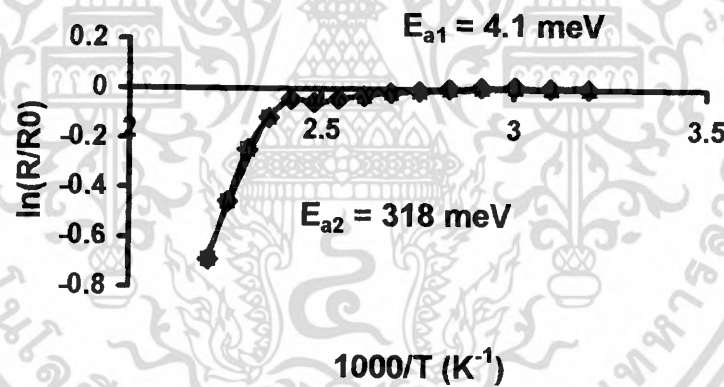
รูปที่ 4.81 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล



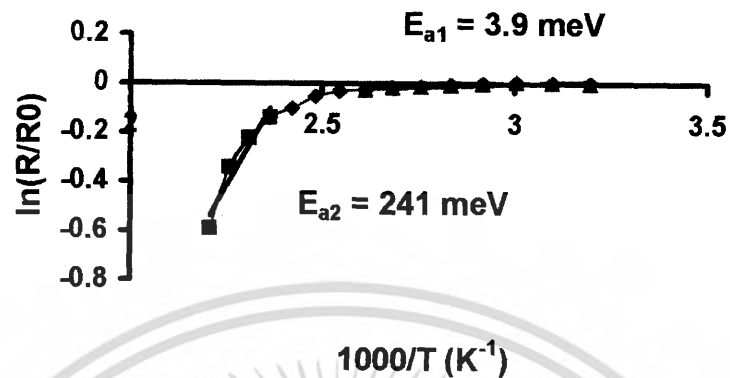
รูปที่ 4.82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



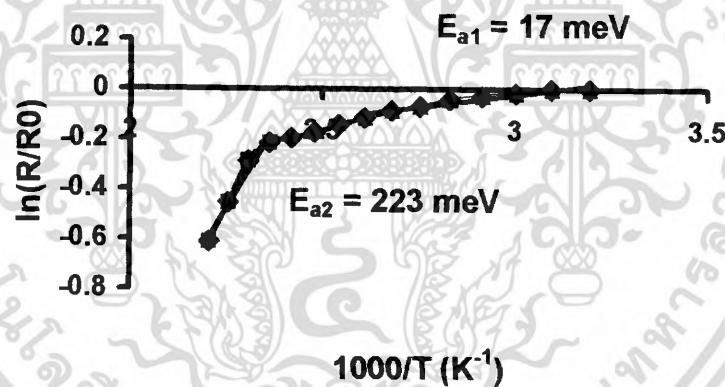
รูปที่ 4.83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



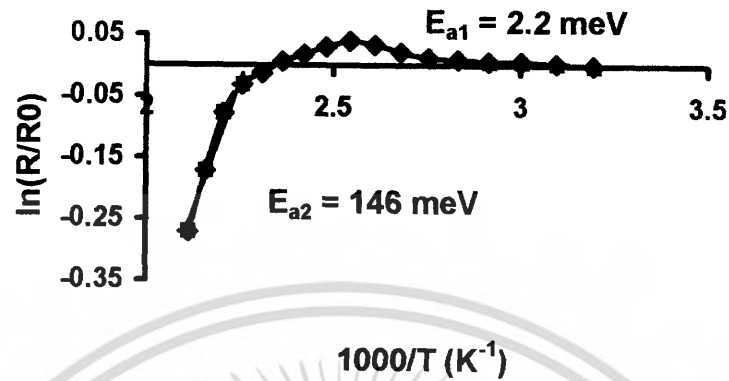
รูปที่ 4.84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



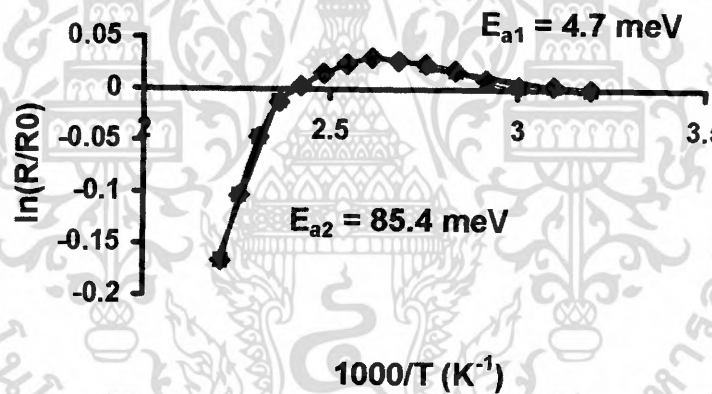
รูปที่ 4.85 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



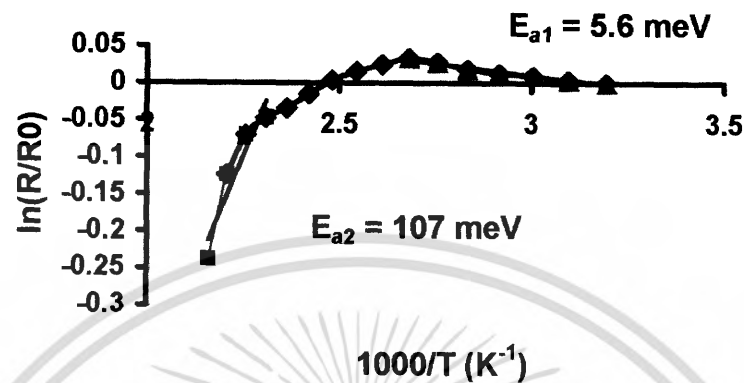
รูปที่ 4.86 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



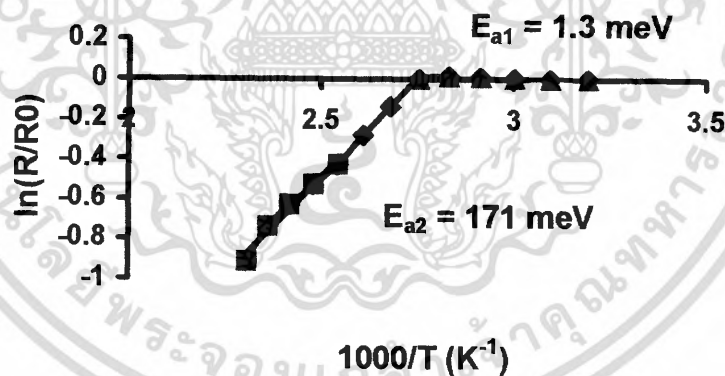
รูปที่ 4.87 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนัล



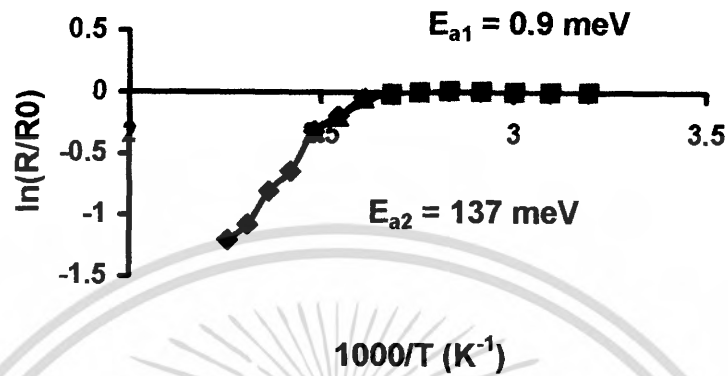
รูปที่ 4.88 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



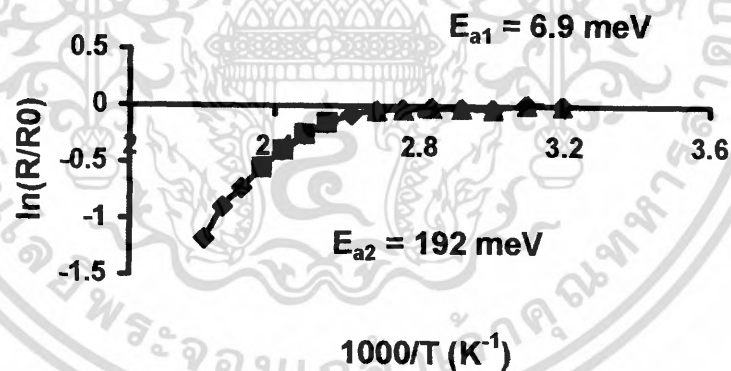
รูปที่ 4.89 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.90 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.91 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.92 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1000/T$  กับ  $\ln(R/R_0)$  ของฟิล์มบาง CdS:(5%In) ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  และ  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$  ปริมาณต่างๆที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

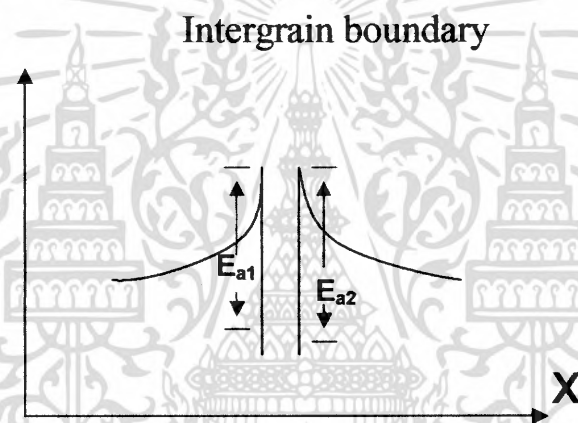
Annealing Temperature (°C)	ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{In}$			
	$\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$		$\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:(5\%\text{In})$	
	$E_{a1}$ (meV)	$E_{a2}$ (meV)	$E_{a1}$ (meV)	$E_{a2}$ (meV)
As-deposited	12	334	7	409
100	14	151	8	319
200	8	202	1.3	350
300	16	227	3	547
400	12	214	5	544
500	9	224	3	399

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdS และ CdS:(5%In) ปริมาณต่างๆที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

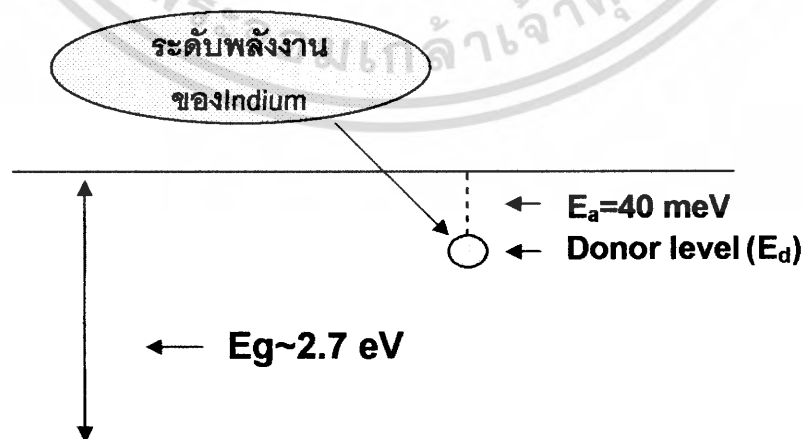
Annealing Temperature (°C)	ฟิล์มบาง CdS			
	CdS		CdS:(5%In)	
	$E_{a1}$ (meV)	$E_{a2}$ (meV)	$E_{a1}$ (meV)	$E_{a2}$ (meV)
As-deposited	3.5	205	2.2	146
100	16	250	4.7	85.4
200	6.4	308	5.6	107
300	4.1	318	1.3	171
400	3.9	241	0.9	137
500	17	223	6.9	192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานกระตุ้นที่วัดได้ทั้งสองค่านี้อาจเกิดจากระดับพลังงาน ที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างเกรน (intergrain boundary) โดยมีสองระดับพลังงานซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนนั้นถูกจับขังไว้เมื่อเคลื่อนมาที่บริเวณรอยต่อ ดังกล่าว หรือ อาจเกิดจากการเจือสารอินเดียมเข้าไป ทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ ดังนั้นเมื่อเรากระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนจึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้เหมือนเดิม และทำให้ปริมาณพาหะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานลดลงสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว



รูปที่ 4.93 ภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรนใน ฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอน โดยที่  $\phi$  คือความสูงของกำแพงศักย์และ  $x$  คือระยะทาง



รูปที่ 4.94 แสดงระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ ( $E_d$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(5\%In)$  ที่เตรียมโดยวิธีการออบละลายสารเคมี เมื่อยังไม่มีกรแอนนิตจะแสดงโครงสร้างเป็นแบบคิวบิกและเมื่อนำฟิล์มบางไปแอนนิต พบว่าจะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล เมื่อแอนนิตที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสสังเกตได้จากมีระนาบการเลี้ยวเบน (1 0 0), (0 0 2) และ (1 0 1) ส่วนฟิล์มบาง  $CdS:(5\%In)$  ที่เตรียมด้วยวิธีการออบละลายสารเคมี เมื่อยังไม่มีกรแอนนิตจะแสดงโครงสร้างเป็นแบบคิวบิกและเมื่อนำฟิล์มบางไปแอนนิตที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสพบว่าโครงสร้างยังไม่มีกรเปลี่ยนแปลง อาจเป็นเพราะว่า In ที่เจือลงไป มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง อาจจะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 500 องศาเซลเซียสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลและจากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะรู้ FWHM และ  $2\theta$  ที่พีคเด่นชัดมาคำนวณค่าคงที่โครงสร้างและขนาดของเกรนได้ โดยค่าคงที่โครงสร้างนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการแอนนิตที่อุณหภูมิมากขึ้นและขนาดของเกรนก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนิตที่เพิ่มขึ้นด้วย

จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  พบว่าขนาดของเกรนมีค่าลดลงเมื่อทำการเจือ In แต่ทำให้ความหนาแน่นของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ที่เตรียมได้ พบว่าเมื่อมีการแอนนิตที่อุณหภูมิสูงขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มีค่ามากขึ้น เมื่อพิจารณาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$  และ  $CdS$  ที่ยังไม่ได้ทำการแอนนิต พบว่าขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นค่าน้อยเมื่อทำการเจือ In

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า สำหรับความต้านทานของฟิล์มบาง  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:In$  เมื่อแอนนิตที่อุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส จะมีค่าต่ำสุดประมาณ  $5.13 \times 10^8 \Omega/\text{square}$  พลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่วัดได้จากอุณหภูมิในช่วง 20-150 องศาเซลเซียส พลังงานกระตุ้นเหล่านี้เกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น ความสูงของกำแพงศักย์ของเกรนผลึก สถานะพลังงานของกับดักที่ปรากฏในบริเวณขอบของเกรนหรือข้อบกพร่องอันเกิดจากปริมาณของอะตอมในผลึกแตกต่างกันไปจากสโตยลอคยอิโอเมตรี เป็นต้น

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีพบปัญหาและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ได้ผลออกมาดีที่สุด

ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- คุณภาพของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับ การกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ด้วยกรดกัดแก้ว (HF) เจือจาง ดังนั้นเวลากัดผิวหน้าต้องระวังไม่ให้กระจกซ้อนทับกัน มิฉะนั้นกระจกจะถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น
- ในการเตรียมเม็ดสาร ถ้าเตรียมทิ้งไว้นานจะเกิดความร้อนภายในเม็ดสารส่งผลให้เวลาทำการอบสารละลายเคมีสารอาจจะเกาะติดกระจกสไลด์ไม่ดีเท่าที่ควร
- เมื่อทำการอบสารละลายเคมีเสร็จในแต่ละรอบ ควรล้างบีกเกอร์ที่ทำการทดลองด้วยกรด HCL ทุกครั้ง เพื่อจะได้ไม่มีสารเก่าปนในการทำการเตรียมฟิล์มครั้งต่อไป
- ควรรักษาความเร็วของแมกเนติกสติกเลอรัให้มีการหมุนที่ช้าสม่ำเสมอและควรควบคุมอุณหภูมิในขณะเตสารตั้งต้นและตลอดการทดลองให้อยู่ระหว่าง 75-80 องศาเซลเซียส

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Lee, J.h., Lee, H. Y, Kim, J.H. and Park, Y.K. 2000 Heat Treatment of Boron-Doped CdS Films Prepare by Chemical Bath Deposition for Solar Cell Application. Jpn. J. Appl. Phys. 39:1669-1674
- [2] Lee, J.H., Yi, J.S., Yang, K.J, Park, J.H. and Oh, R.D. 2003 Electrical and Optical Properties of Boron Doped CdS Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition. Thin Solid Films 431-432:344-348
- [3] Lee, J.H., Song, We., Yi, J.S., Yang, K.J., Han, W.D. and Hwang, J. 2003 Growth and Properties of The  $Cd_{1-x}Zn_xS$  Thin Films for Solar Cell Applition 431-432:349-357
- [4] Oumous, H. and Hadiri, H. 2001 Optical and Electrical Properties of Annealed CdS Thin Films bptian from a Chemical Solution. Thin Solid Films 386
- [5] จิตินัย แก้วแดง งามนิศย์ แก้วแดง ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ 2546 การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] งามนิศย์ แก้วแดง จิตินัย แก้วแดง ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ 2543 การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] วีระชัย ถิภา 2546 การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมีวิทยานิพนธ์ ปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] Agnihotiri, O.P. and Gupta, B.K. 1979  $Cd_{1-x}Zn_xS$  Films for Low Cost Solar Cell. Jpn. J. Appl. Phys. 18(2):317-320
- [9] เลอพงษ์ รักรธรรม และอภิรัตน์ มีมุขอ 2547 การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] Runya, W.R. Semiconductor Measurement and Instrumentation .3<sup>rd</sup> Ed. New York: Mc Graw-Hill, Bombay, 1975
- [11] Dona, J.M., Herrero, J., "Chemical Bath Co-deposited CdS-ZnS Films Characterization", Thin Solid Films., vol.268, 1995. Pp.5-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Dona, J.M., Herrero, J., "Process and Characterization of Chemicalbath-deposited ZnS Thin Films" ,J. Electronchem.Soc.,vo1141(1),1994.Pp.205210
- [13] Dieter K.Schroder. Semiconductor Material and Characterization,2<sup>nd</sup> Ed. Newyork:John Wiley & Sons Inc.,1998



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ก**

**ข้อมูลมาตรฐานเกี่ยวกับ CdZnS**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ข้อมูลมาตรฐานเกี่ยวกับ CdZnS

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CdZnS ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน

JCPDS(The Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

Pattern : 49-1302		Radiation = 1.540598		Quality : High		
(Cd <sub>0.8</sub> Zn <sub>0.2</sub> )S		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		24.836	89	1	0	0
		26.527	48	0	0	2
		28.204	100	1	0	1
		36.649	27	1	0	2
		43.736	45	1	1	0
		47.870	39	1	0	3
		50.929	8	2	0	0
		51.873	31	1	1	2
		52.854	19	2	0	1
		54.026	3	0	0	4
		56.300	3	2	0	2
		60.861	2	1	0	4
		68.839	10	2	0	3
		69.325	4	2	1	0
		70.932	7	2	1	1
		72.442	4	1	1	4
		75.529	6	1	0	5
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.13750 c = 6.71580 Z = 2		Mol. weight = 136.06 Volume [CD] = 98.58 D <sub>x</sub> = 4.905				
SAMPLE PREPARATION : Cd Cl <sub>2</sub> , Zn Cl <sub>2</sub> and thiourea were mixed in an alkaline solution, which was heated to 85 C and stirred for 30 minutes. The precipitate was filtered, dried, ground and heated at 300 C for 2 hours under nitrogen, then 800 C for 2 hours under nitrogen. UNIT CELL DATA : Reference reports: a=4.14, c=6.716. GENERAL COMMENTS : Cell parameters generated by least squares refinement.						
Pattern : 40-836		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
Cd <sub>0.725</sub> Zn <sub>0.277</sub> S <sub>10</sub>		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		25.502	51	1	0	0
		27.061	100	0	0	2
		28.776	43	1	0	1
		37.442	5	1	0	2
		44.633	61	1	1	0
		48.802	10	1	0	3
		52.230	2	2	0	0
		55.686	4	0	0	4
		120.554	2	3	1	3
		148.985	2	3	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.04200 c = 6.58900 Z = 0		Mol. weight = 1314.43 Volume [CD] = 93.21 D <sub>x</sub> = 4.683				
COLOR : Yellow GENERAL COMMENTS : Pigment. SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C. GENERAL COMMENTS : 27.7 mole % ZnS. GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: a=4.131-0.00134 P; s=0.003, c=6.713-0.00468 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 40-835

Radiation = 1.540598

Quality : Not indexed

Cd <sub>0.05</sub> Zn <sub>1.95</sub> S <sub>10</sub>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>I</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>25.208</td><td>89</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>26.914</td><td>90</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>28.587</td><td>100</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>37.281</td><td>18</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>44.370</td><td>76</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>48.624</td><td>36</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>51.847</td><td>10</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>55.404</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>118.784</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>146.514</td><td>3</td><td>3</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>147.575</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>156.350</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>5</td></tr> </tbody> </table>					2θ	I	h	k	l	25.208	89	1	0	0	26.914	90	0	0	2	28.587	100	1	0	1	37.281	18	1	0	2	44.370	76	1	1	0	48.624	36	1	0	3	51.847	10	2	0	0	55.404	3	0	0	4	118.784	3	3	1	3	146.514	3	3	0	6	147.575	2	3	2	1	156.350	3	3	1	5
2θ	I	h	k	l																																																																			
25.208	89	1	0	0																																																																			
26.914	90	0	0	2																																																																			
28.587	100	1	0	1																																																																			
37.281	18	1	0	2																																																																			
44.370	76	1	1	0																																																																			
48.624	36	1	0	3																																																																			
51.847	10	2	0	0																																																																			
55.404	3	0	0	4																																																																			
118.784	3	3	1	3																																																																			
146.514	3	3	0	6																																																																			
147.575	2	3	2	1																																																																			
156.350	3	3	1	5																																																																			
Cadmium Zinc Sulfide																																																																							
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.06900 c = 6.62100 Z = 0		Mol. weight = 1352.99 Volume [CD] = 94.94 Dx = 4.733																																																																					

COLOR : Yellow  
 GENERAL COMMENTS : Pigment.  
 SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C.  
 GENERAL COMMENTS : 19.5 mole % ZnS.  
 GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: s=4.131-0.001314 P; s=0.003, c=6.173-0.00458 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.

Pattern : 24-1137

Radiation = 1.540598

Quality : Deleted

Zn <sub>0.9</sub> Cd <sub>0.1</sub> S		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>I</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>28.466</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>32.952</td><td>10</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>47.280</td><td>50</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>56.103</td><td>30</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>58.806</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>69.115</td><td>5</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>76.372</td><td>10</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>78.690</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>87.989</td><td>10</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>94.855</td><td>6</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>106.559</td><td>3</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>113.900</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>					2θ	I	h	k	l	28.466	100	1	1	1	32.952	10	2	0	0	47.280	50	2	2	0	56.103	30	3	1	1	58.806	2	2	2	2	69.115	5	4	0	0	76.372	10	3	3	1	78.690	2	4	2	0	87.989	10	4	2	2	94.855	6	5	1	1	106.559	3	4	4	0	113.900	5	5	3	1
2θ	I	h	k	l																																																																			
28.466	100	1	1	1																																																																			
32.952	10	2	0	0																																																																			
47.280	50	2	2	0																																																																			
56.103	30	3	1	1																																																																			
58.806	2	2	2	2																																																																			
69.115	5	4	0	0																																																																			
76.372	10	3	3	1																																																																			
78.690	2	4	2	0																																																																			
87.989	10	4	2	2																																																																			
94.855	6	5	1	1																																																																			
106.559	3	4	4	0																																																																			
113.900	5	5	3	1																																																																			
Sphalerite, cadmian, syn / Zinc Cadmium Sulfide																																																																							
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216) a = 5.43400 Z = 4		Mol. weight = 102.14 Volume [CD] = 100.46 Dx = 4.228 Vcor = 6.40																																																																					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 5-566		Radiation = 1.540598		Quality : Indexed		
Zn S		2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Sphalerite, syn / Zinc Sulfide blende zinc blende		26.559	100	1	1	1
		33.090	10	2	0	0
		47.516	51	2	2	0
		56.290	30	3	1	1
		59.137	2	2	2	2
		69.524	6	4	0	0
		76.809	9	3	3	1
		79.157	2	4	2	0
		86.562	9	4	2	2
		95.541	5	5	1	1
		107.415	3	4	4	0
		114.909	5	5	3	1
		128.616	3	6	2	0
		138.255	2	5	3	3
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216) a = 5.40600 Z = 4		Mol. weight = 87.44 Volume [CD] = 157.99 Dx = 4.097 Dm = 3.900 Micor = 3.90				
SAMPLE PREPARATION : Prepared at 940 C by RCA Laboratory. ANALYSIS : Spectroscopic analysis: <0.1% Cu; <0.01% B, Fe, Mg, Si; <0.001% Al, Ca. TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 26 C. GENERAL COMMENTS : See 24-1137 for cadmium substitution. GENERAL COMMENTS : Opaque mineral optical data on specimen from Snailsbeach, Ministry, Stropshire, England: RR2R=16.7, Disp.=16, VHN100=216-227, Color values .303, .308, 16.6, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. GENERAL COMMENTS : Measured density and color from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., I 211. COLOR : White, yellow white						
Pattern : 24-1136		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Zn <sub>10.9</sub> Cd <sub>0.1</sub> S		2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Wurtzite, cadman, syn / Zinc Cadmium Sulfide		26.832	100	1	0	0
		28.383	65	0	0	2
		30.389	100	1	0	1
		39.402	40	1	0	2
		47.290	70	1	1	0
		51.602	65	1	0	3
		55.187	10	2	0	0
		56.066	45	1	1	2
		57.246	15	2	0	1
		58.683	1	0	0	4
		63.204	8	2	0	2
		65.051	1	1	0	4
		72.481	20	2	0	3
		75.586	8	2	1	0
		77.326	10	2	1	1
		78.613	2	1	1	4
		81.757	14	1	0	5
		82.524	6	2	1	2
		87.089	8	3	0	0
		91.215	18	2	1	3
		94.618	2	0	0	6
		94.855	8	3	0	2
		100.348	8	2	0	5
		100.900	4	1	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 3.84110 c = 6.28700 Z = 2		Mol. weight = 102.14 Volume [CD] = 80.33 Dx = 4.223 Micor = 2.90				
GENERAL COMMENTS : (002) may be observed as the strongest reflection due to preferred orientation.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 36-1450      Radiation = 1.540588      Quality : High

Zn S		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th><i>l</i></th> <th><i>h</i></th> <th><i>k</i></th> <th><i>l</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>26.915</td><td>100</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>28.501</td><td>84</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>30.528</td><td>87</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>39.611</td><td>28</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>47.562</td><td>81</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>51.777</td><td>54</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>55.501</td><td>11</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>56.393</td><td>47</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>57.561</td><td>12</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>59.006</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>63.559</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>66.003</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>72.932</td><td>15</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>76.038</td><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>77.822</td><td>9</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>79.054</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>82.299</td><td>11</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>83.097</td><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>88.583</td><td>9</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>91.799</td><td>15</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>95.235</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>8</td></tr> <tr><td>95.543</td><td>10</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>101.013</td><td>7</td><td>2</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>101.507</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>107.485</td><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>114.139</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>114.601</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>8</td></tr> <tr><td>114.980</td><td>6</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>116.002</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>117.413</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>121.069</td><td>8</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>122.001</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> </tbody> </table>					2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	26.915	100	1	0	0	28.501	84	0	0	2	30.528	87	1	0	1	39.611	28	1	0	2	47.562	81	1	1	0	51.777	54	1	0	3	55.501	11	2	0	0	56.393	47	1	1	2	57.561	12	2	0	1	59.006	2	0	0	4	63.559	6	2	0	2	66.003	1	1	0	4	72.932	15	2	0	3	76.038	6	2	1	0	77.822	9	2	1	1	79.054	2	1	1	4	82.299	11	1	0	5	83.097	6	2	1	2	88.583	9	3	0	0	91.799	15	2	1	3	95.235	3	0	0	8	95.543	10	3	0	2	101.013	7	2	0	5	101.507	2	1	0	6	107.485	5	2	2	0	114.139	2	3	1	0	114.601	5	1	1	8	114.980	6	2	2	2	116.002	2	3	1	1	117.413	1	3	0	4	121.069	8	2	1	5	122.001	3	3	1	2
2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>																																																																																																																																																																							
26.915	100	1	0	0																																																																																																																																																																							
28.501	84	0	0	2																																																																																																																																																																							
30.528	87	1	0	1																																																																																																																																																																							
39.611	28	1	0	2																																																																																																																																																																							
47.562	81	1	1	0																																																																																																																																																																							
51.777	54	1	0	3																																																																																																																																																																							
55.501	11	2	0	0																																																																																																																																																																							
56.393	47	1	1	2																																																																																																																																																																							
57.561	12	2	0	1																																																																																																																																																																							
59.006	2	0	0	4																																																																																																																																																																							
63.559	6	2	0	2																																																																																																																																																																							
66.003	1	1	0	4																																																																																																																																																																							
72.932	15	2	0	3																																																																																																																																																																							
76.038	6	2	1	0																																																																																																																																																																							
77.822	9	2	1	1																																																																																																																																																																							
79.054	2	1	1	4																																																																																																																																																																							
82.299	11	1	0	5																																																																																																																																																																							
83.097	6	2	1	2																																																																																																																																																																							
88.583	9	3	0	0																																																																																																																																																																							
91.799	15	2	1	3																																																																																																																																																																							
95.235	3	0	0	8																																																																																																																																																																							
95.543	10	3	0	2																																																																																																																																																																							
101.013	7	2	0	5																																																																																																																																																																							
101.507	2	1	0	6																																																																																																																																																																							
107.485	5	2	2	0																																																																																																																																																																							
114.139	2	3	1	0																																																																																																																																																																							
114.601	5	1	1	8																																																																																																																																																																							
114.980	6	2	2	2																																																																																																																																																																							
116.002	2	3	1	1																																																																																																																																																																							
117.413	1	3	0	4																																																																																																																																																																							
121.069	8	2	1	5																																																																																																																																																																							
122.001	3	3	1	2																																																																																																																																																																							
Wurtzite-2H, syn / Zinc Sulfide																																																																																																																																																																											
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186)	Mol. weight = 97.44 Volume [CD] = 79.12 D <sub>x</sub> = 4.090 D <sub>m</sub> = 4.090																																																																																																																																																																										
a = 3.82096 c = 6.25730 Z = 2																																																																																																																																																																											
SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Prepared by RCA Labs. ANALYSIS : Previous spectrographic analysis at NBS, Gaithersburg, MD, USA, showed (wt.%) : 0.01 to 0.1 Cu; 0.001 to 0.01 each B, Fe, Mg, Si and <0.001 each Al and Ca. POLYMORPHISM : A cubic form, sphalerite, also exists. ZnS exists in many polytypic forms (1,2). TEMP. OF DATA COLLECTION : The mean temperature of data collection was 25.5. ADDITIONAL PATTERN : To replace 5-492 (3) and 10-434 (4). GENERAL COMMENTS : Other patterns are cited in (3). OPTICAL DATA : B=2.365, C=2.378, Sign=+ GENERAL COMMENTS : Optical data on synthetic material. COLOR : Colorless																																																																																																																																																																											

Pattern : 75-1534      Radiation = 1.540586      Quality : Calculated

Zn S		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th><i>l</i></th> <th><i>h</i></th> <th><i>k</i></th> <th><i>l</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>27.074</td><td>100</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>28.634</td><td>62</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>30.701</td><td>95</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>39.614</td><td>32</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>47.835</td><td>60</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>52.030</td><td>58</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>55.827</td><td>9</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>56.704</td><td>36</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>57.919</td><td>11</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>59.263</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>63.835</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>66.346</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>73.351</td><td>15</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>76.529</td><td>10</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>78.323</td><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>79.510</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>82.760</td><td>9</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>83.647</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>85.844</td><td>&lt;1</td><td>2</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>89.209</td><td>6</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>					2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	27.074	100	1	0	0	28.634	62	0	0	2	30.701	95	1	0	1	39.614	32	1	0	2	47.835	60	1	1	0	52.030	58	1	0	3	55.827	9	2	0	0	56.704	36	1	1	2	57.919	11	2	0	1	59.263	1	0	0	4	63.835	6	2	0	2	66.346	1	1	0	4	73.351	15	2	0	3	76.529	10	2	1	0	78.323	6	2	1	1	79.510	2	1	1	4	82.760	9	1	0	5	83.647	4	2	1	2	85.844	<1	2	0	4	89.209	6	3	0	0
2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>																																																																																																											
27.074	100	1	0	0																																																																																																											
28.634	62	0	0	2																																																																																																											
30.701	95	1	0	1																																																																																																											
39.614	32	1	0	2																																																																																																											
47.835	60	1	1	0																																																																																																											
52.030	58	1	0	3																																																																																																											
55.827	9	2	0	0																																																																																																											
56.704	36	1	1	2																																																																																																											
57.919	11	2	0	1																																																																																																											
59.263	1	0	0	4																																																																																																											
63.835	6	2	0	2																																																																																																											
66.346	1	1	0	4																																																																																																											
73.351	15	2	0	3																																																																																																											
76.529	10	2	1	0																																																																																																											
78.323	6	2	1	1																																																																																																											
79.510	2	1	1	4																																																																																																											
82.760	9	1	0	5																																																																																																											
83.647	4	2	1	2																																																																																																											
85.844	<1	2	0	4																																																																																																											
89.209	6	3	0	0																																																																																																											
Wurtzite / Zinc Sulfide																																																																																																															
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186)	Mol. weight = 97.44 Volume [CD] = 77.91 D <sub>x</sub> = 4.154 D <sub>m</sub> = 4.050 D <sub>cor</sub> = 3.40																																																																																																														
a = 3.80060 c = 6.23000 Z = 2																																																																																																															
ICSD COLLECTION CODE : 031061 REMARKS FROM ICSD : PICT. TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing. SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Pribram.																																																																																																															

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cd

Cadmium

General | Comments | Authors | Additional | Subfiles |

Cell Parameters

Latt.:	Hexagonal	Molecular weight :	112.41
S.G. :	P63/mmc (194)	Volume [CD] :	42.54
a:	2.960 alpha:	Dx :	8.777
b:	beta:	Dm :	8.740
c:	5.6058 gamma:		
A:	Z:	2	
C:	I/Cor:		

: 1.5406

2th	l	h	k	i	Comments
32.054	33	0	0	2	
34.882	17	1	0	0	
38.610	100	1	0	1	Strongest line.
48.104	20	1	0	2	
61.345	17	1	0	3	
62.728	13	1	1	0	
66.763	2	0	0	4	
72.033	17	1	1	2	
76.084	10	2	0	1	
78.306	2	1	0	4	
86.907	3				
93.221	3	2	0	3	
98.085	3	1	1	4	
99.401	3				
108.357	7	2	0	4	
115.662	2	2	1	2	
127.196	5	2	1	3	
132.990	2	2	0	5	
139.899	2	3	0	2	
	2	1	0	7	
	3	3	0	4	
	2	2	2	2	
	2	3	1	0	

Zn

Zinc

General | Comments | Authors | Additional | Subfiles |

Cell Parameters

Latt.:	Hexagonal	Molecular weight :	65.38
S.G. :	P63/mmc (194)	Volume [CD] :	30.66
a:	2.670 alpha:	Dx :	7.082
b:	beta:	Dm :	7.040
c:	4.966 gamma:		
A:	Z:	2	
C:	I/Cor:		

: 1.5406

d (Å)	l	h	k	i	Comments
2.47000	30	0	0	2	
2.29000	10	1	0	0	
2.08000	100	1	0	1	Strongest line.
1.68000	20	1	0	2	
1.34000	100	1	1	0	Strongest line.
1.33000	100				Strongest line.
1.24000	5	0	0	4	
1.17000	70	1	1	2	
1.15000	5	2	0	0	
1.12000	40	2	0	1	
1.09000	5	1	0	4	
1.04000	10	2	0	2	
0.95000	30	2	0	3	
0.91000	20	1	1	4	
0.86000	30	2	1	1	
0.83000	10	0	0	6	
0.77000	20	3	0	0	
0.76000	10	3	0	1	
0.74000	20	3	0	2	
0.72000	5	2	1	4	
0.70000	5	3	0	3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

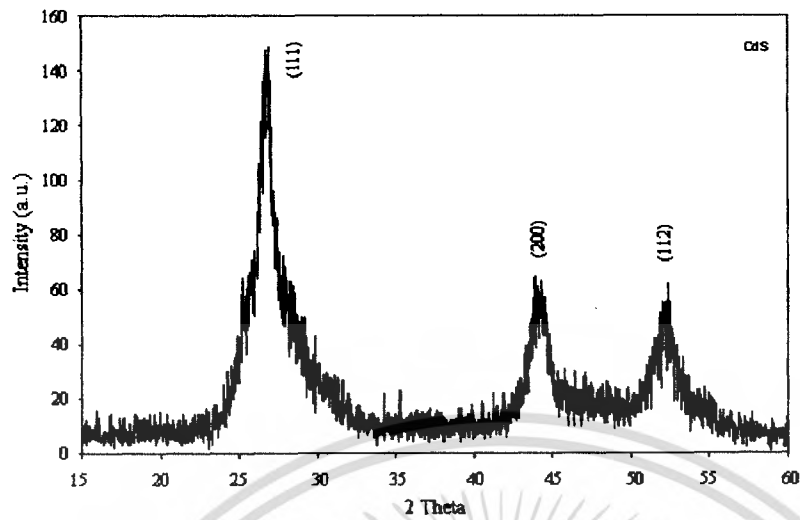
S		: 1.5406						
Sulfur		2 $\theta$	$\lambda$	l	h	k	l	Comments
		16.402		60	1	1	0	
		22.842		100	1	0	1	Strongest line.
		28.587		80	3	0	0	
		33.027		100	2	2	0	Strongest line.
		40.790		40	1	3	1	
		43.473		20	0	1	2	
		44.693		80	4	1	0	
		46.662		40	2	0	2	
		47.411		80	3	2	1	
		49.961		80	1	2	2	
		53.245		40	0	5	1	
		55.770		80	3	1	2	
		56.328		60	2	4	1	
		59.221		80	6	0	0	
		61.255		40	2	3	2	
		61.936		80	5	2	0	
		69.465		60	4	4	0	
		71.278		20	1	5	2	
		73.000		40	3	0	3	
		74.336		60	3	5	1	
		75.445		60	2	2	3	
		76.228		40	3	4	2	
		76.956		10	7	1	0	
		81.007		20	6	1	2	
		82.524		20	4	1	3	
		85.668		40	0	7	2	
		87.889		40	2	6	2	
		93.106		60	1	0	4	
		96.562		40	5	2	3	
		97.443		60	7	3	1	

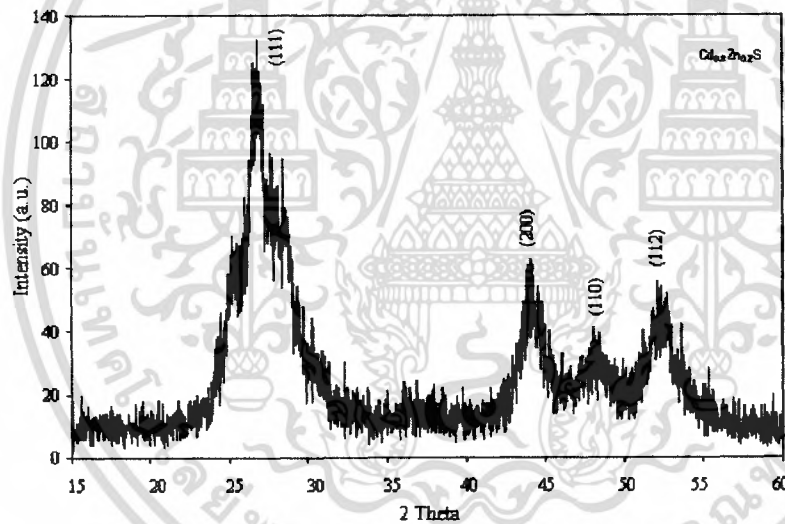
General	Comments	Authors	Additional	Subfiles
Cell Parameters				
Latt.:	Rhombohedral			
S.G.:	R-3 [148]			
a:	10.817	alpha:		
b:		beta:		
c:	4.272	gamma:		
A:		Z:	18	
C:		I/Accr:		
Crystal Data				
Molecular weight:	32.06			
Volume [CO]:	432.89			
Dx:	2.214			
Dm:				

37 line(s).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

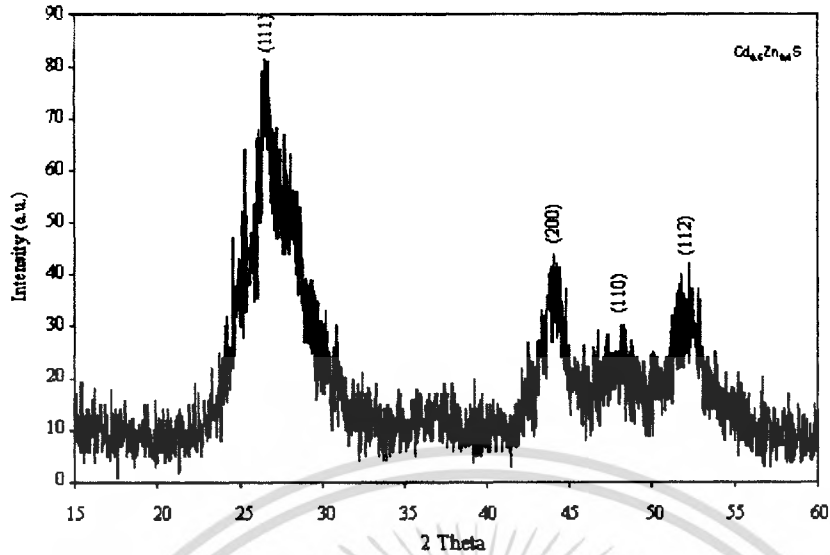


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์(ผง)ของ CdS ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี

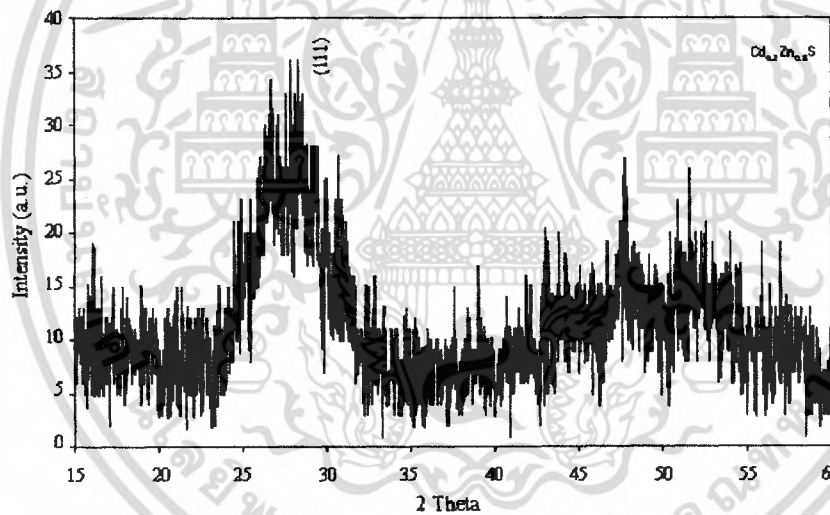


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์(ผง)ของ  $Cd_{0.8}Zn_{0.2}S$  ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

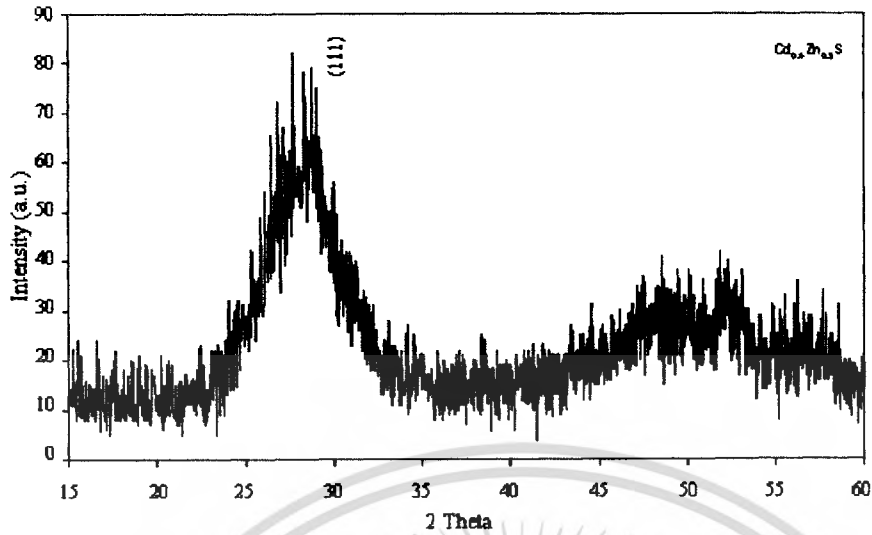


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์(ผง)ของ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี

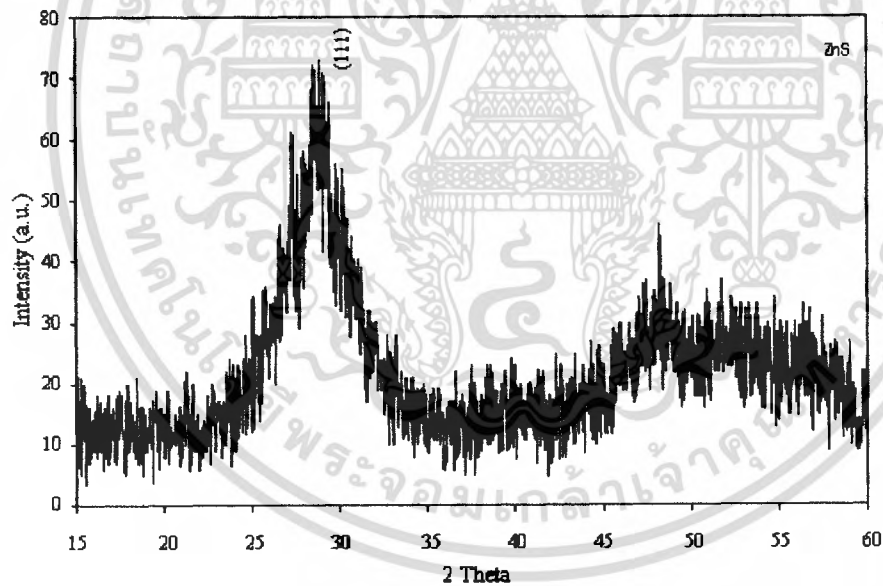


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์(ผง)ของ $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$  ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์(ผง)ของ  $\text{Cd}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{S}$  ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีอบสารละลายเคมี



แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์(ผง)ของ  $\text{ZnS}$  ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีอบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายธนวรรณ ศรีอรันต์ เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน พ.ศ.2527 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545

นายเอกณพ ศรีสุขสมวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2527 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนเบญจมราชานุสรณ์ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545

นายเอกถักษณ์ ธรรม์ชวงค์ เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ.2525 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้