

การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$



เลขหม.....
เลขทะเบียน 47293
วัน, เดือน, ปี 27 ส.ย. 2545

b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photoluminescence of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ Thin Films



Ms.Praphaphan Sangsod

Ms.Ruethai

Trungkavashirakun

Mr.Wittaya

Sutthathikulchai

**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

2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

นักศึกษา นางสาวประภาพรณ ตั้งข์โสค
นางสาวฤทัย คริ่งควชรกุล
นายวิทยา สุทธาธิกุลชัย

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ แก้วแดง
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
รศ.ดร.ทิพัรัตน์ วงษ์เจริญ
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.อนุพงศ์ สรวงประภา	
กรรมการ	รศ.งามนิตย์ แก้วแดง	
กรรมการ	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ	ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ	


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขิต์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$		
นักศึกษา	นางสาว ประภาพรณ	สังข์ไสค	รหัสประจำตัว 42050255
	นางสาว ฤทัย	ตรังควชิรกุล	รหัสประจำตัว 42050270
	นาย วิทยา	สุทธาธิกุลชัย	รหัสประจำตัว 42050275
ภาควิชา	ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์		
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์		
ปีการศึกษา	2545		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จูตินัย	แก้วแดง	
	รศ. งามนิษฐ์	แก้วแดง	
	รศ.ดร. ทิพรรัตน์	วงษ์เจริญ	
	ผศ.ดร. ชัยสิทธิ์	ภูริชัยเกียรติ	

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ เป็นการเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จากสารละลายที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นกระจกใสซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้จะประกอบไปด้วย $CdSO_4$, $ZnSO_4$, NH_3 , $HC(NH_2)_2$ และ $N_2H_4.OH$ ซึ่งจะเตรียมฟิล์มที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะนำฟิล์มที่เตรียมได้ ไปแอนนีสลายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ พบว่าเมื่อ $x \leq 0.7$ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างเป็นซิงค์เบลนด์ แต่เมื่อ $x > 0.7$ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส ซึ่งจะไม่เห็นพีคการเลี้ยวเบนอย่างเด่นชัด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางซึ่งพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีสและพบว่าค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงเมื่ออยู่ภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจน ELH เนื่องมาจากพาหะอิสระมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทุก ๆ ค่า x จะมีค่าต่ำสุด เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ $300^\circ C$ จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบางที่อุณหภูมิค่าประมาณ 10 K พบว่าฟิล์มบางมีการเปล่งแสงเป็นแถบกว้างและมีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 480 nm แถบการเปล่งแสงนี้น่าจะมาจากการรวมตัวของอิเล็กตรอน-โฮล โดยผ่านข้อบกพร่องของผลึกที่ปรากฏอยู่บนผิวของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Photoluminescence of Cd _{1-x} Zn _x S Thin Films	
Name	Ms. Praphaphan	Sangsod
	Ms. Ruethai	Trungkavashirakun
	Mr. Witthaya	Sudthsathikulchai
Special project Adviser	Assoc.Prof.Dr. Thitinai	Gaewdang
	Assoc.Prof. Ngamnit	Gaewdang
	Assoc.Prof.Dr. Tiparatana	Wongcharoen
	Assist.Prof.Dr. Chaisingh	Poo-Rakkiat
Department	Applied Physics Faculty of Science	
Academic Year	2002	

Abstract

In this special project, Cd_{1-x}Zn_xS thin films have been deposited on slide glass substrates by chemical bath deposition technique at 80°C for 60 mins. The starting solution in the reaction bath were prepared from CdSO₄, ZnSO₄, SC(NH₂)₂, NH₃ and hydrazinium hydroxide. As-deposited films were thermally annealed in a controlled N₂ atmosphere with annealing temperature in the range 100 - 500°C for 30 min.. From X-ray diffraction studies suggest that for the as-deposited thin films with zinc atomic fraction $x \leq 0.7$ is belong to zincblende structure. For $x > 0.7$, the films appear to have an amorphous character, as no distinguishable peaks can be seen in XRD diffractogram. The variation of energy gap and sheet resistance of Cd_{1-x}Zn_xS thin films as a function of annealing temperature were also observed. The decrease in sheet resistance value illuminated by using ELH halogen lamp is probably due to the increase in free carriers. Each composition of Cd_{1-x}Zn_xS thin films annealed at 300°C shows the lowest sheet resistance. Photoluminescence measurements have been performed on Cd_{1-x}Zn_xS thin film , at very low temperature around 10K , show a broad emission band centered around 480nm. This blue emission band is probably indicated the characteristic of the electron-hole recombination via the defect states originated from the surface defects.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษครั้งนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง , รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ แก้วแดง , รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ ที่ได้เอื้ออำนวยความสะดวก ในการใช้เครื่องมือและ อุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ คีตตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร โอสถจันทร์, ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ และ ดร.อุคม รอบคอบ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตลอดจนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี พุฒพัฒน์ และคุณรวมพร ทองเรือง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำการใช้เครื่อง เอ็กซ์เรย์ คิฟ แฟรงโครมิเตอร์ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้นำ ปลอดประจวบใช้ในการทดลองโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วัฒนกุลชัย , รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ ไพศาล . คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณ กัญญา ศิริ โภชน์ ภาควิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง ยูวี วิซิเบิลแบบดับเบิลบีมสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ จัสโก รุ่น 7800 (UV-visible spectrometer JASCO 7800) ที่มีความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านตามองเห็นสำหรับใช้ในการวัดการส่งผ่าน แสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุพงษ์ ศรีประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซัง สตาร์ กล้องโลหะลศัญญาครบถ้วน และอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดความต้านทานแผ่น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ ชุดอุปกรณ์ ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ และกล้องจุลทรรศน์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เจริญธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรร เงินของภาควิชา ฯ เพื่อใช้ในการจัดทำโครงการพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องดิจิทัลในการถ่ายรูป

ขอขอบคุณ คุณวีรัชย์ ลิภา นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์กวนสารละลายปรับความเร็วรอบได้โดยใช้สเต็ปมอเตอร์ และแนะนำการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณรัชชัย ขาวประเสริฐ และ คุณจรินทร์ โพธิ์ชัยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่อาคารฝึกงานภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของโครงการพิเศษ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ ที่ให้การอุปการะทุนสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำงาน โครงการพิเศษในครั้งนี้



นางสาว ประภาพรรณ	สังข์โสด
นางสาว ฤทัย	ตรังควชิรกุล
นาย วิทยา	สุทธาธิกุลชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของ โครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลน	4
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลซิงค์ซัลไฟด์หรือแบบ	5
เวียร์ทซ์ไท์	
2.1.3 คัทซีมีมัลเลอร์	7
2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก	9
2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	10
2.1.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	10
2.1.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	11
2.2 การดูตกดินแสงของสารกึ่งตัวนำ	12
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	12
2.2.2 การเกิดสีของผลึก	15
2.2.3 การดูตกดินแสงในสารกึ่งตัวนำ	15
2.2.4 การวัดสัมประสิทธิ์ของการดูตกดินแสงของสารกึ่งตัวนำ	16
2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า	18
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	20
2.3.2.1 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	20
2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	21
2.4 โฟโตลูมินเนสเซนซ์	23
2.4.1 ปรากฏการณ์โฟโตลูมินเนสเซนซ์	23
2.4.2 กลไกการเปล่งแสงแบบลูมินเนสเซนซ์	27
2.5 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี	33
2.5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	33
2.5.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์	34
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	35
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$	35
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี	36
3.2.1 การเตรียมแผ่นรองรับ	36
3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$	37
3.3 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่น	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่เตรียมได้	42
4.2 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อทำการแอนนียลที่อุณหภูมิต่าง ๆ	43
4.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	43
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	46
4.5 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น	54
4.6 ผลการทดลองโฟโตลูมินเนสเซนซ์	58
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	60
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	66
ประวัติผู้เขียน	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมดตามเงื่อนไขต่าง ๆ	36
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ทั้งกรณีที่ไม่ได้มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	52
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (หน่วยเป็น eV) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนของ Zn ค่าต่าง ๆ และที่อุณหภูมิแอนนัลต่าง ๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 30 นาที	53
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและขณะที่มีการฉายแสงทั้งกรณีที่ไม่ได้มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 30 นาที	57

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	5
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdZnS	5
รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอม (ก) ภายในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (ข) ภายในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์	6
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ เวิร์ตไซต์ ของCdZnS	6
รูปที่ 2.5 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบ คิวบิก	7
รูปที่ 2.6 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	8
รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึก (ก) แวแคนซีชนิดชอคกี (ข) แวแคนซีชนิดเฟรนเคิล	9
รูปที่ 2.8 แสดงการเคลื่อนที่ของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก	10
รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมของการเคลื่อนที่ของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ ออกมาจากผลึกและการหาขนาดของเกรน	11
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรีนดิก	13
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอน ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	14
รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับ พลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิด กระบวนการสร้างโฟนอน	14
รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง	16
รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลม สองขั้วเชิงเส้น	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.15 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลม ที่ขั้วเชิงเส้น	21
รูปที่ 2.16 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d	22
รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน	23
รูปที่ 2.18 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเปล่งแสง และไม่เปล่งแสง	24
รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน (ก) แอนติ สโตก (anti-stoke) (ข) ปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบปกติ	25
รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เปล่งออกมากับความ ความยาวคลื่น	25
รูปที่ 2.21 แสดงกระบวนการการเปล่งแสงโดยการเจือสาร 2 ชนิด จะมี เซนซิไทซ์เซอร์เป็นตัวดูดกลืนแสง และ แอคติเวเตอร์เป็นตัว ปลดปล่อยแสงโดยรับพลังงานมาจากเซนซิไทซ์เซอร์	26
รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงกระบวนการการเปล่งแสงของพาหะ โดยที่รูป (ก) แสดงถึงตัวแอคติเวเตอร์ (A) ใน โครงผลึกเจ้าบ้าน(H) (ข) แสดงทั้งเซนซิไทซ์เซอร์ (S) และ แอคติเวเตอร์(A) ใน โครงผลึกเจ้าบ้าน(H)	26
รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงการเปล่งแสงในระดับพลังงานของสารเจือที่มีระดับ พลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า	27
รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเปล่งแสงของพาหะ อิสระระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์	28
รูปที่ 2.25 การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลที่ถูก จับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (ซ้าย) และการเปล่งแสงที่เกิด จากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ ระดับพลังงานผู้ให้และ โฮลอิสระ (ขวา)	28

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงเอ็กซิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้	30
รูปที่ 2.27 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว คู่ออมป์ของ GaP:S	31
รูปที่ 2.28 แผนภาพแสดงการเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงาน ระหว่างคู่ของอะตอมผู้ให้และผู้รับ	32
รูปที่ 2.29 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง	34
รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลาย เคมี	39
รูปที่ 3.2 แสดงสีของสารละลายหลังการเกิดปฏิกิริยา	39
รูปที่ 3.3 แสดงชุดอุปกรณ์การแอนนัลด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์	40
รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	41
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ค่า $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95$ และ 1.0 เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	42
รูปที่ 4.2 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้ บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	43
รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม ของ Zn ที่ x ค่าต่าง ๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	45
รูปที่ 4.4 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม ของ Zn ที่ $x=0.2$ ทั้งกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัล ที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	45
รูปที่ 4.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม ของ Zn ที่ $x=0.4$ ทั้งกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่ อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็น เวลา 30 นาที	46
รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	47
รูปที่ 4.8 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	49
รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	49
รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $200^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	50
รูปที่ 4.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $300^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	50
รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	51
รูปที่ 4.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	51

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	52
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn ค่าต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	54
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและในขณะที่มีการฉายแสงกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมได้เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100 - 500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	55
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและในขณะที่มีการฉายแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลกับอัตราส่วนผสมของซิงค์ที่ $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1$ ตามลำดับ	56
รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยที่สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารชนิดนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญที่สุด คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ แสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริก (thermoelectric effect) แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนและโลหะ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เรานำมาสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมากมาย เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ วงจรรวม ตัววัดแสง และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ ถือเป็นแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่ได้จากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแห่งใหม่ที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบซัลโคไพไรต์ (chalcopyrite structure) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Cu(In,Ga)Se_2 ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่อยู่ในรูปรอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของสารกึ่งตัวนำ $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{Mo/Sodalime glass}$ ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงถึง 18.8% [1-3]

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเจือ หรือข้อบกพร่องของผลึก โดยใช้หลักการเปล่งแสงของผลึก ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากแหล่งกำเนิดที่เหมาะสม แสงที่ใช้กระตุ้นอาจจะเป็นอัลตราไวโอเลตจากหลอดไฟไอปรอท หรือหลอดซินนอน หรือแสงจากเลเซอร์ชนิดต่าง ๆ อิเล็กตรอนในเนื้อวัสดุโดยเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าของเนื้อวัสดุจะดูดกลืนพลังงานแล้วเคลื่อนย้ายไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้น หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานกลับลงมายังสถานะพื้น โดยปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือโฟนอน ก็ขึ้นกับข้อบกพร่องของผลึกที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในสารกึ่งตัวนำ โดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จะทำให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ และปรากฏโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานกลับลงมาซึ่งจะผ่านระดับพลังงานที่ปรากฏภายในช่องว่างแถบพลังงาน ระดับพลังงานเหล่านี้ อาจเกิดมาจากสารเจือ หรือข้อบกพร่องของผลึกซึ่งอาจประพุดติตัวเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับดัก (trap) หรือศูนย์กลางของการรวมตัว (recombination center) อันจะส่งผลให้พลังงานของแถบเปล่งแสง (emission band) มีค่าน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยการอาบสารละลายเคมี และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ $100 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
3. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสง (optical transmission) ของฟิล์มบาง เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน
4. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
5. ทำการศึกษากระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยใช้พลังงานกระตุ้นที่ความยาวคลื่น ในช่วงอัลตราไวโอเลต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ได้ศึกษาในส่วนของชั้นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อ $0 \leq x \leq 1$ โดยในการวิจัยนี้ทำการเตรียมฟิล์มบางจากการอาบสารละลายเคมี (chemical bath deposition หรือ CBD) เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ต้นทุนไม่สูงมากจนเกินไป และให้ประสิทธิภาพสูง เพื่อที่จะนำไปใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป และนำฟิล์มบางที่เราเตรียมได้ไปทำการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ $100 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาทีและนำไปศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน, ค่าการดูดกลืนและการส่งผ่านทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ตลอดจนจะทำการศึกษากระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบางที่ได้นี้ด้วย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี พร้อมทั้งจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ทำโครงการพิเศษ

2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์ โดยวิธีอบสารละลายเคมี จากนั้นจึงนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ $100 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
3. ศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
4. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง
5. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
6. ทำการศึกษากระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยใช้พลังงานกระตุ้นที่ความยาวคลื่น ในช่วงอัลตราไวโอเลต

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษนี้คือ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราส่วนผสมของ Zn ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$
3. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแอนนัล ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$
4. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นบัพเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2

ทฤษฎี และหลักการ

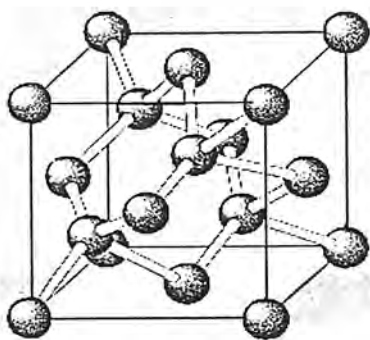
2.1 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ [4-7]

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์ (cubic zinc sulfide structure or zincblende) และ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ทไซท์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

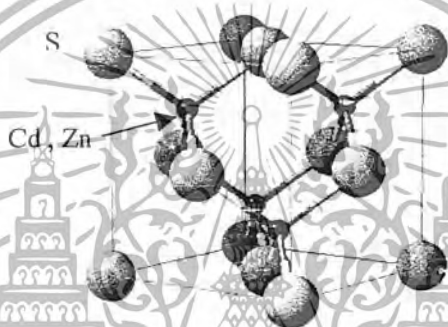
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์

(cubic zinc sulfide structure or zincblende) [4-7]

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.1 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral bond) แต่จะต่างกับที่โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic lattices) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสามชนิด คือ Cd, Zn และ S ส่วนกรณีสารละลายของแข็ง $Cd_{1-x}Zn_xS$ นั้นอะตอมของ Zn จะจัดเรียงตัวแบบสุ่มอยู่ในตำแหน่งอะตอมของแคดเมียม ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญ สำหรับประจักษ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



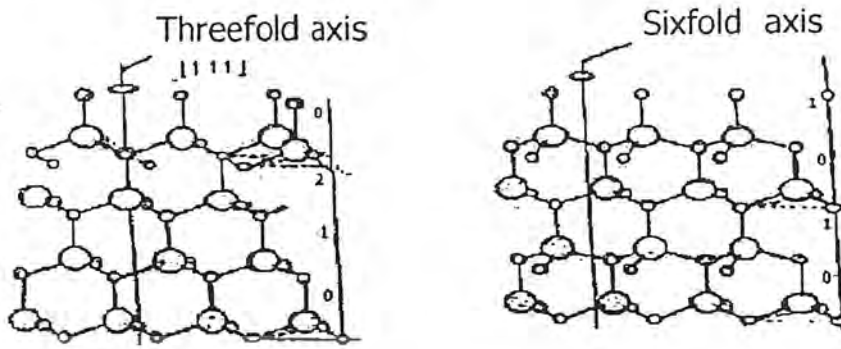
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพอร์



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของ CdZnS

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ทไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite) [4-7]

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีการจัดเรียงอะตอมเหมือนกับ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ แต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงระนาบของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไป ดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการนำโครงสร้างย่อยแบบ เฮกซะโกนอลโคลด์แพค (hexagonal closed-packed) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกนซี (c axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S โดยที่สำหรับกรณีสารละลายของแข็ง $Cd_{1-x}Zn_xS$ นั้น อะตอมของ Zn จะจัดเรียงตัวแบบสุ่มอยู่ในตำแหน่งอะตอมของ Cd ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, ZnO, ZnSe, ZnTe, SiC, CdSe และ CdS เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงระนาบของอะตอม

(ก) ภายในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

(ข) ภายในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ของ CdZnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ดัชนีมิลเลอร์ [4,7]

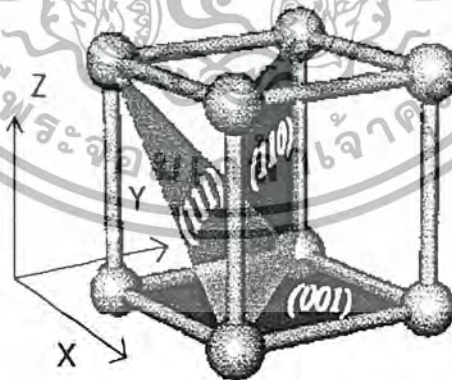
การบอกระนาบต่าง ๆ ในผลึกนั้น จะบอกเป็นค่าดัชนีมิลเลอร์ ค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จาก ส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก ผู้เสนอคือนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยการ แยกพิจารณาดัชนีมิลเลอร์เป็นสองประเภทดังนี้คือ

ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [4,7]

การบอกระนาบต่าง ๆ ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะใช้ดัชนีมิลเลอร์ ที่แทนด้วยเลข จำนวนเต็มสามจำนวนคือ h, k, l โดยใช้เครื่องหมาย (hkl) และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 เราจะได้

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

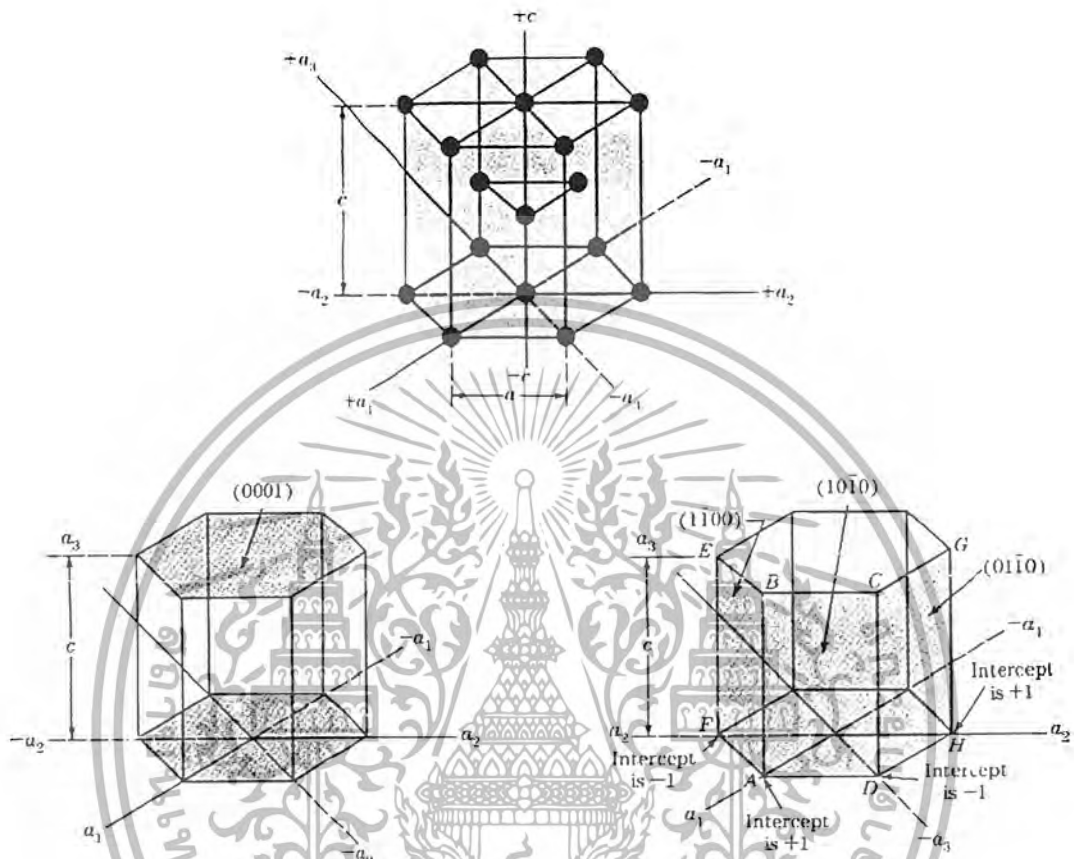
เมื่อ p, q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ นั้นคือ h, k, l จะเป็นส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ ซึ่งก็คือดัชนีมิลเลอร์ดัง แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล [4,7]



รูปที่ 2.6 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ดัชนีที่ใช้เรียกระนาบคือ ดัชนีมิลเลอร์ - บราว ใช้สัญลักษณ์ h, k, i, l ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 และ c ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.6 โครงสร้างของหน่วยเซลล์ประกอบด้วยระนาบ 2 แบบ คือ

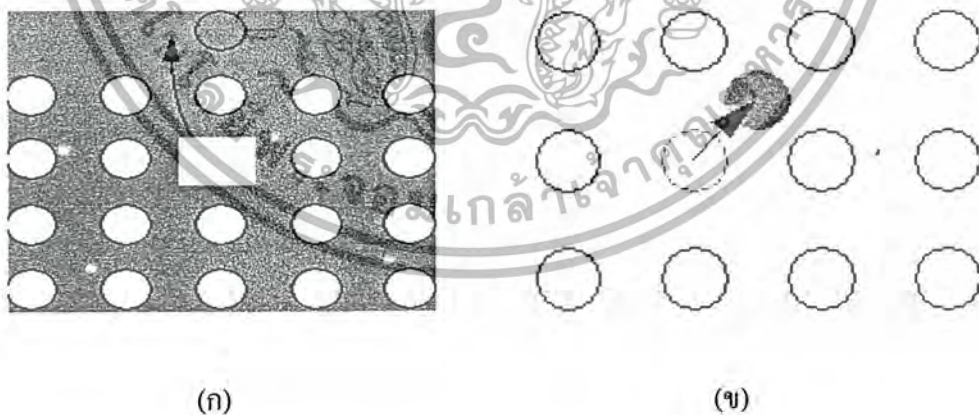
1) ระนาบฐานมีสองระนาบคือระนาบบน และระนาบฐานล่าง แกน a_1, a_2, a_3 เป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐานทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน และระยะตัดแกน $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$ และแกนที่ 4 คือแกน c เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบฐานทั้งสอง ซึ่งตัดแกน c ห่างกันเป็นระยะหนึ่งหน่วย ส่วนกลับของระยะตัดแกนทั้งสี่จึงเท่ากับ $0, 0, 0, 1$ ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์ - บราว ก็คือ (0001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระนาบปริซึมมีหกระนาบหรือหน้า ระนาบปริซึมทุกระนาบในหน่วยเซลล์สามารถแทนด้วยดัชนีเดียวกันคือ (1010) ในการเรียกชื่อระนาบอาระบุด้วย (hkl) ก็ได้คืออาศัยเพียง h, k, l โดยที่ $h + k = -i$ แต่การระบุด้วย (hkil) จะแสดงความสมมาตรในหน่วยเซลล์ได้ชัดเจนกว่า

2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก [4,7]

การเกิดข้อบกพร่องผลึก (defect crystal) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ในผลึกจริงจะมีข้อบกพร่องผลึกหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นข้อบกพร่องที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดไปจากโครงผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.7 ข้อบกพร่องผลึกแบบซับสตีติวชันัล (substitutional defect) เป็นข้อบกพร่องที่มีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) เป็นข้อบกพร่องแบบที่มีอะตอมไปแทรกในบริเวณที่ควรเป็นที่ว่างของผลึก เป็นต้น ข้อบกพร่องแบบเชิงเส้น (line defect) เช่น สลิป (slip) เป็นข้อบกพร่องที่ระนาบของอะตอมเลื่อนไป ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocation) เป็นข้อบกพร่องที่มีระนาบของสลิปตั้งฉากกับทิศทางการไหลของสลิป ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocation) คือข้อบกพร่องผลึกแบบที่ระนาบสลิปขนานกับทิศการไหลของสลิป



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึก

(ก) แบบแวนแคนซีชนิดขอดี

(ข) แบบแวนแคนซีชนิดเฟรนเกล

2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [4,5,7]

2.1.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [4,5,7]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 ถึง 0.25 nm เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับเกรตติงก็จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น และหลังจากผ่านโครงสร้างผลึกออกมา ก็จะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดชนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบริก (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ และเรียกกฎนี้ว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ

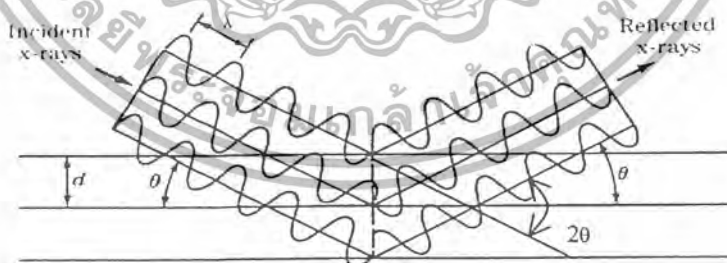
$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (2.2)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนทำกับระนาบของผลึก

n คือ ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก

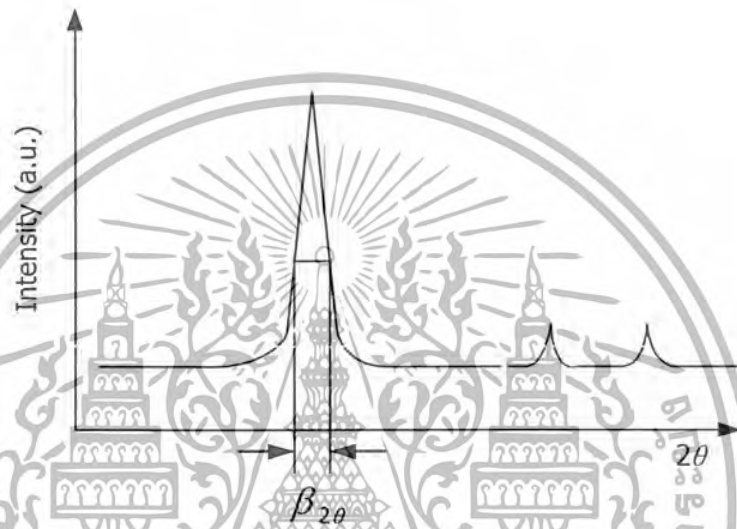
จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบต่าง ๆ ของผลึก แล้วเกิดการแทรกสอดแบบเสริม คือความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนมีค่ามาก สังเกตได้จากพิคของการเลี้ยวเบนจะสูง สำหรับธาตุหรือสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน พิคของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น จะเกิดที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ โดยมุมเลี้ยวเบนคือ มุมระหว่างรังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีค่า 2θ โดยความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนกับมุมของการเลี้ยวเบนจะวัดได้จากเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometer)

2.1.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก [4-7]

ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก และขนาดของเกรนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ได้ออกมาจ ากผลึกและการหาขนาดของเกรน

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างแบบคิวบิก [4-7]

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยที่ $a = b = c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์และระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

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

แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

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

โดยที่ a =ค่าคงที่ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล[4-7]

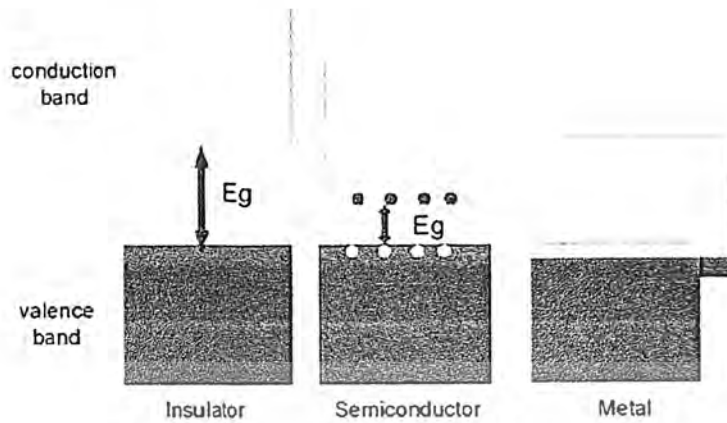
โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าต่างๆ $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

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

2.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [4, 7-9]

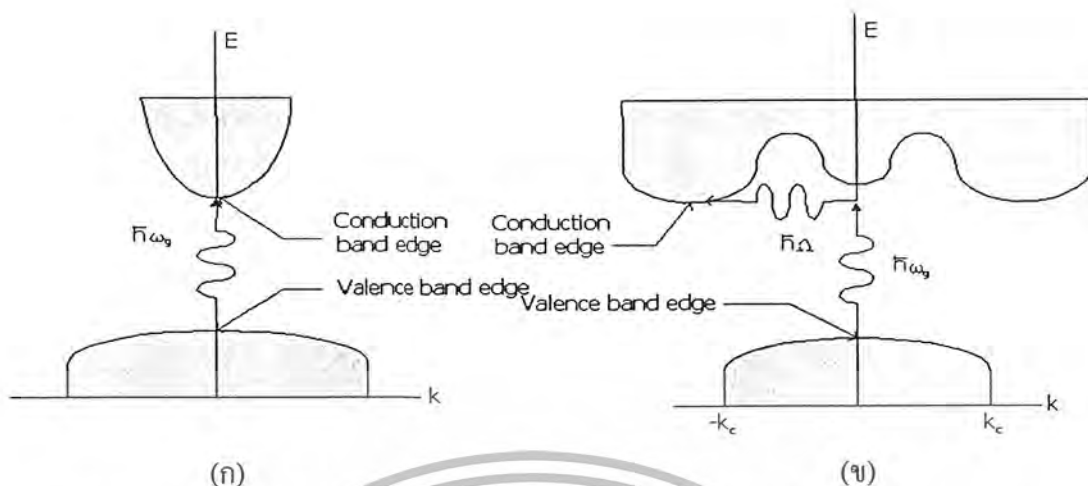
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [4, 7]

โดยทั่วไป มักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน ในการแบ่งแยกชนิดของสารต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินสิค (intrinsic) ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำ หรือตัวนำเป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างพลังงานแบบง่ายแสดงดังรูป 2.10 ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำ (conduction band) ซึ่งในแถบวาเลนซ์สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเคลวิน จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ยึดเหนี่ยวอะตอมเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย ในส่วนของแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำจะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลยและเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณต้องห้าม หรือแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) ซึ่งจะเรียกความกว้างของช่องนั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g จะถูกนำมาใช้แบ่งแยกชนิดสารต่าง ๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3eV$ สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3eV$ และตัวนำไม่มีค่า E_g เพราะมีค่าแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง



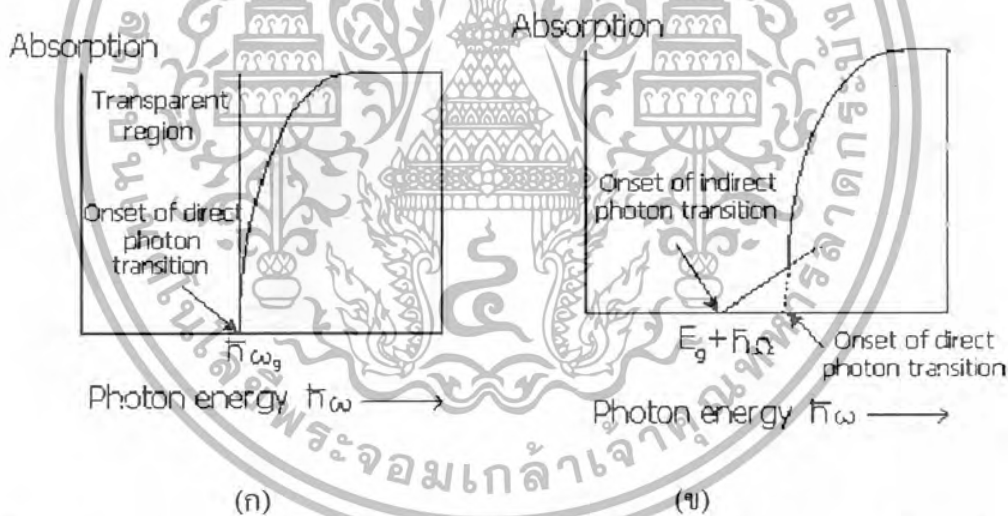
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรีนสิก

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่า กับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะถูกคลื่นพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.12(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบ เวเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{con}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจะได้ดังรูปที่ 2.12 (ข)



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

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การเกิดสีของผลึก [4,7]

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวที่กำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกอีกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่เมื่อให้พลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_g ($h\omega \leq E_g$) ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmitted) ออกจากผลึก ทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdS จะมีสีเหลืองส้มเนื่องจากมีค่า $E_g = 2.4$ eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึงสีน้ำเงิน หรือเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาหมด และเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับสีเหลืองส้ม เราจึงมองเห็นผลึก CdS มีสีเหลืองส้มเป็นต้น

2.2.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ [4,8-9]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงาน จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีมากกว่าแถบว่างพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยเราจะพิจารณาจากโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากยอดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำ ซึ่งเรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองแบบ คือ การย้ายสถานะพลังงานพลังงานชนิดอินยอม และแบบคั้งห้าม โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นกับค่าออฟติคัลเมตริกอิติเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดคั้งห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม

เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบการนำ เราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานเป็นรูปพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งแบบอินยอมและแบบคั้งห้ามได้ดังนี้

การย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

$$\begin{aligned} (\alpha_{hv}) &= \frac{sc\hbar}{n} \left[\frac{2\mu}{\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \\ &\equiv A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

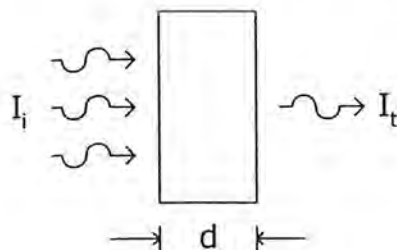
การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$\begin{aligned} (\alpha_{hv}) &= \frac{sc\hbar}{n} \left[\frac{2\mu}{\hbar^2} \right]^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \\ &\equiv A'(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่ μ คือ มวลลดทอน (The reduced electron - hole mass)
 H_{cv} คือ ค่าออปติคัลเมทริกอิเลเมนต์ (The optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ
 E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

2.2.4 การวัดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [7-9]

สำหรับในการทดลองเราสามารถจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสงผ่านสารตัวอย่าง โดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ส่งผ่านซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการสะท้อน และการส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{(1+R^2)e^{-2\alpha d}} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.9)$$

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

R คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

I_t คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง

I_i คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

I_r คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน

n คือ ดัชนีหักเห

k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนามากพอที่ $R e^{-\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (2.8) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

ในการทดลองของการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1-R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการ (2.9) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_i}{I_t} \right) = \alpha' + \text{ค่าคงที่} \quad (2.11)$$

ค่าคงที่ในสมการ (2.8) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (α_0) ที่เกิดจากข้อบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การ

คูคกีสนแสงที่ถูกดอง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำเท่านั้น

2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [6, 7, 10]

จากทฤษฎีแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 eV พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า [6, 7, 10]

ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุยาว l มีพื้นที่ภาคตัวขวาง A จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าดังสมการ

$$V = El \quad (2.12)$$

และมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดย

$$J = nqv_d A \quad (2.13)$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าหาได้จาก

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d = nq\mu E \quad (2.14)$$

เมื่อ	n	คือ	ความหนาแน่นของพาหะ
	q	คือ	ขนาดประจุไฟฟ้า
	v_d	คือ	อัตราเร็วของพาหะ
	μ	คือ	สภาพคล่องตัว
	E	คือ	ค่าสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $v_d = \mu E$ และจากกฎของโอห์ม $I = V/R$ และ $J = \sigma E$ เทียบกับสมการที่ (2.12) และสมการที่ (2.13) จะได้

$$\sigma = \frac{I}{RA} \quad (2.15)$$

และ $\sigma = nq\mu \quad (2.16)$

สำหรับในสารกึ่งตัวนำการนำไฟฟ้าจะเกิดจากพาหะคือ อิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าเขียนได้เป็น

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (2.17)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า $\sigma = 1/\rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามักเขียน

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

หรือเทียบกับสมการที่ (2.14) จะได้

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.19)$$

ถ้า $n \gg p$ จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเป็น

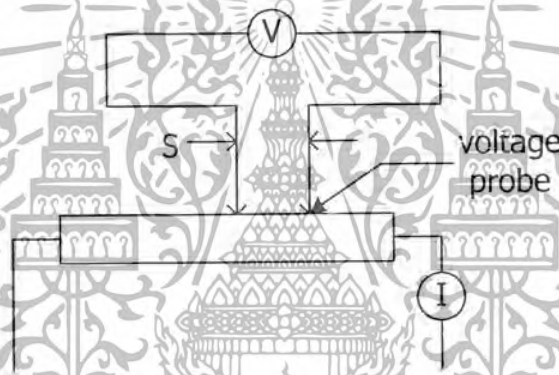
$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n} \quad (2.20)$$

2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [6,7,10]

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางมีหลายวิธีด้วยกัน ในการทดลองนี้เราจะใช้วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าหลัก ๆ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe) และวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe)

2.3.2.1 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น [6,7,10]

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับการวัดโดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนามาจากชนิดแรก เพื่อที่จะกำจัดสัทธิที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถที่จะตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้าและกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณวัดนี้ จะส่งผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนน้อยบริเวณตัววัดนั้น ทำให้การวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ไฟฟ้า (equi-potential line) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่า เส้นต่างๆของศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้าและ

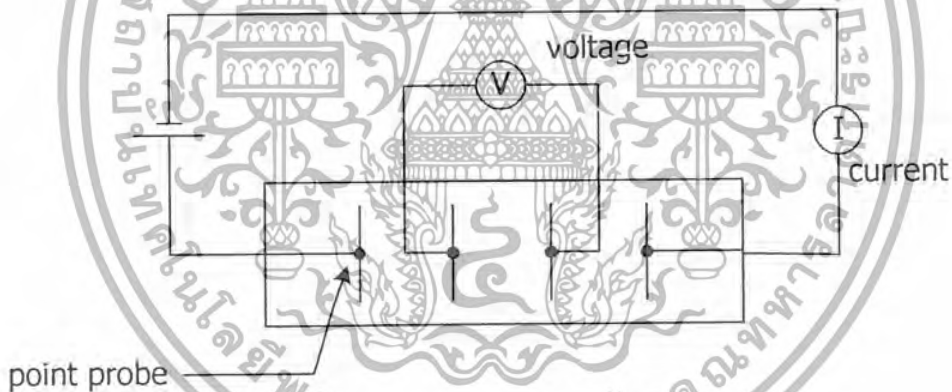
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสออก จะต้องมามีค่ามากกว่าสามเท่า ($I/a > 3$ เมื่อ I คือระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า a คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส) ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการคือ โครงสร้างทางผลึกความีโครงสร้างชนิดใด

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้ จะสามารถแยกความต้านทานจำเพาะที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และ ความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น [6,7,10]

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.15 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ส่วนใหญแล้วมักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น(sheet resistance) ซึ่งมีหน่วยเป็น $\Omega\text{-cm}$



รูปที่ 2.15 แสดงการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w และหนา d ตามรูปที่ 2.16 จากกฎของโอห์มและใช้สมการที่ (2.18) จะคำนวณหาความต้านทานของฟิล์มบางได้ดังนี้

$$R = V/I = \rho l/A$$

$$= \rho l/wd \quad \Omega \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

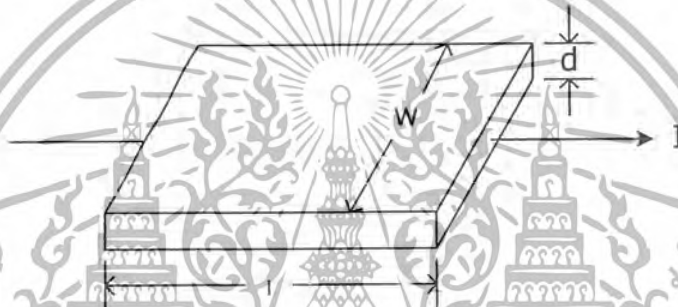
ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม ($l = w$) ดังนั้นสมการที่ 2.20 เขียนใหม่ได้เป็น

$$R = R_s = \rho/d \quad \Omega/\text{cm} \quad (2.22)$$

R_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

โดยที่ความต้านทานแผ่นไม่ขึ้นกับขนาดของฟิล์ม



รูปที่ 2.16 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

จากรูปที่ 2.15 เป็นกรวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใด ๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right] \quad (2.23)$$

โดยที่ s คือช่องว่างระหว่างขั้ว ในกรณีที่ $s_1 = s_2 = s_3$ สมการที่ (2.22) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.24)$$

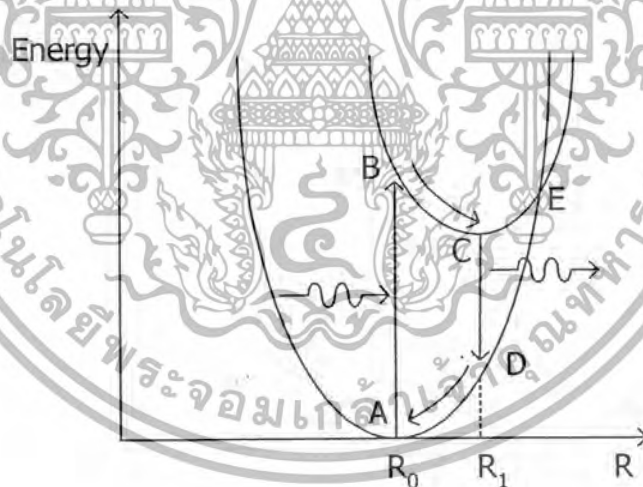
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โฟโตลูมินเนสเซนซ์ [7,9,11,12]

2.4.1 ปรากฏการณ์โฟโตลูมินเนสเซนซ์ [7,9,11,12]

เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการเปล่งแสง นอกเหนือจากการเปล่งแสงชนิดแผ่รังสีความร้อน และชนิดการแผ่รังสีเชเรนโกฟ (cerenkov radiation) การเปล่งแสงลูมินเนสเซนซ์เกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุมีได้หลายวิธี เช่น การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต การบอมบ์บาศด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น ซึ่งโฟโตลูมินเนสเซนซ์นี้ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ฟลูออเรสเซนซ์ จะเกิดการเปล่งแสงในขณะที่มีการกระตุ้น กล่าวคือ จะมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) สั้นๆ ประมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-8} วินาที
2. ฟอสฟอเรสเซนซ์ จะเกิดการเปล่งแสงภายหลังที่มีการกระตุ้นจึงมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) นานกว่าแบบฟลูออเรสเซนซ์ คืออาจมีค่าประมาณ 10^{-3} วินาที หรืออาจเป็นชั่วโมง

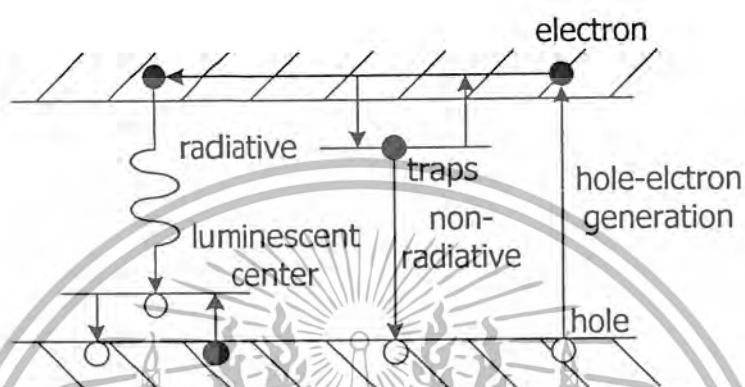


รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 2.17 จากอิเล็กตรอนที่อยู่ตำแหน่ง A เมื่อดูดกลืนพลังงานโฟตอนจะถูกกระตุ้นจนไปอยู่ที่ตำแหน่ง B และหลังจากนั้น อิออนจะอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ (R_1) และอิเล็กตรอนที่เคลื่อนจากตำแหน่ง B ไปยัง C โดยการปล่อยโฟนอนออกไป (non-radiative) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากจุด C ไปยัง D และเปล่งแสง (radiative) โดยจะมีโฟตอนเกิดขึ้น และที่ตำแหน่ง D อิออนรอบ ๆ จะรีแลกเซชันเพื่อกลับไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง R_0 เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้การเปล่งแสงหายไป (quenching temperature) อิเล็กตรอนจะไปอยู่ที่ตำแหน่ง E จะทำให้อิเล็กตรอนในสภาวะกระตุ้น (excited state) สามารถกลับมาที่สถานะพื้น (ground state) ได้เลย โดยพลังงานค่าเดิมจะไม่มีเปล่งแสงออกมา (non-radiative)

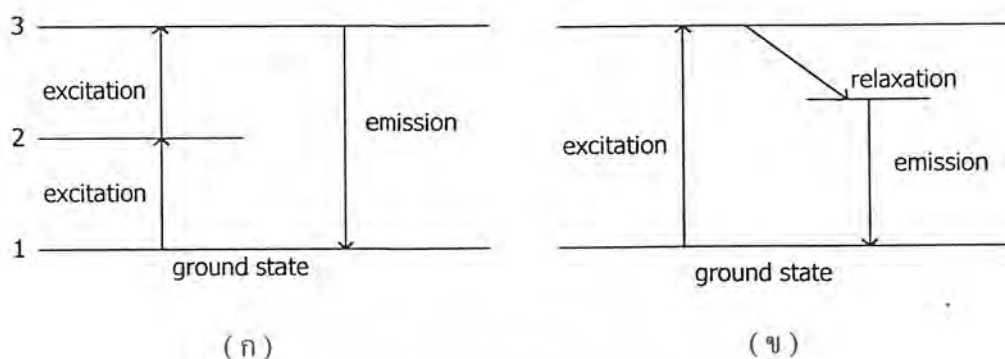


รูปที่ 2.18 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงและไม่เปล่งแสง

จากรูปที่ 2.18 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะเกิดการเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม (dislocation) หากอิเล็กตรอนนี้ถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน (trap) และย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบวาเลนซ์จะเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการเปล่งแสง (non-radiative) แต่ถ้าอิเล็กตรอนนี้ย้ายสถานะพลังงานผ่านที่ศูนย์กลางการเปล่งแสง (luminescent center) จะเกิดการเปล่งแสงออกมา แต่โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน (trap) มากกว่า จึงทำให้สารกึ่งตัวนำไม่ค่อยเกิดการเปล่งแสง

จากปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบปกติ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในการเปล่งแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น แต่ปรากฏการณ์แอนติ-สโตกพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีค่าสูงกว่าพลังงานกระตุ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุบางชนิดมีระดับพลังงานที่อยู่ตรงกึ่งกลางพอดี เมื่อเราใส่พลังงานกระตุ้นที่มีค่าเท่ากับระดับพลังงาน 1 ไป 2 นั้น จะเปรียบเสมือนว่าให้พลังงานกระตุ้นจากระดับพลังงาน 2 ไป 3 ด้วย ดังนั้นในที่สุดอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 1 ไป 3 เมื่อให้พลังงานกระตุ้นภายในครั้งเดียว และจากนั้นจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 3 มายังระดับพลังงาน 1 โดยปลดปล่อยพลังงานออกมา ดังรูปที่ 2.19 (ก) ดังนั้นพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้นที่ใส่เข้าไป ดังรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน

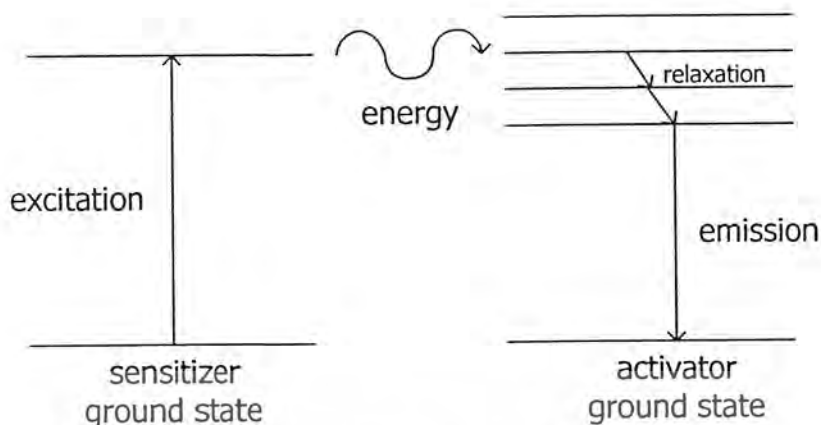
(ก) แอนติสโตก (anti-stoke)

(ข) ปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบปกติ

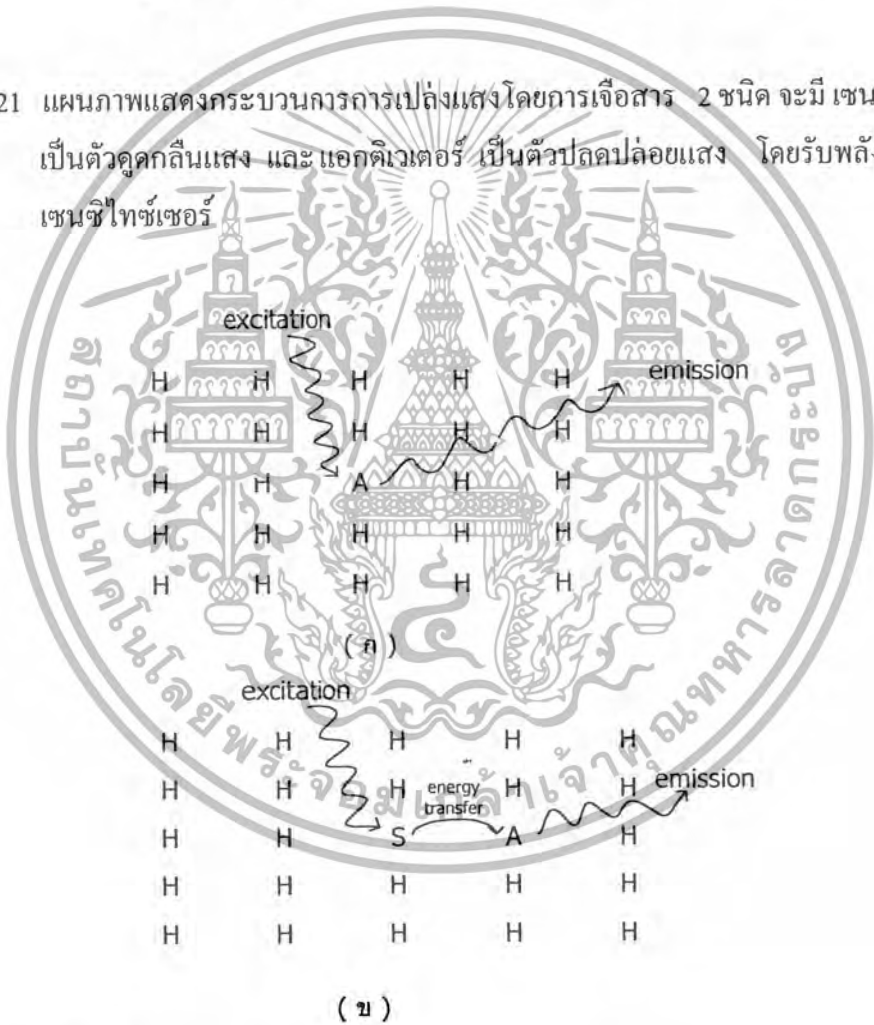


รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เปล่งออกมากับความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.20 จะเห็นว่าพลังงานของการเปล่งแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลื่อนไปของสโตก (stoke shift) พลังงานที่หายไปจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงผลึก (lattice) โดย E_x และ E_m คือ แถบของพลังงานในการกระตุ้นและแถบของพลังงานในการเปล่งแสงตามลำดับ

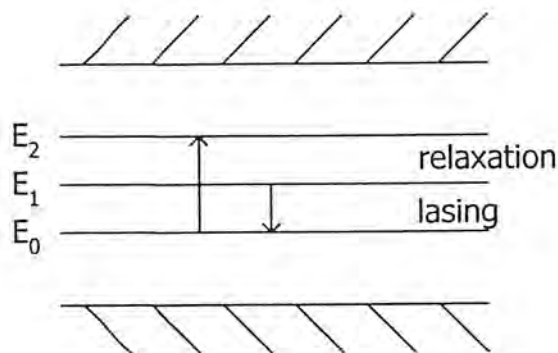


รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงกระบวนการการเปล่งแสงโดยการเจือสาร 2 ชนิด จะมีเซนซีไทซ์เซอร์เป็นตัวดูดกลืนแสง และ แอ็กติเวเตอร์ เป็นตัวปลดปล่อยแสง โดยรับพลังงานมาจากเซนซีไทซ์เซอร์



รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงกระบวนการการเปล่งแสงของพาหะ
 (ก) แสดงถึงตัวแอ็กติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน(H)
 (ข) แสดงทั้งเซนซีไทซ์เซอร์ (S)และแอ็กติเวเตอร์(A)ใน โครงผลึกเจ้าบ้าน(H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงการเปล่งแสงในระดับพลังงานของสารเจือ ที่มีระดับพลังงานภายใน ช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า

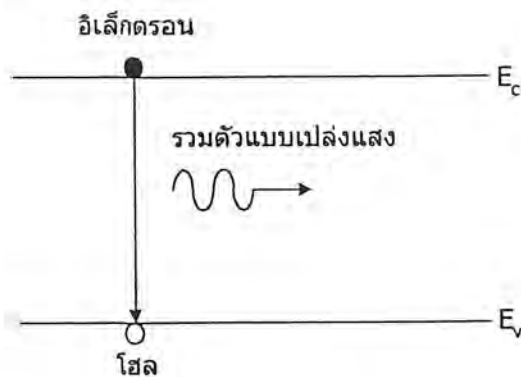
เมื่อไอออนถูกกระตุ้นย้ายสถานะพลังงาน ขึ้นไปที่ระดับพลังงานสูงสุดของสารเจือ จากนั้นจะเกิดการรีแลกเซชัน หลังจากนั้นจะเกิดการปล่อยแสง (lasing) ตกลงมาที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดของสารเจือ และจะปล่อยแสงออกมาในตัวของมันเอง

2.4.2 กลไกการเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์ [7,9,11,12]

กลไกการเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์ เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงลงมาระดับพลังงานต่ำ และสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบนำ รวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบวาเลนซ์

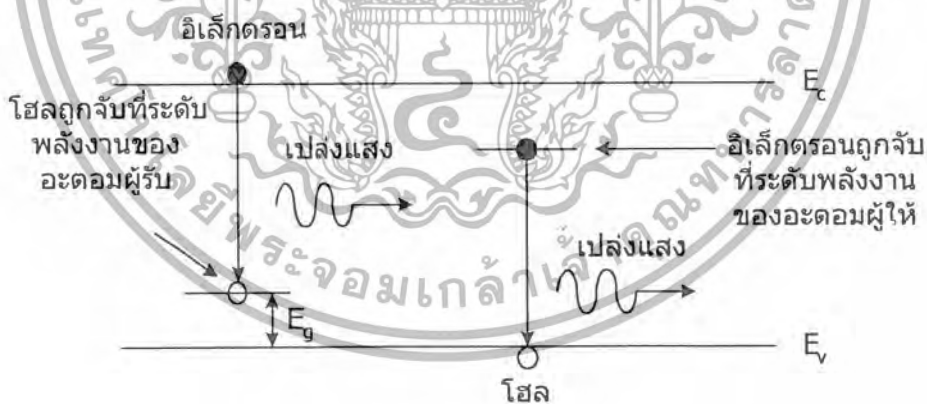
เป็นการเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) กล่าวคือเป็นการรวมตัวกันโดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอน ที่อยู่ในแถบนำรวมกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ถ้าวัสดุสารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) แสงที่เปล่งออกมาจะมีพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเปล่งแสงของพาหะอิสระระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์

2. การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวกับ โฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ หรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ในระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้รวมตัวกับ โฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์

การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ไปยังระดับพลังงานของอะตอมผู้รับหรือ ไปยังระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (free carrier-impurity level transition) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.25

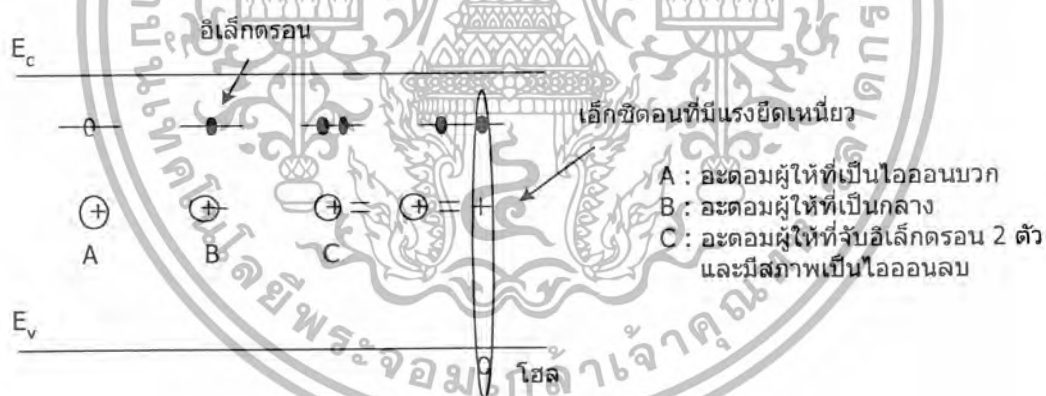


รูปที่ 2.25 การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (ซ้าย) และการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ ระดับพลังงานผู้ให้และ โฮลอิสระ (ขวา)

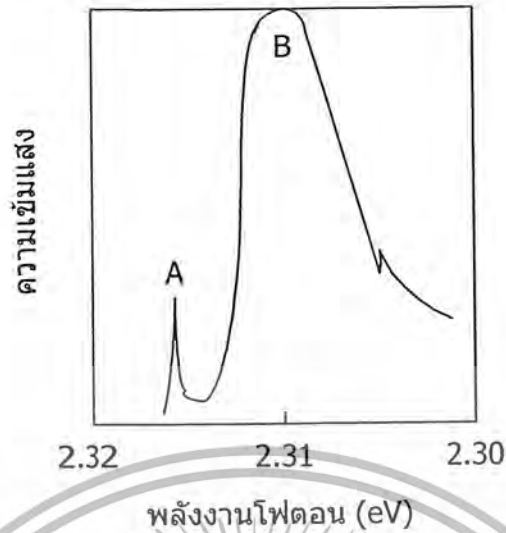
ต่อไปจะกล่าวถึงการเปล่งแสงจากเอ็กซิตอน ในลักษณะต่าง ๆ

1. การเปล่งแสงจาก เอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้

ตัวอย่างเช่น การเจือสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP (ตระกูลหมู่ III-หมู่ V) ด้วยอะตอม S (หมู่ VI) จะทำให้อะตอม S เข้าไปแทนที่อะตอม P และอะตอมของ S จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ ในสภาพที่อะตอม S จับอิเล็กตรอนไว้นั้นอะตอม S ยังมีสภาพเป็นกลาง แต่ถ้าอะตอม S ปลอ่ยให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปในแถบนำ อะตอม S จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอออนบวก ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ “ \oplus ” แทนไอออนบวก และสัญลักษณ์ “ $\oplus-$ ” แทนสภาพ S ที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งมาจับที่อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางนี้จะทำให้อะตอมผู้ให้กลางเปลี่ยนสภาพเป็นลบ ซึ่งสามารถแทนไอออนลบด้วยสัญลักษณ์ “ \ominus ” รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะการเกิดเอ็กซิตอน ลักษณะดังกล่าว ในสภาพเช่นนี้ ถ้ายังมีโฮลวิ่งเข้ามาใกล้ไอออนลบนี้ โฮลจะถูกแรงดึงดูดจากไอออนลบดึงดูดไว้ และทำให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว ดังแสดงในรูป 2.26 ด้านริมขวา และถ้าคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้มีการรวมตัวกันก็จะเกิดการเปล่งแสงออกมา รูปที่ 2.27 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการเปล่งแสงจากเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว ใน GaP:S



รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงเอ็กซิตอนชนิดที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้



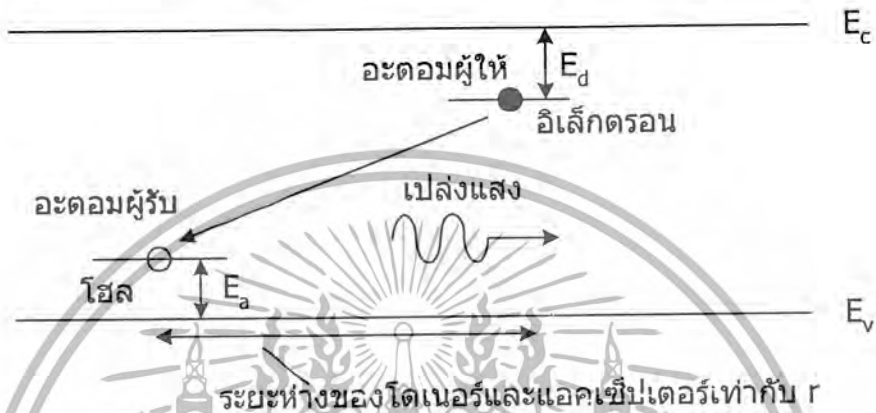
รูปที่ 2.27 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคู่ออมบ์ของ GaP:S

2. การเปล่งแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ (isoelectronic trap) ขอให้พิจารณาตัวอย่างการเติมอะตอม N (หมู่ V) เข้าสู่ GaP ในกรณีนี้อะตอม N จะเข้าไปแทนที่อะตอม P แต่เนื่องจากทั้งอะตอม N และ P เป็นธาตุหมู่ V เหมือนกัน เพราะฉะนั้นสภาพไฟฟ้าจึงเป็นกลางเหมือนเดิม กล่าวคืออะตอม N ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ หรือ อะตอมผู้รับแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอะตอม N มีคุณสมบัติในการดึงดูดอิเล็กตรอนมากกว่า P (เรียกว่าอะตอม N มีค่า อิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง) ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนในผลึกวิ่งวนมาใกล้อะตอม N ก็จะทำให้อะตอม N จับอิเล็กตรอนไว้ได้ดี ในสภาพเช่นนี้เรากล่าวว่าอะตอมไนโตรเจนนั้นกำลังสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ กับดักชนิดนี้มีสภาพประจุไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถมีแรงดึงดูดโฮลซึ่งมีประจุบวกให้เข้ามาใกล้ได้ดีจึงส่งผลให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนเข้ามา และอิเล็กตรอนและโฮลใน เอ็กซิตอนชนิดนี้สามารถรวมตัวกันได้ง่ายจึงทำให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสงมีค่าสูงมาก ตัวอย่างในกรณีผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ซึ่งตามปกติเดิมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง จึงมีประสิทธิภาพของการเปล่งแสงไม่คืบคัก แต่ถ้าเราเติมอะตอม N ไปในผลึก GaP นี้จะสามารถสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ ขึ้นในผลึกได้ และเกิดเอ็กซิตอน และทำให้การรวมตัวของพาหะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมา เปรียบเสมือนว่าผลึก GaP กลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง จึงมีการนำ GaP ไปประดิษฐ์เป็นไดโอดเปล่งแสงอย่างแพร่หลาย และสามารถเปล่งแสงสีแดงที่สว่างมาก ๆ ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเปล่งแสงจากคู่อะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ (DA pair)

การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้ และโฮลที่จับอยู่ในระดับพลังงานผู้รับโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพดีมาก รูปที่ 2.28 ซึ่งแสดงกลไกการรวมตัวของพาหะชนิดนี้ ตัวอย่างได้แก่การได้ปี GaP ด้วย S ที่เป็นอะตอมผู้ให้ และ C ที่เป็นอะตอมผู้รับพร้อม ๆ กัน คุณสมบัติของการเปล่งชนิดนี้มีลักษณะเด่นหลายข้อซึ่งพอสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.28 แผนภาพแสดงการเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคู่อะตอมผู้ให้และผู้รับ

1. ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล $W(r)$ ขึ้นกับระยะห่าง (r) ของ อะตอมผู้ให้ และอะตอมผู้รับ โดยที่ถ้า r มีค่าน้อย ๆ การเปล่งแสงก็จะดีดังนี้

$$W(r) = W_{\max} e^{-r/R_d} \quad (2.25)$$

โดยที่ W_{\max} คือ ค่าคงตัว

R_d คือ ค่าครึ่งหนึ่งของรัศมี (Bohr's radius) ของวงจรรอบอะตอมผู้ให้

2. พลังงานโฟตอนของการเปล่งแสง มีค่า

$$h\nu = E_g - (E_a + E_d) + \frac{q^2}{\epsilon r} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

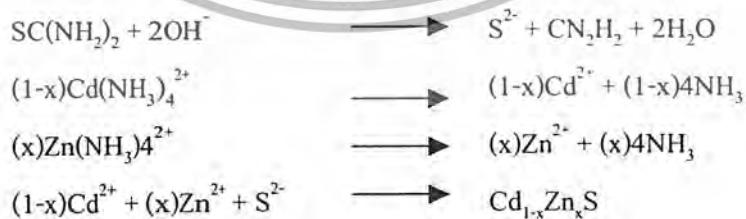
- โดยที่ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
 E_a, E_d คือ ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ และ อะตอมผู้ให้ ตามลำดับ
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
 E_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

3. ถ้าเพิ่มความเข้มของแสงที่ใช้กระตุ้น จะทำให้สเปกตรัมของการเปล่งแสง เคลื่อนตัวไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากขึ้น
4. หลังจากตัดแสงที่ใช้กระตุ้นออก และเมื่อเวลาผ่านไป สเปกตรัมของการเปล่งแสง จะเคลื่อนตัวไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยลง

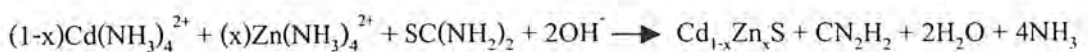
2.5 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี

2.5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [1-4,13-24]

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ สามารถด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีโดยการจุ่มแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกใสได้ ซึ่งสารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วย ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) เกลือแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ซึ่งจะให้อิออนของซัลเฟต (S^{2-}), ไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) และ ไอออนของซิงค์ (Zn^{2+}) ตามลำดับ โดยในการเตรียมฟิล์มนี้จะมีค่า pH ของสารละลายในอ่างประมาณ 10.6 – 11.8 ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางจะเกิด Cd^{2+} , Zn^{2+} อย่างช้า ๆ โดย Zn^{2+} จะเข้าไปแทน Cd^{2+} ทำให้เกิดฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ได้ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้เราใช้ค่า Zn ที่มีอัตราส่วนผสมทางเคมีดังต่อไปนี้ โดย $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95$ และ 1.0 ตามลำดับ โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะสรุปได้ว่า

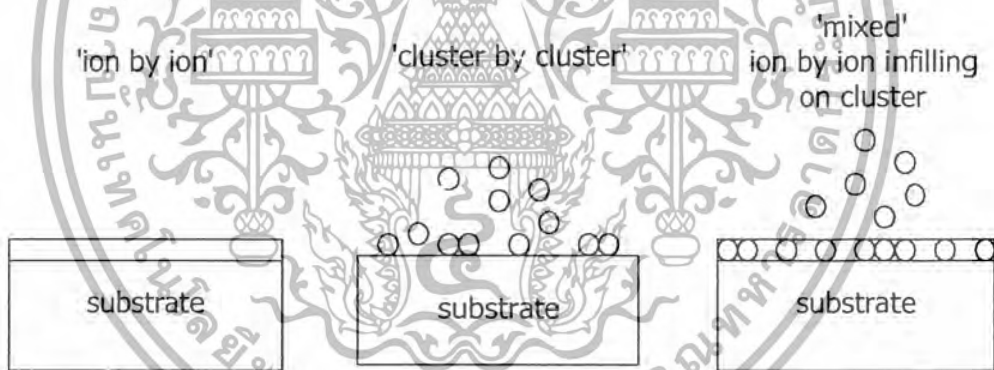


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_xZn_{1-x}S$ บนกระจกสไลด์ [1-4,13-24]

ในการตกผลึกของ CdS และ ZnS ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product ; K_{sp}) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant ; K_e) ทั้งของ CdS และ ZnS มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้น อัตราเร็วในการตกผลึกของ ZnS จึงช้ากว่าของ CdS ดังนั้นในการตกผลึกจึงเกิดกลไกได้ 2 แบบ ด้วยกันดังนี้คือ

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous precipitation) หรือกลไกการจับตัวกันแบบกลุ่มก้อนต่อกันก่อน (cluster by cluster) ซึ่งจะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของแผ่นรองรับดังรูปที่ 2.29
2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ เรียกว่า ไอออนต่อไอออน (ion by ion) หรือการตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous precipitation) ซึ่งตัว Cd^{2+} หรือ Zn^{2+} จะไปจับกับ OH^- กลายเป็น $Cd(OH)_2$ หรือ $Zn(OH)_2$ แล้วก็จะเกิดการเปลี่ยนไอออนระหว่าง $Cd(OH)_2$ หรือ $Zn(OH)_2$ กับ $SC(NH_2)_2$ ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.29 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง

เนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของทั้ง CdS และ ZnS มีค่าต่ำมาก ดังนั้นการควบคุมการตกผลึก สามารถทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของไอออนอิสระ Cd^{2+} กล่าวคือต้องเลือกตัวแทนเชิงซ้อน (complexing agent) ที่เหมาะสมเพื่อที่จะปล่อยไอออน Cd^{2+} และ Zn^{2+} ในปริมาณความเข้มข้นน้อยมาก ซึ่งในที่นี้คือ NH_3 ซึ่งจะรวมตัวกับ Cd^{2+} และ Zn^{2+} กลายเป็นไอออนเชิงซ้อน (complexing ions) ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดและคุณภาพ

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางในปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การระเหยในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation), สเป็ตเตอริง (sputtering chemical vapor deposition), สเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) และ การอาบสารละลายเคมี (chemical bath deposition : CBD) ในการทดลองนี้เราจะทำการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี เนื่องจากวิธีเป็นวิธีที่ประหยัด และสะดวกในการสร้างฟิล์มบางขึ้นมาโดยไม่ต้องพึ่งพาระบบสุญญากาศอย่างเช่นวิธีอื่น ๆ และเมื่อได้ฟิล์มบางออกมาแล้วก็นำไปแอนนียลที่อุณหภูมิต่าง ๆ และนำไปศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ คือ ลักษณะของโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านแสง วัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบางเหล่านี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ [4,13]

อุปกรณ์ที่ใช้ในการจับกระแสจลต์โคค์ให้อยู่ในแนวตั้งก็คือ แท่นรองรับที่ทำด้วยเทฟลอน ซึ่งมีคุณสมบัติทนกรดทนด่าง มีทั้งแบบยึดกระแสจลต์โคค์ได้ทั้ง 7 อัน และ 15 อัน แท่นเทฟลอนจะถูกยึดด้วยแท่งแก้วตัน แล้วนำไปต่อเชื่อมเข้ากับสแต็ปปีงมอเตอร์เพื่อให้แท่นเทฟลอนหมุนไปด้วยในขณะเคลือบฟิล์มบาง ในอัตราเร็วคงที่ประมาณ 60 รอบ/นาที ส่วนอ่างที่ใช้ในการจุ่มฟิล์มบางสามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ถึง $100^{\circ}C$ ทำการปรับให้มีอุณหภูมิตั้งที่ $80^{\circ}C$ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ภายหลังจากการจุ่มเคลือบฟิล์มบางให้นำไปกำจัดคลอไรด์ที่ไม่ต้องการที่ติดบนแผ่นฟิล์มให้สะอาดโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกส่วนปริมาตรสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ถูกเทลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุที่มีปริมาตรของสารละลายทั้งหมด 150 ml โดยค่าปริมาตรสารตั้งต้นต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยกำหนดความเข้มข้นของ $[CdSO_4 \cdot 8/3H_2O] + [ZnSO_4 \cdot 7H_2O]$ เท่ากับ 0.01 M ส่วน $SC(NH_2)_2$ และ NH_3 เท่ากับ 0.05 และ 1.5 M ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมดตามเงื่อนไขต่างๆ

อัตราส่วนผสมของ Zn (x)	ปริมาณสารตั้งต้น				
	CdSO ₄ ·8/3H ₂ O (g)	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (g)	SC(NH ₂) ₂ (g)	NH ₃ (ml)	N ₂ H ₃ OH (ml)
0.2	0.3078	0.0862	0.5709	16.84	27.3
0.4	0.2308	0.1725	0.5709	16.84	27.3
0.6	0.1539	0.2587	0.5709	16.84	27.3
0.7	0.1154	0.3019	0.5709	16.84	27.3
0.8	0.0769	0.3450	0.5709	16.84	27.3
0.9	0.0384	0.3881	0.5709	16.84	27.3
0.95	0.0192	0.4097	0.5709	16.84	27.3
1.0	0.0000	0.4313	0.5709	16.84	27.3

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

3.2.1 การเตรียมแผ่นรองรับ [4]

แผ่นรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี แผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้มีความกว้างและความเป็น 12 และ 25 mm ตามลำดับ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นสไลด์ด้วย TCE
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรด HF 10% เป็นเวลา 10 นาที และล้างด้วยน้ำป้อนประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำป้อนประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการอบแผ่นสไลด์แล้ว จึงนำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้นี้ไปทำการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธี CBD ซึ่งขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนดังนี้

3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เราจะต้องใช้สารเคมีดังนี้ $CdSO_4 + ZnSO_4$, $SC(NH_2)_2$, NH_3 และไฮดราซีนจำนวน 0.01, 0.05, 1.5, 3 M ตามลำดับ ปริมาตร 10, 10, 16.8, 27.3 ml. ตามลำดับ เสร็จแล้วเติมน้ำปลอดประจุในสารละลายทั้งหมดนั้นจนมี ปริมาตร 150 ml. ซึ่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น เกลือแคดเมียมซัลเฟต [$CdSO_4 \cdot 8/3 H_2O$], เกลือซิงค์ซัลเฟต [$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$] ไทโอยูเรีย $SC(NH_2)_2$ ตามที่คำนวณไว้ และเตรียมแอมโมเนียและไฮดราซีน ปริมาตร 16.8 และ 27.3 ml. ตามลำดับ โดยอัตราส่วนของ Zn คือ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0 ตามลำดับ
2. ละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟต และเกลือซิงค์ซัลเฟตเข้าด้วยกันในน้ำปลอดประจุ 10 ml. ที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายเกลือไทโอยูเรียในน้ำปลอดประจุ 10 ml. เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง
4. นำกระจกสไลด์ที่ยึดด้วยเทฟลอนที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุ อยู่ประมาณ 100 ml. ซึ่งแช่อยู่ในอ่างปรับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ $80^\circ C$
5. เปิดสวิทซ์เตปปีงมอเตอร์ให้หมุนแท่นยึดแผ่นรองรับตลอดเวลา ด้วยอัตราเร็วประมาณ 60 รอบ/นาที
6. เทสารละลายแคดเมียมซัลเฟต และ ซิงค์ซัลเฟต 10ml. ที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเทแอมโมเนีย ไฮดราซีน และไทโอยูเรีย ที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำ ปลอดประจุจนสารละลายในบีกเกอร์มีค่าประมาณเป็น 150 ml.
7. เมื่อสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี ให้วัดค่า pH ของสารละลายในบีกเกอร์ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ ประมาณ 11.6 จากนั้นรอเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง โดยระหว่างรอให้คอยควบคุมอัตราการหมุนของ แท่นยึดแผ่นสไลด์ และอุณหภูมิของอ่างน้ำให้คงที่อยู่เสมอ และต้องคอยเติมน้ำในอ่างปรับอุณหภูมิ ให้มีปริมาณเท่ากับสารละลายในบีกเกอร์อยู่เสมอ
8. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ให้นำแท่นจับแผ่นรองรับออกจากตู้ทดลองจะเห็นฟิล์มบาง เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ นอกจากนี้พบว่ามีคอลลอยด์ของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ เกาะอยู่ที่ ผิวหน้าของฟิล์มบาง และตกตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์
9. นำแผ่นรองรับที่เคลือบฟิล์มบางใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุอยู่ประมาณ 200 ml. แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที แล้วเปลี่ยนน้ำในบีกเกอร์ทำการเขย่าอีก 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งครึ่งละ 10 นาที เพื่อจัดคอลลอยด์ของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางออกจากฟิล์มบางให้หมด

10. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเคลือบอีก 5 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-9 ตามลำดับ หลังจากเคลือบครบ 6 ครั้งแล้ว นำฟิล์มบางมาเป่าให้แห้งด้วยความร้อนจากไคร้เป่าลม

11. เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 1-10 ให้ได้ประมาณ 240 ชั้น เพื่อยืนยันผลการทดลอง

12. นำฟิล์มบางทุกอัตราส่วนของ Zn ที่เตรียมได้มาทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 , 500 °C ตามลำดับภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

13. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยวัดการส่งผ่านทางแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีมียี่ห้อ JASCO 7800 โดยให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 300-1100 nm. เพื่อศึกษาโครงสร้างของแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างของแถบพลังงาน

14. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเครื่อง X-ray diffractometer ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น PW 1830 ซึ่งมีความยาวคลื่นของ $\text{CuK}\alpha$ เท่ากับ 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้ค่าความต่างศักย์ 25 kV. และกระแสไฟฟ้า 30mA.

15. นำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น ทั้งกรณีที่มีการฉายแสง และไม่ฉายแสง เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง

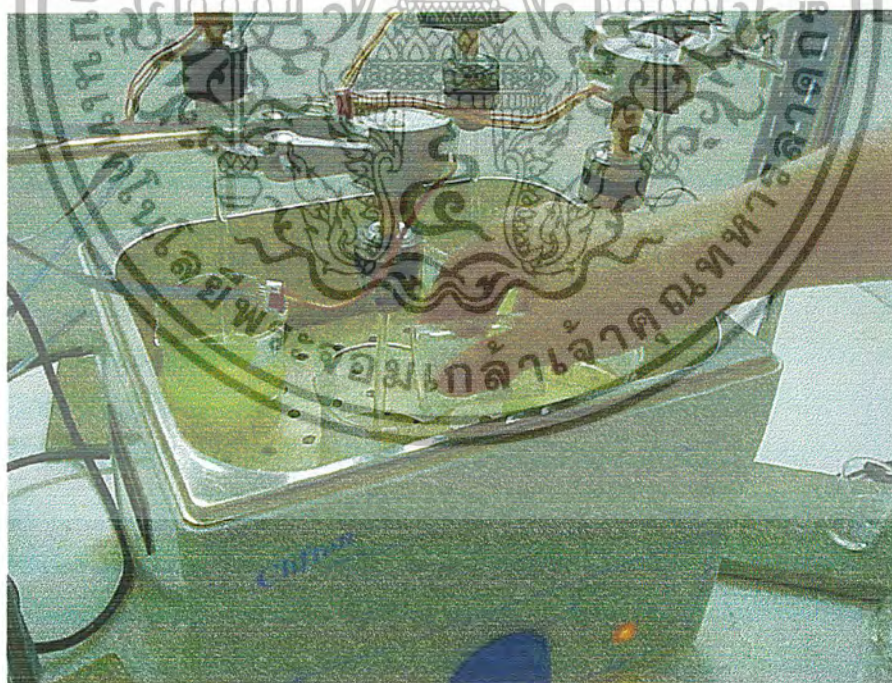
16. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิค่าใช้กระดุนที่ความยาวคลื่น ในช่วงอัลตราไวโอเลต

จากรูปที่ 3.1 เป็นชุดอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีอานสารละลายเคมี ซึ่งประกอบไปด้วยชุดสเคปโป๊วงเคอร์, อ่างปรับอุณหภูมิ และสารละลายที่ได้เตรียมไว้แล้วในบีกเกอร์ และขวดรูปชมพู่ ซึ่งที่ภายในอ่างปรับอุณหภูมิถูกปรับอุณหภูมิไว้ที่ 80 °C และเมื่อทำการเทสารละลายลงในบีกเกอร์ภายในอ่างปรับอุณหภูมินี้แล้ว สารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาจะมีสีเหลืองคังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

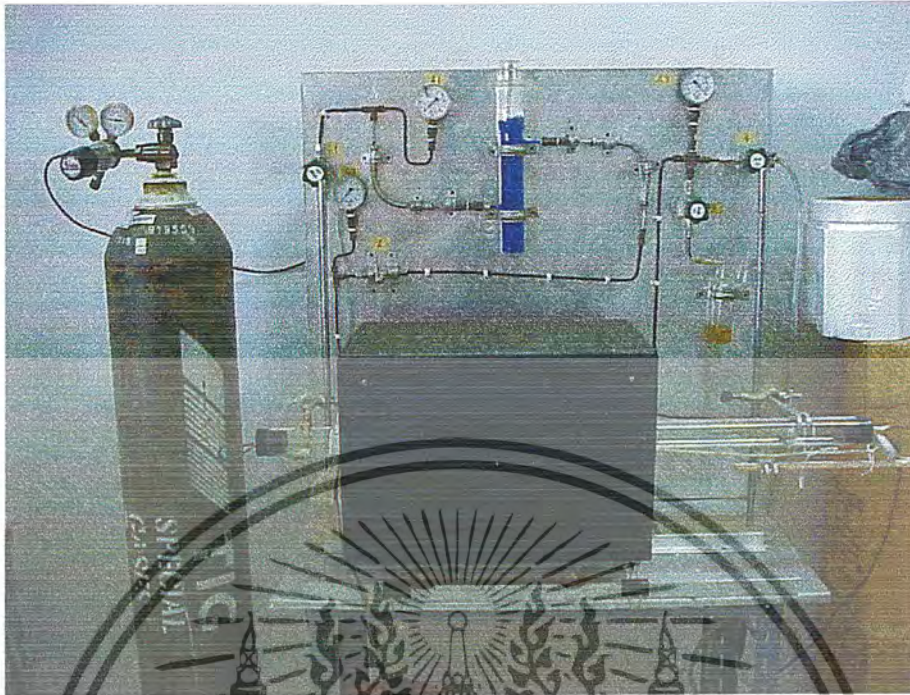


รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี



รูปที่ 3.2 แสดงสีของสารละลายหลังการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงชุดอุปกรณ์การแอนนีสด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์

3.3 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่น

1. นำฟิล์มบาง $Cd_xZn_{1-x}S$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$ ตามลำดับ ทั้งที่กรณีมีการแอนนีสและไม่มีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที นำมาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินนำไฟฟ้าแฉกบนผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยแบ่งระยะห่างของจุดที่แฉกให้เท่ากันจำนวน 2 จุด หรือ 2 เส้น ขนานกันเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า

2. ต่อวงจรดังรูป 3.4 โดยให้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงต่อที่ขั้ว 1 และ 2 แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 1 และ 2 เช่นเดียวกัน และใช้อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610CR วัดกระแสที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้กับวงจร

3. นำแผ่นชิ้นงานใส่แผ่นกล่องโลหะเพื่อลดสัญญาณรบกวนทำการจ่ายแรงดันให้กับวงจรโดยใช้แบตเตอรี่ก้อน จำนวน 24 ก้อน แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ตกรวมที่ขั้ว 1 และ 2 ด้วยโวลต์มิเตอร์ และ บันทึกค่ากระแสที่ไหลภายในวงจรจากเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์วัดค่ากระแสได้ ในช่วงค่า $10^{-3} - 10^{-11} A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร โดยการเปลี่ยนแรงดันจากแบตเตอรี่ 1 ก้อนซึ่งมีค่าประมาณ 1.5 โวลต์เป็นแบตเตอรี่ 12 ก้อนต่ออนุกรมกัน ทำให้แรงดันเปลี่ยนเป็น 18 โวลต์ เปลี่ยนจนกระทั่งแบตเตอรี่ต่ออนุกรมกันครบ 22 ก้อน จะทำให้มีค่าแรงดันเป็น 33 โวลต์ ซึ่งในการเพิ่มแบตเตอรี่แต่ละครั้งจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่ามากขึ้น และ ทำการบันทึกค่าความต่างศักย์และกระแส โดยทำการวัดค่าความต้านทานและกระแสประมาณ 10 ค่า

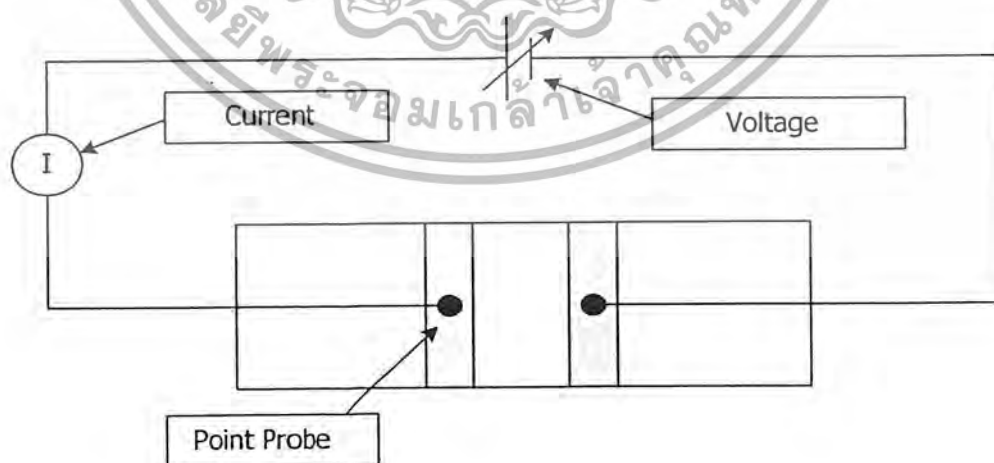
5. จากนั้นฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH ความเข้ม 100 mW/cm^2 ให้กับฟิล์มบาง โดยแหล่งจ่ายแรงดันยังคงเป็นแบตเตอรี่ก้อนและทำการวัด โวลต์ด้วย โวลต์มิเตอร์ และ วัดกระแสด้วย อิเล็กโตรมิเตอร์

6. นำข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยให้กระแสเป็นแกน x และ ความต่างศักย์เป็นแกน y

7. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ สามารถที่จะหาความต้านทานของฟิล์มบางได้จากสมการ

$$R_s = \frac{V \cdot (W)}{I \cdot (L)} \quad (3.1)$$

โดยที่ W = ความกว้างของฟิล์มบาง
 L = ความห่างระหว่างขั้ว 1 และ 2
 V/I = ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน



รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่เตรียมได้

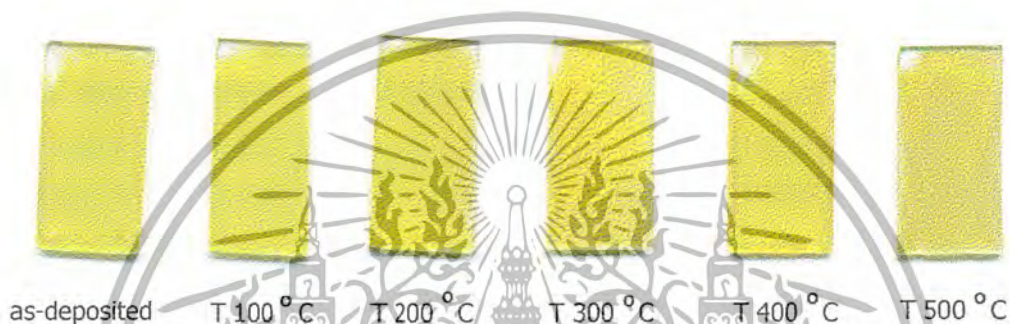
จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ Zn ที่ $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$ ตามลำดับ จะพบว่า หลังจากเทสารละลายลงไปแล้วในตอนแรกจะเกิดสีขาวขุ่น และจะกลายเป็นสีเหลือง ในเวลาต่อมาโดยเมื่อมีปริมาณของ Zn มากขึ้นจะทำให้สีของสารละลายในบีกเกอร์อ่อนลงตามลำดับสัดส่วนของ Zn และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลงด้วย แต่เมื่อทำการวัดค่า pH จะมีค่าประมาณเท่าเดิมที่ทุกๆอัตราส่วนของ Zn และหลังจากใช้เวลาในการเคลือบประมาณ 1 ชั่วโมง นำขึ้นตัวอย่างออกจากบีกเกอร์ที่มีสารละลายอยู่จะพบว่ามีคอลลอยด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เกาะติดอยู่บนฟิล์มบาง นำขึ้นกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบมาแล้วไปล้างเอาคอลลอยด์ที่ติดอยู่เนื่องมาจากกระบวนการโฮโมจีเนียส (homogeneous) ที่จากการศึกษามาแล้วมีโครงสร้างเป็นแบบ คิวบิก [4] ให้หลุดออกไปโดยเครื่องอัลตราโซนิก (ultra sonic) โดยจะสันจนกว่าคอลลอยด์ที่ติดหน้าฟิล์มบางหลุดออกไปจนหมด เมื่อได้ฟิล์มบางแล้วจะเห็นว่าฟิล์มบางจะมีสีอ่อนลงเมื่อปริมาณอัตราส่วนของ Zn มากขึ้น ดังแสดงในรูป 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [1-4,14-20]



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ค่า $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95$ และ 1.0 เมื่อไม่ได้มีการแอนนีก

4.2 พิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

นำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบจนหนาตามที่ต้องการนำฟิล์มบางที่ได้ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400, 500 °C ตามลำดับจะพบว่าฟิล์มบางที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นแต่มีความมันวาวลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลสูงขึ้น ดังแสดงในรูป 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [1-4,14-20]



รูปที่ 4.2 พิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

4.3 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ของ CdS , ZnS และ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ค่า x ต่างๆ และต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C ว่ามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอย่างไรบ้างดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน

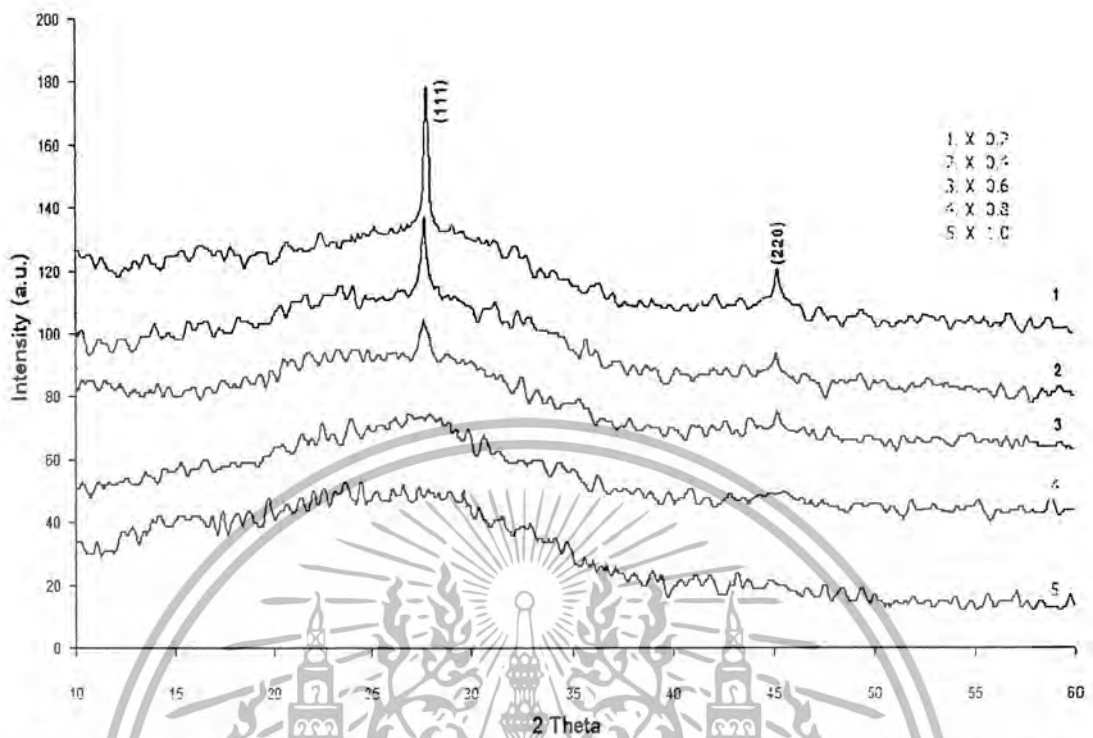
รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆในกรณีไม่ได้แอนนัล ส่วนรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง ทั้งกรณีไม่ได้แอนนัล และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ที่มีปริมาณของ Zn เท่ากับ 20% และ 40% ตามลำดับ สำหรับกรณีปริมาณ Zn เท่ากับ 20% จะปรากฏพีคการเลี้ยวเบน 2 พีค ที่มีความเข้มมากที่สุดอยู่ที่มุม 2θ ประมาณ 27 องศาและที่ความเข้มน้อยจะอยู่ที่มุม 2θ ประมาณ 45 องศา พีคที่มีความเข้มสูงอาจเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

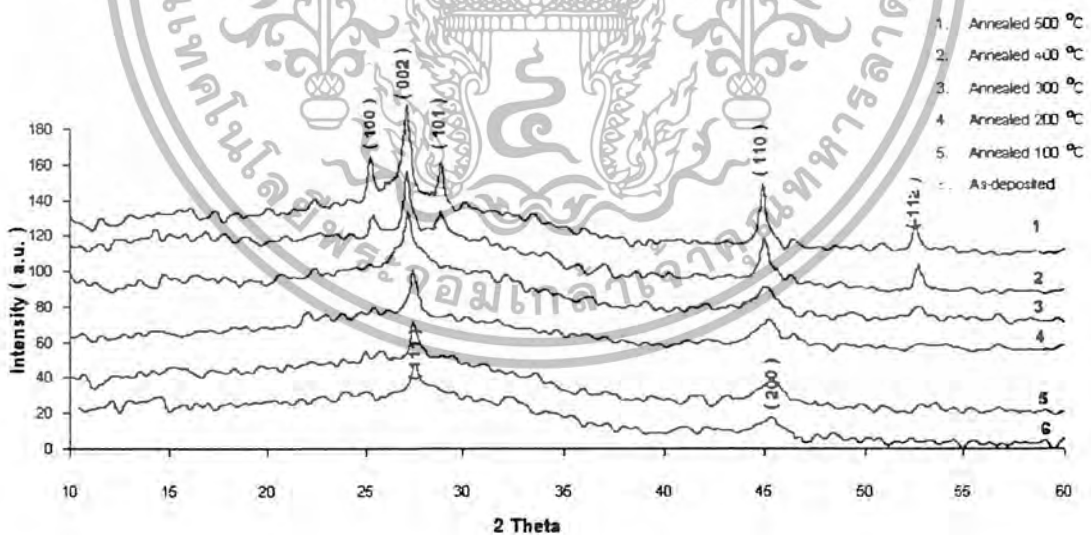
จากการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H หรือ (111)C ส่วนพิกที่ความเข้มน้อยอาจเกิดจากการเลี้ยวเบนของระนาบ (110)H หรือ (200)C และเมื่ออุณหภูมิการแอนนیلเพิ่มมากขึ้นความเข้มของทั้ง 2 พิกนี้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่มุมของการเลี้ยวเบน 2θ จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400°C พิกจะปรากฏมากขึ้นที่มุมเลี้ยวเบนประมาณ 25, 27, 29 องศา ซึ่งระบุได้ว่าเป็นพิกของระนาบการเลี้ยวเบน (100)H, (002)H, และ (101)H ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล นอกจากนี้ยังพบที่มุมเลี้ยวเบนประมาณ 45 องศา และ 54 องศา เป็นพิกของระนาบ (110)H กับ (112)H แสดงว่าที่อุณหภูมิแอนนิลต่ำกว่า 400°C โครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก แต่เมื่อแอนนิลที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C จะเปลี่ยนเป็นแบบเฮกซะโกนอล แต่สำหรับฟิล์มบางที่มีปริมาณของ Zn มากกว่า 20% และยังไม่ได้แอนนิล ความเข้มของพิก หรือ (111)C มีแนวโน้มลดลง และตำแหน่งของพิกจะเลื่อนไปทางมุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น แต่สำหรับ (200)C ไม่ปรากฏให้เห็นชัดเจนนักและจากการที่พิกมีแนวโน้มลดลงและจะแผ่ออกมากขึ้น เนื่องจากขนาดของเกรนลดลง และเมื่อ $x > 0.7$ ฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนิล จะไม่ปรากฏพิกการเลี้ยวเบน ซึ่งแสดงถึง ความเป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อ $x > 0.5$ โครงสร้างผลึกอาจจะเปลี่ยนจากเฮกซะโกนอลเป็นคิวบิก [15] รวมทั้งอะตอม Zn จะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมของ Cd แบบสุ่ม ทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ในระดับจุลภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และถ้าที่เราเห็นพิก 1 พิก อาจมีสาเหตุมาจากระนาบ (002)H หรือ (111)C มีแนวโน้มขนานกับกับผิวหน้าของกระจกแผ่นรองรับ [16] อีกทั้งยังทราบอีกว่า ZnS ที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$ จะมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอล แต่อุณหภูมิต่ำกว่า 900°C จะเป็นโครงสร้างแบบคิวบิก [17] ซึ่งเป็นอาร์สไนต์สนับสนุนให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนผสม x เพิ่ม แล้วโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบาง $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ มีแนวโน้มจะเปลี่ยนจากเฮกซะโกนอลเป็นคิวบิกโดยที่เกรนมีขนาดลดลง [18]

เมื่ออัตราส่วนผสม $x \leq 0.7$ ฟิล์มบางจะเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอลที่อุณหภูมิแอนนิลประมาณ 400°C แต่ เมื่ออัตราส่วนผสม $x > 0.7$ พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อ $x=0.8$ อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสปรากฏที่ 500°C แต่เมื่อ $x \geq 0.9$ อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสสูงกว่า 500°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

นอกจากนี้เมื่อนำคอลลอยด์ของ $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ ที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์ที่เตรียมได้มาศึกษาโครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์คังภาคผนวกท้ายเล่ม พบว่า คอลลอยด์ที่เตรียมได้ มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

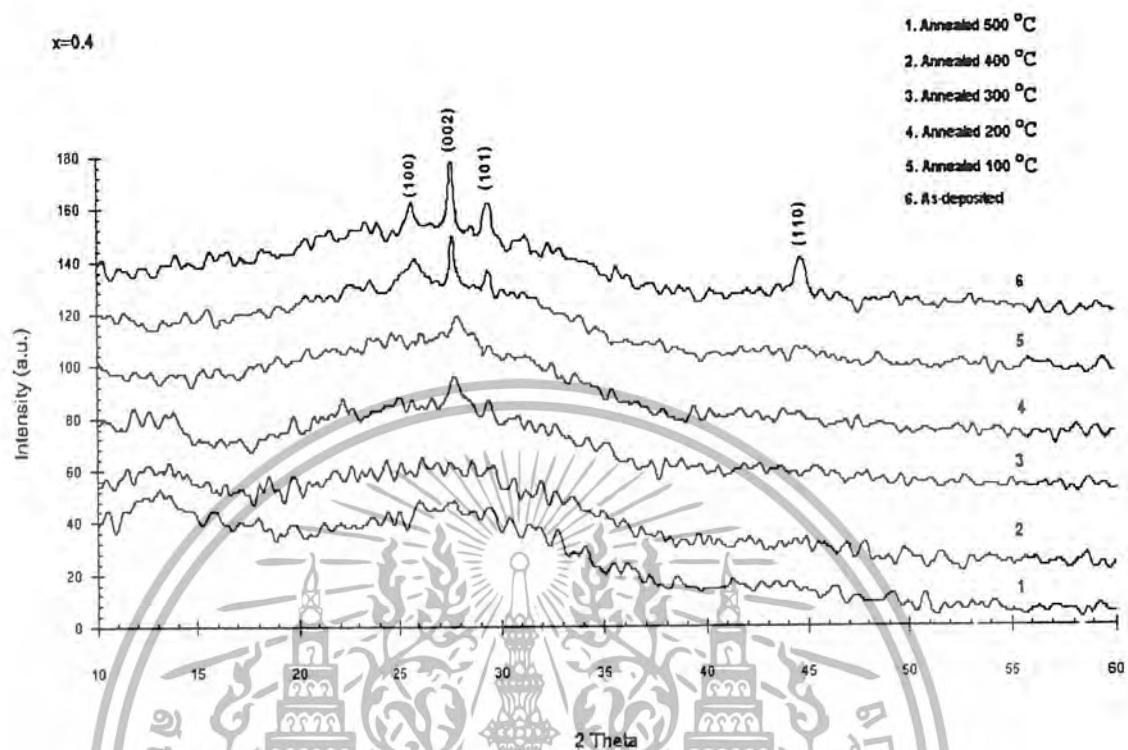


รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ x ค่าต่าง ๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล



รูปที่ 4.4 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ $x=0.2$ ทั้งกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

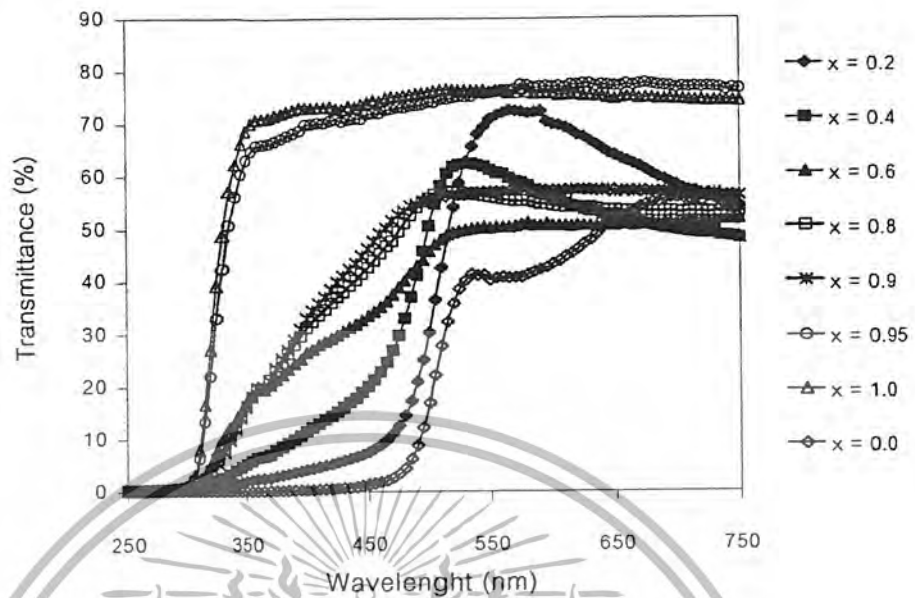
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



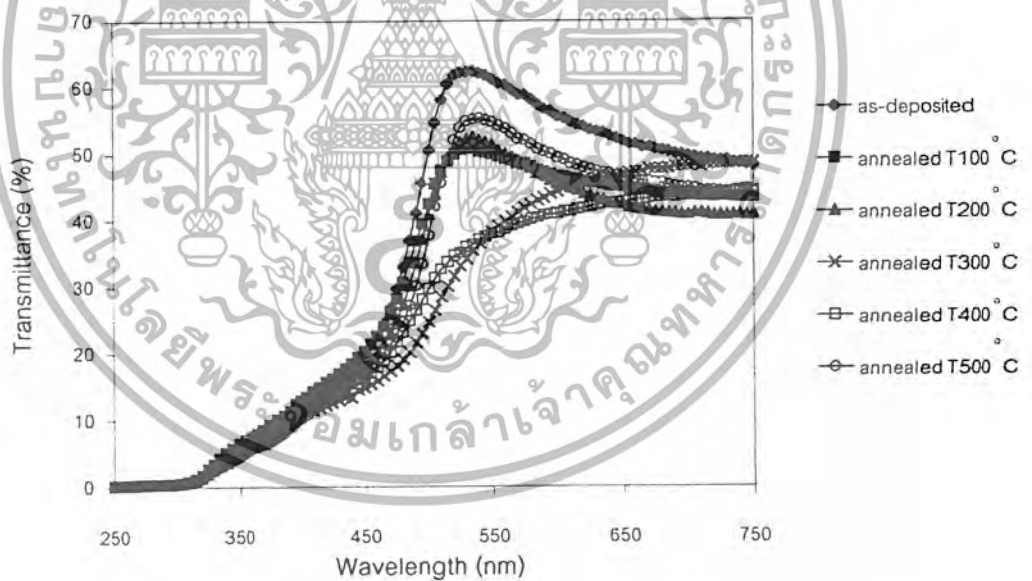
รูปที่ 4.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มีอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ x=0.4 ทั้งกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ในการศึกษาฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มีอัตราส่วนของซิงค์ต่างๆ กัน ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400, 500 °C ตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที โดยในการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง ที่ทำการทดลองนี้เราใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยูวี/วิสิเบิลชนิดดับเบิลบีม ซีห้อจัสโก้รุ่น 7800 ในการทดลองนี้เราจะใช้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-1000 nm. รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ Zn ในฟิล์มบางมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ขอบการดูดกลืนของแสงจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [1-4,15-16,19-24]



รูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส

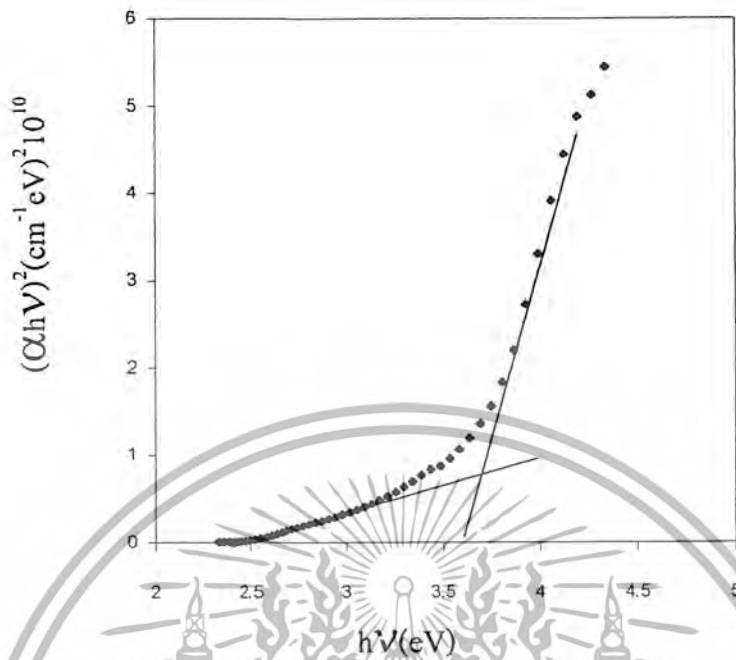


รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

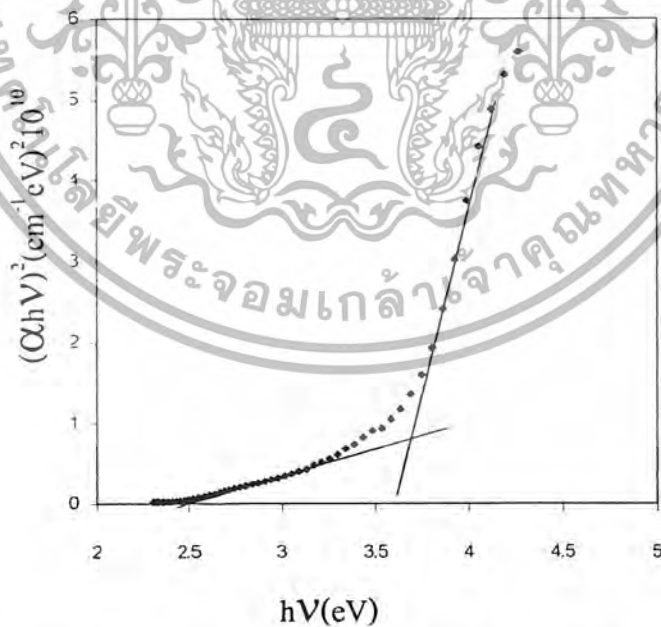
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนผสมของ Zn ในปริมาณ 0.4 ขอบการดูดกลืน (absorption edge) จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิของการแอนนียล ในช่วงอุณหภูมิแอนนียล 100-300 °C แต่ถ้าอุณหภูมิแอนนียลมากกว่า 300 °C จะทำให้ขอบการของการดูดกลืนเลื่อนกลับไปตรงความยาวคลื่นที่สั้นลง และที่อัตราส่วนผสมของ Zn อื่นๆ ก็จะได้ผลออกมาในทำนองเดียวกัน

จากกราฟการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เราจะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) แล้วหลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) และจากกราฟนี้สามารถหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ได้ โดยในการหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) นี้ หาได้โดยการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของส่วนกราฟที่เป็นเชิงเส้น ไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ($h\nu$) จุดตัดที่ได้คือค่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางและระบุได้ว่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง ผลที่ได้จากกรรทดลองที่ทำมานี้จะพบว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานมีสองค่าดังแสดงในรูป 4.8 – 4.13 และเมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100-300 °C จะมีค่าของว่างของพลังงานลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิของการแอนนียลเพิ่มขึ้นเป็น 400-500 °C ขนาดช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในตาราง 4.1 และเมื่อศึกษาในฟิล์มบางที่ปริมาณของ Zn มีอัตราส่วนต่างๆกันจะพบว่าเมื่อปริมาณของ Zn เพิ่มขึ้นหรือค่า x เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าของขนาดช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 2.48 – 3.87 eV ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของผู้อื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [1-4, 15-16, 19-24]

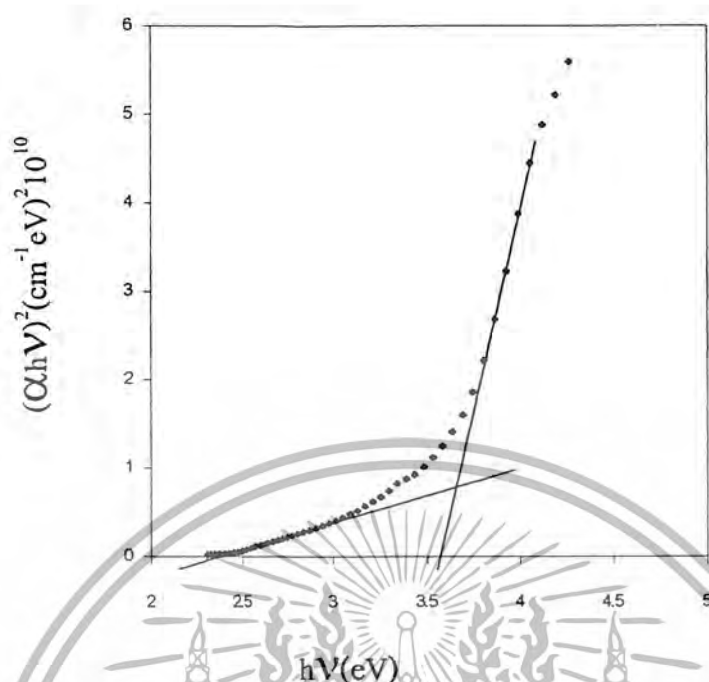


รูปที่ 4.8 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ เมื่อไม่ได้รับการแอนนัล

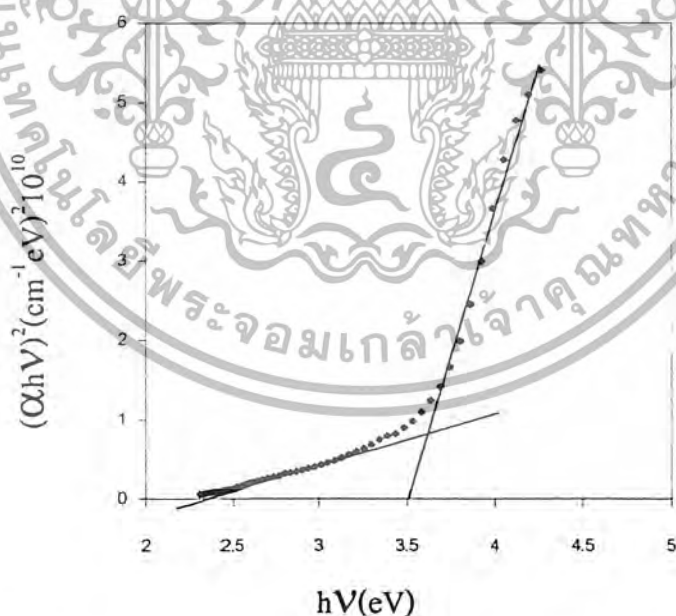


รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

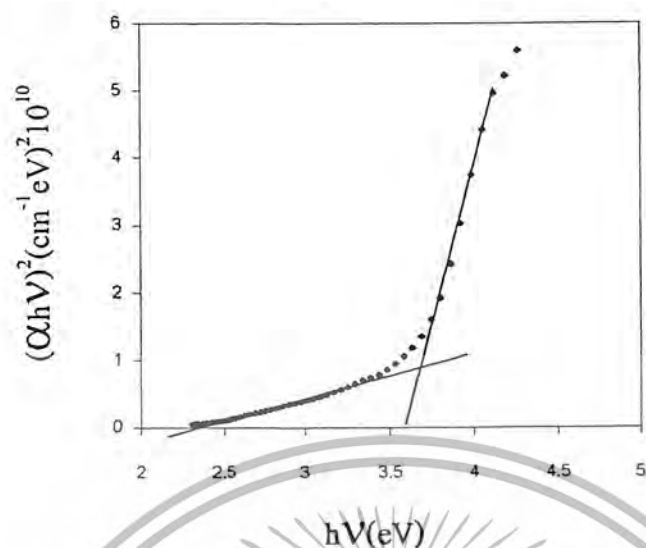


รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hV)^2$ กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $200^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

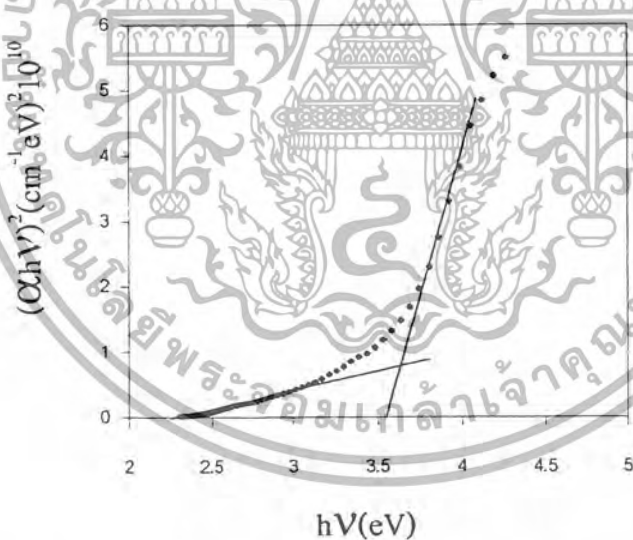


รูปที่ 4.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hV)^2$ กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $300^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

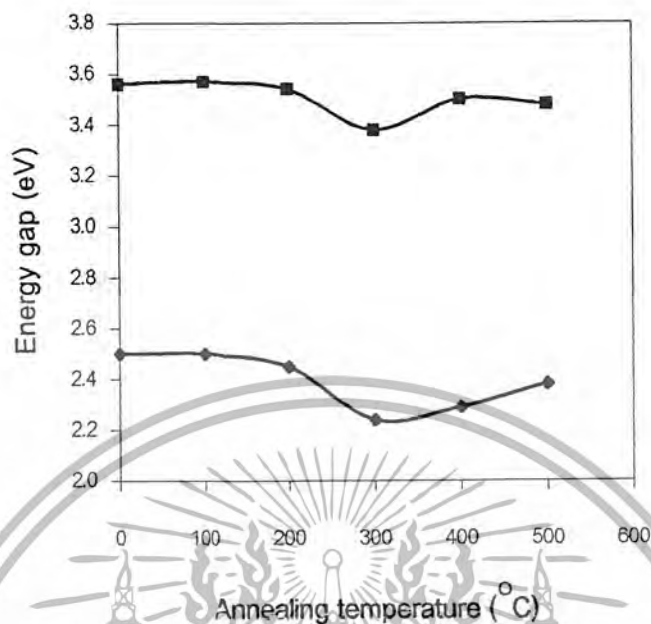


รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ทั้งกรณีที่ไม่ได้มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่แอนนีส (°C)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) (eV)
as-deposited	2.50 , 3.56
100	2.50 , 3.08
200	2.45 , 3.54
300	2.24 , 3.50
400	2.29 , 3.61
500	2.38 , 3.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (หน่วยเป็น eV) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนของ Zn ค่าต่าง ๆ เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

อัตราส่วนผสมของ Zn (x)	as deposited	อุณหภูมิแอนนีกัล ($^{\circ}C$)				
		100	200	300	400	500
0.2	2.37 / 3.19	2.46 / 3.07	2.20 / 3.09	2.15 / 2.73	2.27 / 3.04	2.25 / 3.08
0.4	2.50 / 3.56	2.50 / 3.08	2.45 / 3.54	2.24 / 3.50	2.29 / 3.61	2.38 / 3.48
0.6	2.32 / 3.71	2.42 / 3.69	2.47 / 3.66	2.34 / 3.76	2.35 / 3.45	2.26 / 3.66
0.8	2.70 / 3.73	2.66 / 3.76	2.63 / 3.74	2.43 / 3.60	2.45 / 3.60	2.45 / 3.75
0.9	2.76 / 3.68	2.77 / 3.74	2.63 / 3.71	2.43 / 3.61	2.39 / 3.74	2.41 / 3.38
0.95	3.90	3.86	3.80	3.81	3.88	3.79
1.00	3.92	3.89	3.88	3.85	3.90	3.87

ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ยังไม่ได้อันนีกัลจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนผสมของ Zn ค่าต่าง ๆ แต่สำหรับที่ส่วนผสมค่าใดค่าหนึ่ง ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีสองค่า ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาโมเมนตัมสปิน-ออร์บิทัล ของอิเล็กตรอน (spin orbit splitting) ส่งผลให้ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์แยกออกเป็นสองระดับพลังงาน ค่าช่องว่างแถบพลังงานจึงเป็นผลต่างของแถบนำ กับระดับพลังงานทั้งสองของแถบวาเลนซ์ [15]

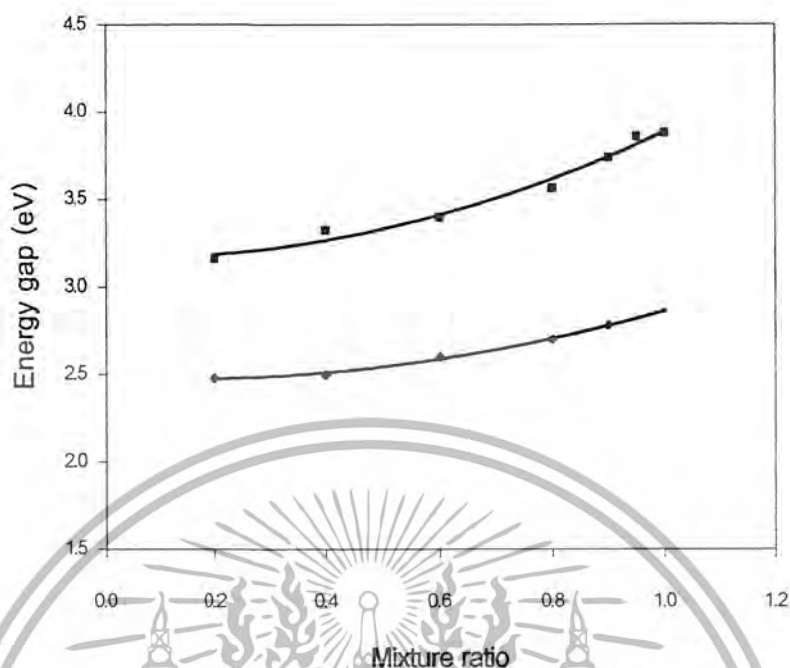
สำหรับรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_g กับอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$E_g = 0.77x^2 - 0.05x + 3.17$$

และ $E_g + \Delta S_0 = 0.51x^2 - 0.13x + 2.48$

เมื่อ ΔS_0 คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอันตรกิริยา ระหว่างโมเมนตัมสปิน-ออร์บิทัล ของอิเล็กตรอน จากกราฟรูปที่ 4.15 พารามิเตอร์ความโค้ง (bowing parameters) มีค่าเท่ากับ 0.77 และ 0.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



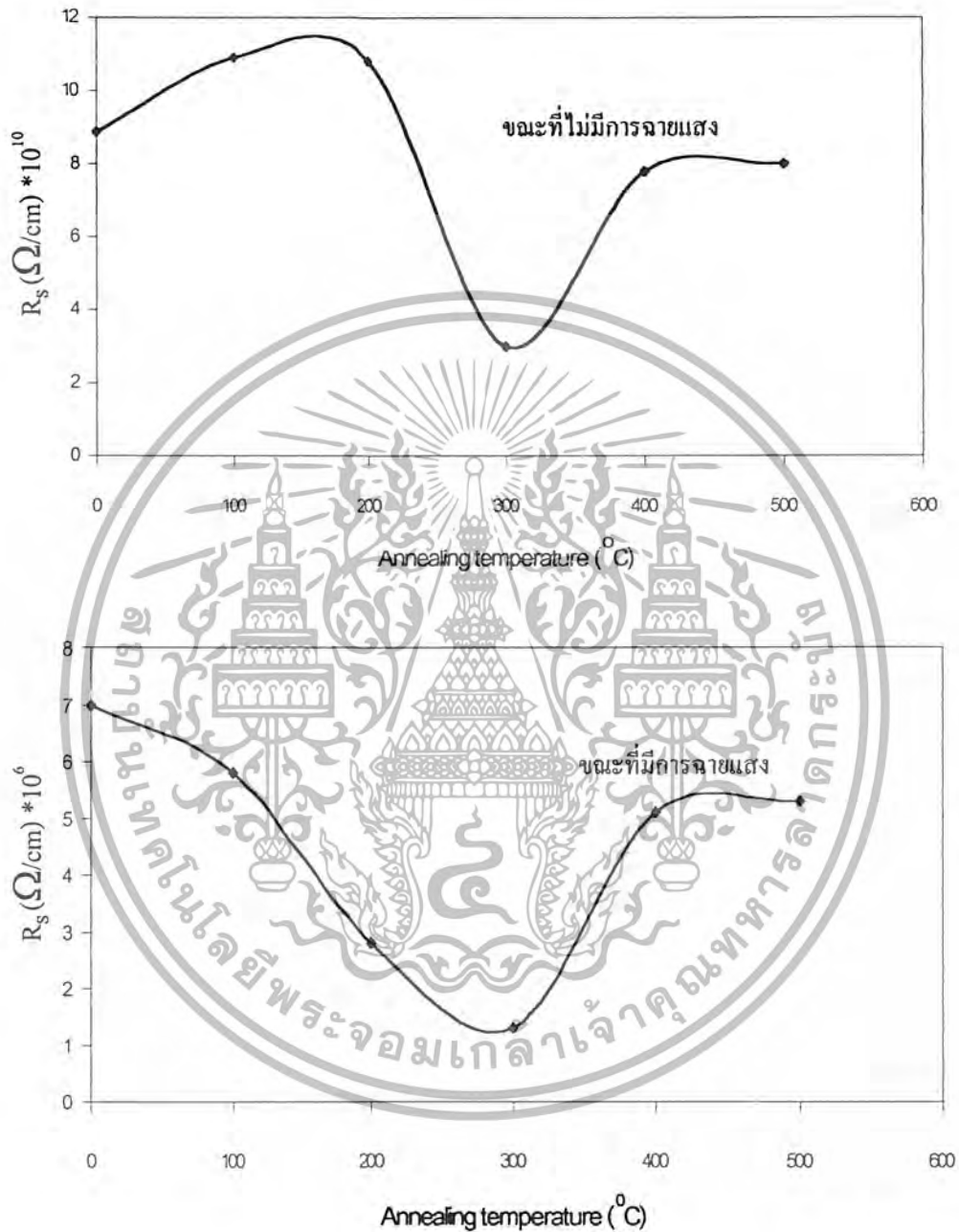
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn ค่าต่าง ๆ ของฟิล์มบาง $Cd_xZn_{1-x}S$ เมื่อไม่ได้อันเนล

4.5 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น

หลังจากแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่วัดได้ จะสามารถคำนวณหาความต้านทานแผ่นที่ส่วนประกอบของ Zn และอุณหภูมิของการแอนเนลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ต่าง ๆ กัน โดยในรูปที่ 4.16 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนเนลของฟิล์มบาง $Cd_xZn_{1-x}S$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ Zn เป็น 0.4 ที่ได้แอนเนลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH ที่ความเข้ม 100 mW/cm² ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการแอนเนลที่อุณหภูมิแอนเนล 200-300 °C ปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิในการแอนเนลสูงขึ้นจะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเนื่องมาจากขณะของเกรนใหญ่ขึ้นจะทำให้จำนวนขอบเขตของเกรนลดลง ทำให้กระแสไหลผ่านได้มากขึ้นและเมื่อมีการแอนเนลที่อุณหภูมิ 300 °C ความต้านทานแผ่นที่วัดได้จะมีค่าต่ำที่สุด และที่อุณหภูมิมากกว่า 300 °C ความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอะตอมในฟิล์มบางเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้น ปริมาณของอะตอม Cd และ S ใกล้เคียงสโตยชิโอเมตริ คีขึ้นแต่ในกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดไฟที่มีกำลังสูงจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจาก

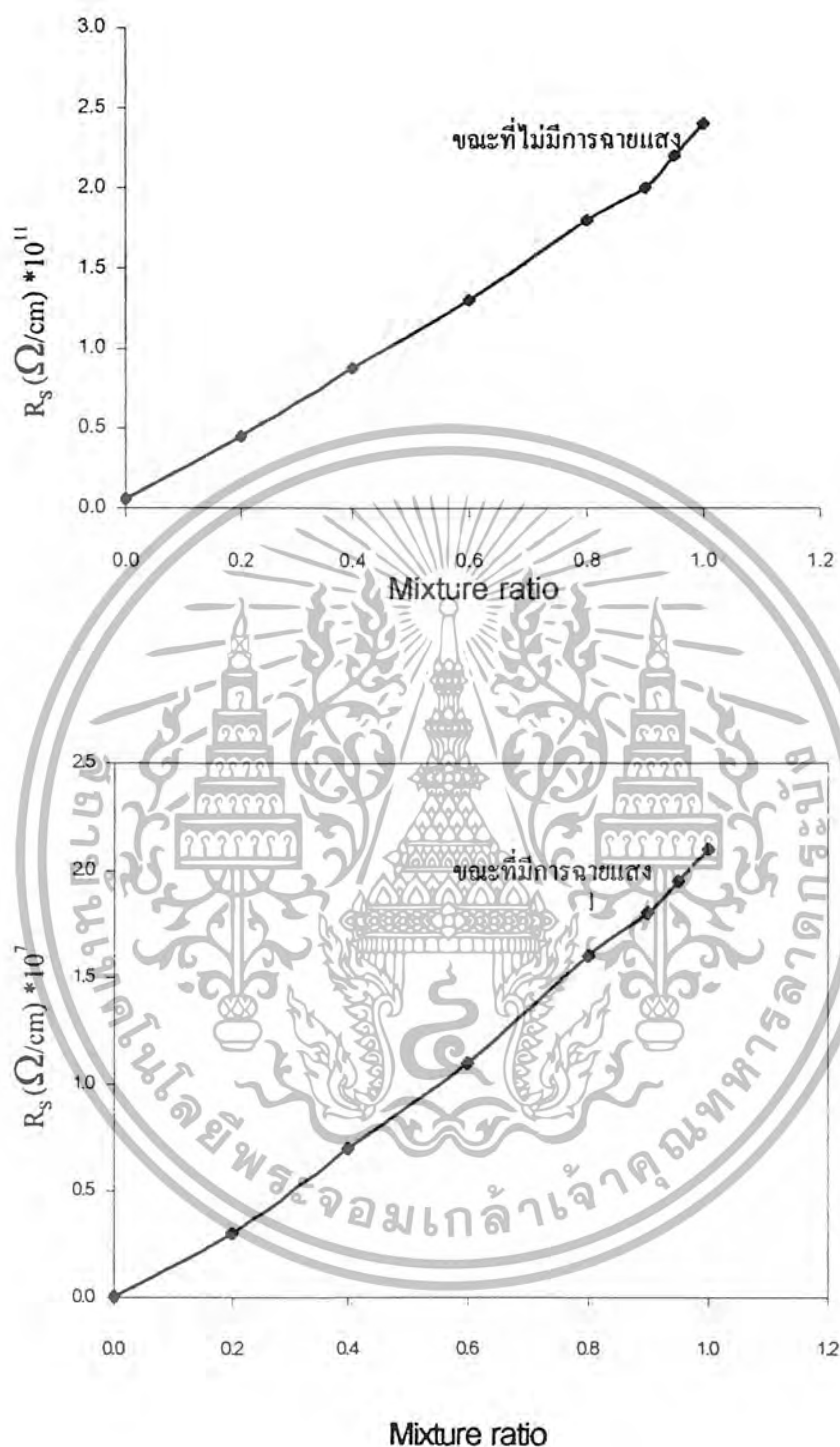
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบวาเลนซ์ให้ย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำซึ่งจะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ โดยจะทำให้ความต้านทานแผ่นมีค่าลดลง



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ในกรณีที่ไม่มี การ ฉาย แสง และในกรณีที่ มี การ ฉาย แสง กับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ ที่เตรียมได้เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 – 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นในกรณีที่ไม่มีแสง และในกรณีที่มีการกระจายแสง ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลกับอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง อัตราส่วนผสมต่างๆ ในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและในขณะที่มีการฉายแสงทั้งกรณีที่ไม่ได้มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 30 นาที

อุณหภูมิ แอนนีกัล (°C)	R_s (Ω/cm) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$							
	x = 0.2		x = 0.4		x = 0.6		x = 0.8	
	dark	illuminated	dark	illuminated	dark	illuminated	dark	illuminated
as-deposited	$4.5 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^6$	$9.7 \cdot 10^{10}$	$4.8 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{11}$	$1.1 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^7$
100	$3.2 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$5.7 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{11}$	$6.0 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^{11}$	$1.4 \cdot 10^7$
200	$2.4 \cdot 10^{10}$	$2.3 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$4.6 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^7$
300	$1.5 \cdot 10^{10}$	$2.0 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^{10}$	$1.3 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^{11}$	$3.5 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$1.1 \cdot 10^7$
400	$4.7 \cdot 10^{10}$	$2.3 \cdot 10^6$	$7.8 \cdot 10^{10}$	$5.1 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{11}$	$8.6 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^7$
500	$4.3 \cdot 10^{10}$	$2.2 \cdot 10^6$	$8.0 \cdot 10^{10}$	$5.3 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$8.3 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^7$

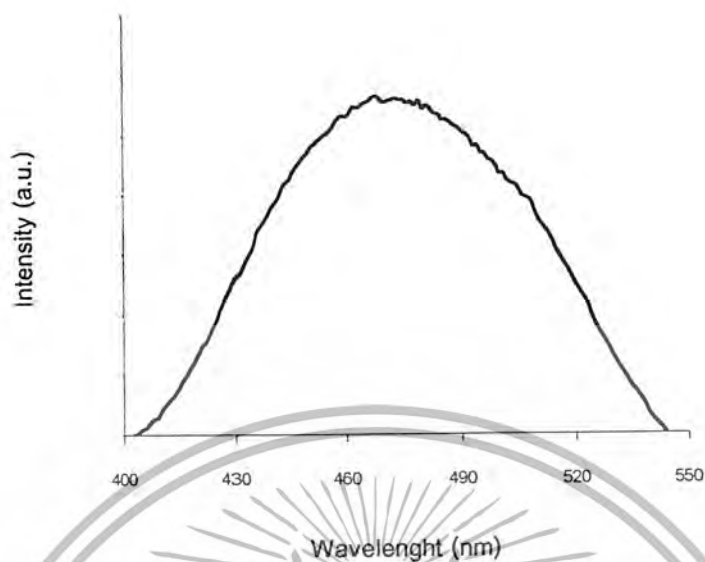
อุณหภูมิ แอนนีกัล (°C)	R_s (Ω/cm) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$					
	x = 0.9		x = 0.95		x = 1.0	
	dark	illuminated	dark	illuminated	dark	illuminated
as-deposited	$2.0 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^{11}$	$2.0 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^7$
100	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^7$
200	$1.4 \cdot 10^{11}$	$9.1 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^7$
300	$1.2 \cdot 10^{11}$	$6.7 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$1.0 \cdot 10^7$
400	$2.8 \cdot 10^{11}$	$9.8 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^7$	$2.3 \cdot 10^{11}$	$4.4 \cdot 10^7$
500	$2.5 \cdot 10^{11}$	$9.6 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^{11}$	$4.2 \cdot 10^7$

จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ Zn ใน $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มมากขึ้นเนื่องจากพันธะระหว่าง Zn กับ S สูงกว่าพันธะ Cd กับ S จึงทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของ ZnS สูงกว่า CdS ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลอิสระภายใต้ปริมาณของ Zn ที่มากขึ้นจะมีการตอบสนองต่อแสงลดลง เมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้นน่าจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลมาจากจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอน ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [1-4,15-19]

4.6 ผลการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์

ผลการทดลองการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ ที่กระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่อุณหภูมิประมาณ 10K แสดงดังรูปที่ 4.18 นั้นพบว่าแถบการเปล่งแสงมีลักษณะเป็นแถบกว้าง มีพีคอยู่ที่ความยาวคลื่น 480 nm. หรือสอดคล้องกับพลังงานเท่ากับ 2.58 eV. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ ที่ทดลองได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งจากผลของสเปกตรัมใกล้เคียงกับ สเปกตรัมการเปล่งแสงของผลึก $Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ รูปเข็ม ที่เคยมีผู้รายงานมาแล้ว [23] กล่าวคือลักษณะเป็นแถบกว้าง โดยมีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 450-500 nm. ซึ่งแถบการเปล่งแสงนี้น่าจะมาจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล โดยผ่านข้อบกพร่องของผลึกที่ปรากฏอยู่บนผิวของฟิล์มบาง นอกจากนี้ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ ZnS ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ยังแสดงออกมาว่าแถบการเปล่งแสงกว้าง โดยมีตำแหน่งของพีคอยู่ที่ 448 nm. หรือที่พลังงาน 2.77 eV. ซึ่งก็คือการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบนำลงมายังแถบวาเลนซ์ ดังจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของพีคที่พลังงาน 2.77 eV. มีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnS [24] ซึ่งอาจแสดงได้ว่าภายใต้การฉายแสงกระตุ้น จุดสมมูลของโครงสร้างผลึกแบบจำลองคอนฟิกูเรชันนัล โคออร์ดิเนต (configurational coordinate) จะเลื่อนตำแหน่งไปจากตำแหน่งสมมูลที่ขณะที่ไม่มีการกระตุ้น [12]



รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}$ เมื่อไม่ได้มีการแอนนیلเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในโครงการวิจัยนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ $Cd_xZn_{1-x}S$ โดยมีอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0$ โดยเทคนิคการอบสารละลายเคมีซึ่งปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้คือ $[CdSO_4 \cdot 8/3H_2O] + [ZnSO_4 \cdot 7H_2O]$, $SC(NH_2)_2$, NH_3 และ N_2H_5OH โดยมีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ 0.05 โมลาร์ 1.5 โมลาร์ และ 2.5 โมลาร์ ตามลำดับ ถูกนำมาทำปฏิกิริยากันในบีกเกอร์ขนาด 200 ml ซึ่งมีน้ำปอดประจุ 100 ml แล้วเท $[CdSO_4 \cdot 8/3H_2O] + [ZnSO_4 \cdot 7H_2O]$ ซึ่งทำละลายใน NH_3 ลงก่อน แล้วจึงเท $SC(NH_2)_2$ ที่ละลายในน้ำปอดประจุลงไปแล้วเทสารละลายไฮดรอกไซด์ N_2H_5OH ที่เตรียมไว้ตามลงไปจากนั้นเติมน้ำปอดประจุจนมีปริมาตรรวมให้ได้ 150 ml ค่า pH ประมาณ 11.6 และควบคุมอุณหภูมิภายในอ่างให้ได้ $80^\circ C$ ทำการหมุนแท่นยึดแผ่นรองรับตลอดเวลาด้วยอัตราความเร็ว 60 รอบต่อนาที จากนั้นนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ตามเงื่อนไขต่างๆไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400, $500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มบางของ $Cd_xZn_{1-x}S$ ที่เตรียมได้จะมีลักษณะสีเหลืองส้มและมีลักษณะโปร่งแสง

เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้สีของฟิล์มบางเข้มมากขึ้น สีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนไปเป็นสีเหลืองเข้มจนเป็นถึงสีส้มๆ และความเป็นมันวาวลดลง ซึ่งอาจจะเกิดเนื่องจากอะตอมของ S ระเบิดออกจากผิวหน้าของฟิล์มบาง ส่วนในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยานั้นพบว่า เมื่ออัตราส่วนของ Zn ที่ x เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลงสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของสารละลาย โดยเริ่มแรกจะเป็นสีเขียวเข้มเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนและสีเหลือง ในขั้นตอนสุดท้าย พบว่าเกิดเกลือสีขาวลอยอยู่ด้านบนของสารละลายจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ Zn ที่ x เพิ่มขึ้น โดยคาดว่าเกลือสีขาวนั้นเป็นคอลลอยด์ของ Zn หรือ $Zn(OH)_2$

เมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาการส่งผ่านทางแสงพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดมีลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง และขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเปลี่ยนไปซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอนนัลขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปดังกล่าวอาจเกิดมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้ [1-4,15-16,19-24]

1. ช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันย่อมมีค่าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อะตอมต่าง ๆ อยู่ผิดตำแหน่ง (disorder) จะเกิดส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail)
3. ผลของขนาดควอนตัม (quantum size effect) หรือขนาดของเกรน

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300°C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลจะส่งผลของขนาดของควอนตัมมีค่าน้อยหรือขนาดของเกรน โดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ฟิล์มยังไม่ได้แอนนัล ช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากที่สุด เนื่องจากฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็กมากจนกระทั่งผลของขนาดควอนตัมปรากฏออกมาให้เห็น (ส่วนเหตุผล ข้อ (1) และข้อ (2) ดูเหมือนจะไม่สอดคล้องกับผลของการทดลองที่ได้) อุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสจากคิสออร์เดอร์เป็นออร์เดอร์หรือจากโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเป็น โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล จะเกิดที่อุณหภูมิ 300°C หรือ 400°C และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิดังกล่าว อะตอมต่างๆ จะอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ลดปัญหาจากส่วนหางของแถบพลังงาน ซึ่งก็คือ ช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นแม้ว่าผลต่างช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกกับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลยังไม่ทราบแน่ชัด แต่เป็นไปได้ว่า ช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลมีค่ามากกว่าโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก CdS และ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ แต่สำหรับที่ส่วนผสมค่าใดค่าหนึ่ง ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ มี 2 ค่า ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง โมเมนต์ สปิน-ออร์บิทัล ของอิเล็กตรอน (spin-orbit splitting) ส่งผลให้ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์แยกเป็น 2 ระดับพลังงาน ค่าช่องว่างแถบพลังงานจึงเป็นผลต่างของแถบนำกับระดับพลังงานทั้ง 2 ของแถบวาเลนซ์ [1-4,15-16,19-24]

ความต้านทานแผ่น โดยการ วัดแบบสองขั้วจริงเส้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลเพิ่มมากขึ้นความต้านทานแผ่นจะมีแนวโน้มลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนัลประมาณ 300°C จากนั้นค่าความต้านทานแผ่นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ความต้านทานแผ่นอาจขึ้นกับปัจจัยอย่างน้อยสามประการ โดยประการแรกคือ แวแคนซีของอะตอม S ประการที่สองคือ การที่อะตอมอยู่ผิดตำแหน่ง และประการที่สามคือ ผลของควอนตัมหรือขนาดของเกรน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นทำให้จำนวนขอบเขตของเกรนลดลง ทำให้อิเล็กตรอนหรือ โฮล ไหลได้สะดวกขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลที่สูงกว่า 300°C โครงสร้างผลึกจะมีระเบียบเพิ่มขึ้น อะตอมที่อยู่ผิดตำแหน่งจะมีปริมาณลดลง ดังนั้นฟิล์มบางจะมีลักษณะเป็นสโตยคิโอมेटริเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อมีการฉายแสงที่มีกำลังสูงจะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานแผ่นลดลง[1-4,15,19]

ส่วนในกรณีที่อัตราส่วนผสมมีปริมาณของ Zn เพิ่มมากขึ้น ทั้งขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ Zn ใน $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ มีค่าเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแผ่นจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องมาจากพันธะระหว่าง Zn กับ S สูงกว่าพันธะ Cd กับ S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของ ZnS สูงกว่า CdS ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลอิสระจึงมีจำนวนน้อยลงตามปริมาณของ Zn ที่เพิ่มขึ้นการตอบสนองของแสงจะมีค่าลดลง [1-4,15,19]

เมื่อศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ ที่กระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่อุณหภูมิ 10K พบแถบการเปล่งแสงมีลักษณะเป็นแถบกว้าง มีพีคอยู่ที่ความยาวคลื่น 480 nm. หรือสอดคล้องกับพลังงานเท่ากับ 2.58 eV. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ ที่ทดลองได้ ซึ่งแถบการเปล่งแสงนี้ น่าจะมาจาก การรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลโดยผ่านข้อบกพร่องของผลึกที่ปรากฏอยู่บนผิวของฟิล์มบาง

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี พบเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- ไม่ควรให้ผิวหน้าของกระจกสไลด์สัมผัสกับสิ่งต่างๆ เพราะจะทำให้บริเวณผิวหน้าของกระจกสไลด์สกปรก
- คุณภาพของฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับกรกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ด้วยกรด HF เจือจาง ดังนั้นเวลากัดผิวหน้าต้องระวังไม่ให้กระจกสไลด์ซ้อนทับกัน มิฉะนั้นกระจกสไลด์จะถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น
- ควรมีการศึกษาผลของการแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอื่นๆ เช่น Ar, H_2S ว่ามีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์หรือไม่อย่างไร
- ควรมีการศึกษาสารเจือตัวอื่นๆว่ามีกระทบอย่างไรกับฟิล์มบาง CdS และมีวิธีการอย่างไรที่จะปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบางให้ดีขึ้น
- ควรควบคุมอุณหภูมิในบีกเกอร์ให้คงที่ เพื่อฟิล์มจะได้เกาะกระจกสไลด์ดีขึ้น
- ควรทำการทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้าหรือสมบัติทางแสงให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียมฟิล์มบางได้ เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้าของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Yamaguchi , T. , Yamamoto , Y. , Tanaka , T. and Yoshida , A. , “Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Film by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Device” , Thin Solid Films 343-344 , (1999) : 516-519.
2. Dona , J.M. , Herrero , J. , “Chemical Bath Co-deposited CdS-ZnS Film Characterization “ , Thin Solid Films 268 , (1995) : 5-12.
3. Yamaguchi , T. , Yamamoto , Y. , Tanaka , T. , Demizu , Y. and Yoshida , A. , “(Cd,Zn)S Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Device” , Thin Solid Films 281-282 , (1996) : 375-378.
4. จามนิตย์ แก้วแดง , จิตินัย แก้วแดง , ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ , ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_xZn_{1-x}S เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
5. Cullity , B.D. , in Elements of X-ray Diffraction , pp.9-14 , Addison-Wesley Publishing Company Inc. ,1956.
6. Sze,S.M., in Physics of Semiconductor Devices , 2nd ed. , pp.8-11 , John Wiley & Sons Inc. ,1956.
7. Kittel , C. , in Introduction to Solid State Physics , 4th ed. , pp.4-32 , 46-48 , 56-60 , 364-365 , 540-552 , 611-612 , John Wiley & Sons Inc. , New York 1971.
8. สิงหเดช แดงจง , “การเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการเคลือบแบบออบสการละลายเคมี” , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์บัณฑิต มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.
9. Abelas , F. , in Optical Properties of Solids , pp. 23-40 , North-Holland , London , 1972 .
10. Runyan , W.R. , in Semiconductor Measurement and Instrumentation , pp. 67-91 , Mc Graw-Hill , Bombay , New York , 1975.
11. Anthony R. West,1989, in Solid State Chemical and It's Application , pp.412-418, Singapore,John Wiley&Sons.
12. J Wiley , J. and J.F.B. Hawks, J.F.B., 1989, in Optoelectronics,2nd. Pp.315-321, Singapore,Prentice Hall.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. สภากรณ์ ศรีสมุทร, อติสร เลิศชัย, “การเตรียมและศึกษาคุณสมบัติ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี ZnS ในปริมาณสูง”, โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
14. O'Brien, P., Mcalcese, J., “Developing an Understanding of the Processes Controlling the Chemical Bath Deposited of ZnS and CdS”, J., Mater. Chem 8, (1998) :2309-2314.
15. Al Kuhaimi S.A. and Tulbah Z., “Structural, Compositional, Optical, and Electronical Properties of Solution-Grown $Zn_xCd_{1-x}S$ ”, Journal of Electrochemical Society 147 (1), (2000) : 214-218.
16. Ichimura, M., Goto, F. and Arai, E., “Structural and Optical Characterization of CdS Films Grown by Photochemical Deposition”, J., Appl. Phys, 85(10), (1999) : 7411-7414.
17. Zehe.A. and Vazquez Luna J.G., “Magnetic Field Influenced Growth Kinetics in Chemical CdS Thin-Film Deposition”, Solar Energy Material & Solar Cell 68, (2001): 217-226.
18. Ray S.C., Karanjai M.K. and Gupta, D.D., “Deposited and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Film Prepared by the Dip Technique”, Thin Solid Films 322, (1998):117-122.
19. Tomas, S.A. and Vigil, O., “Influence of Thermal Annealing in Different Atmospheres on the Band-Gap Shift and Resistivity of CdS Thin Films”, J., Appl. Phys, 78, (1995) :2204-2207.
20. Oladeji I.O. and Chow L., “A Study of the Effects of Ammonium Salts on Chemical Bath Deposited Zinc Sulfide Thin Films”, Thin Solid Films 399, (1999):184-153.
21. Vidal J., Vigil O., De Melo, Lopez N. and Zeleya-Angel, O., “Influence of NH_3 Concentration and Annealing in the Properties of Chemical Bath Deposited ZnS Films”, Material Chemistry and Physics 91, (1999):139-142.
22. Lee, J.H., Lee, H.Y., kim, J.H. and Park, Y.K., “Heat Treatment of Boron Doped CdS Films Prepared by Chemical Bath Deposition for Solar Cell Application”, Jpn.J.Appl.Phys. 39, (2000) :1669-1674.
23. Zhou, S.M., Feng, Y.S. and Zhang, L.D., “Growth and Optical Characterization of Large Scale Crystal $Cd_{1-x}Zn_xS$ Whiskers Via Vapor Reaction”, J. Crystal Growth, 252, (2003) : 1-3.
24. Malik M.A., O'Brian, P. and N.Reva Prasadu, “Synthesis of TOPO-Capped Mn-Doped ZnS and CdS Quantum Dots”, Journal of Materials Chemistry, (2001):2382-2386.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 49-1302 Radiation = 1.540598 Quality : High

(Cd _{0.8} Zn _{0.2})S		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		24.838	69	1	0	0
		28.527	48	0	0	2
		28.204	100	1	0	1
		38.649	27	1	0	2
		43.738	45	1	1	0
		47.870	39	1	0	3
		50.928	8	2	0	0
		51.873	31	1	1	2
		52.854	19	2	0	1
		54.628	3	0	0	4
		58.300	3	2	0	2
		60.881	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	8	1	0	5

Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.13750 c = 6.71580 Z = 2	Mol. weight = 135.06 Volume [CD] = 99.58 D _x = 4.506
--	---

SAMPLE PREPARATION : Cd Cl₂ , Zn Cl₂ 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 _{7.23} Zn _{2.77} S ₁₀		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		25.502	51	1	0	0
		27.081	100	0	0	2
		28.776	43	1	0	1
		37.442	5	1	0	2
		44.833	61	1	1	0
		48.902	10	1	0	3
		52.230	2	2	0	0
		55.696	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 = 6.58800 Z = 0	Mol. weight = 1314.43 Volume [CD] = 63.21 D _x = 4.683
--	--

COLOR : Yellow
 GENERAL COMMENTS : Pigment.
 SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO₃)₂ 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=6.713-0.00458 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 40-835

Radiation = 1.540598

Quality : Not indexed

$Cd_{0.05}Zn_{1.95}S_{10}$		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	
Cadmium Zinc Sulfide		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	38	1	0	3	
		51.847	10	2	0	0	
		55.404	3	0	0	4	
		118.784	3	3	1	3	
		148.514	3	3	0	6	
		147.575	2	3	2	1	
		159.350	3	3	1	5	
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 $Cd(N_2O_3)_2$ 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: $a = 4.131 - 0.001314 P$; $c = 6.173 - 0.00458 P$; $s = 0.004$, where $P = \text{mole \% ZnS}$, $s = \text{standard deviation}$.

Pattern : 24-1137

Radiation = 1.540598

Quality : Deleted

$Zn_{0.9}Cd_{0.1}S$		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	
Sphalerite, cadman, syn / Zinc Cadmium Sulfide		28.486	100	1	1	1	
		32.952	10	2	0	0	
		47.280	50	2	2	0	
		58.103	30	3	1	1	
		68.806	2	2	2	2	
		69.115	5	4	0	0	
		76.372	10	3	3	1	
		78.690	2	4	2	0	
		87.889	10	4	2	2	
		94.855	8	5	1	1	
		106.559	3	4	4	0	
		113.900	5	5	3	1	
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216) a = 5.43400 Z = 4		Mol. weight = 102.14 Volume [CD] = 160.46 Dx = 4.228 V _{cor} = 6.40					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

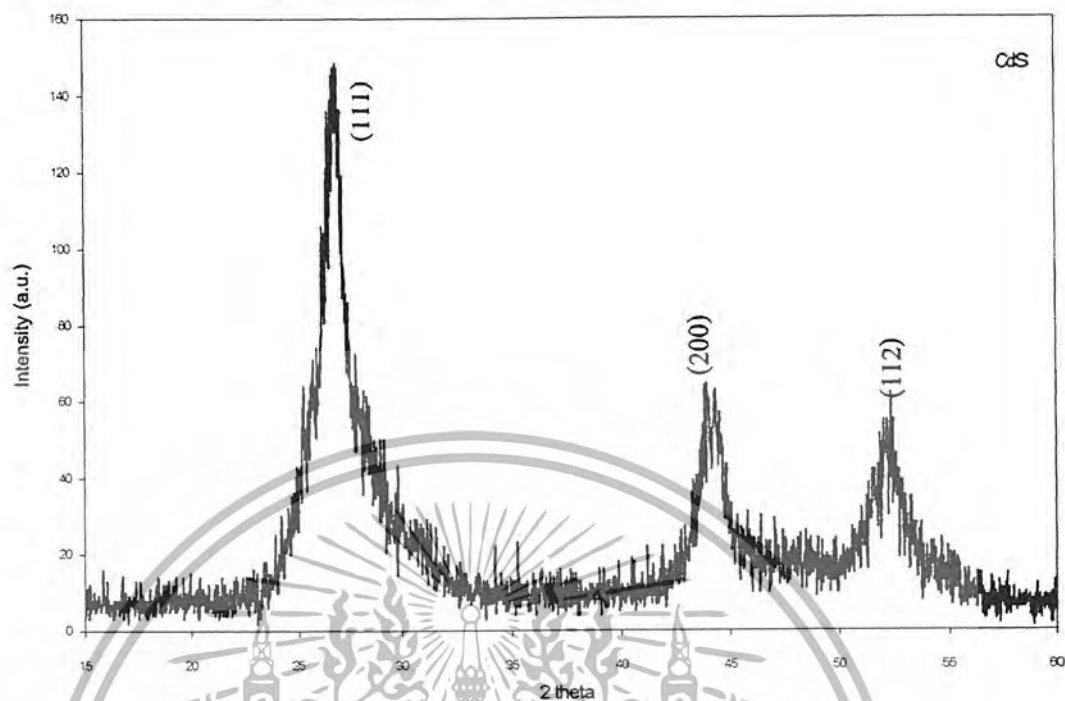
Pattern : 5-566		Radiation = 1.540598		Quality : Indexed		
Zn S		2 θ	I	h	k	l
Sphalerite, syn / Zinc Sulfide blende zinc blende		28.559	100	1	1	1
		33.090	10	2	0	0
		47.518	51	2	2	0
		56.290	30	3	1	1
		59.137	2	2	2	2
		69.524	6	4	0	0
		76.809	9	3	3	1
		79.157	2	4	2	0
		88.582	9	4	2	2
		95.541	5	5	1	1
		107.415	3	4	4	0
		114.909	5	5	3	1
		128.618	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 = 97.44 Volume [CD] = 157.99 D _x = 4.097 D _m = 3.900 M _{hcor} = 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, Shropshire, England: RR2R=16.7, Disp.=16, VHN100=218-227, Color values .303, .309, 18.6, Ref: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. GENERAL COMMENTS : Measured density and color from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 1211. COLOR : White, yellow white						

Pattern : 24-1136		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Zn _{0.9} Cd _{0.1} S		2 θ	I	h	k	l
Wurtzite, cadmium, 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
		47.280	70	1	1	0
		51.502	65	1	0	3
		55.187	10	2	0	0
		56.068	45	1	1	2
		57.248	15	2	0	1
		58.683	1	0	0	4
		63.204	8	2	0	2
		66.651	1	1	0	4
		72.481	20	2	0	3
		75.588	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
		87.989	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 D _x = 4.223 M _{hcor} = 2.90				
GENERAL COMMENTS : (002) may be observed as the strongest reflection due to preferred orientation.						

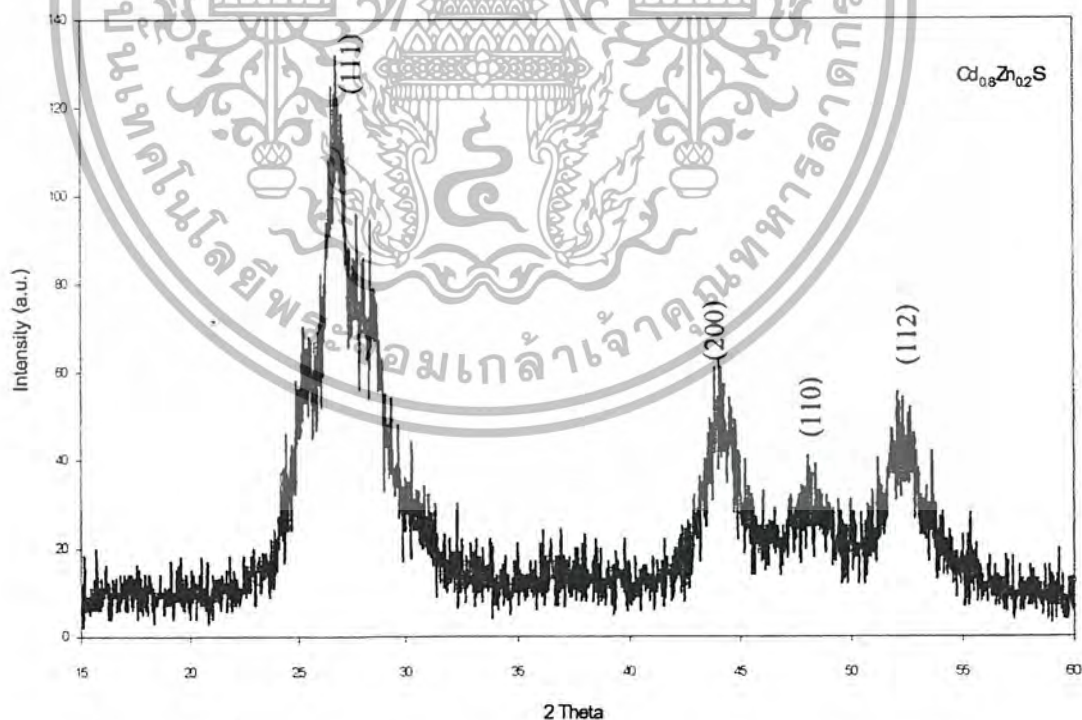
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 36-1450		Radiation = 1.540598		Quality : High		
Zn S		2 θ		<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Wurtzite-2H, syn / Zinc Sulfide		26.915	100	1	0	0
		28.501	84	0	0	2
		30.528	87	1	0	1
		36.811	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
		57.581	12	2	0	1
		59.008	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	9	0	0	6
		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	6
		114.960	6	2	2	2
		115.052	2	3	1	1
		117.413	1	3	0	4
		121.089	8	2	1	5
		122.001	3	3	1	2
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 3.82098 c = 6.25730 Z = 2		Mol. weight = 97.44 Volume [CD] = 79.12 Dx = 4.090 Dm = 4.090				
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, Q=2.378, Sign+ GENERAL COMMENTS : Optical data on synthetic material. COLOR : Colorless						
Pattern : 75-1534		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Zn S		2 θ		<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Wurtzite / Zinc Sulfide		27.074	100	1	0	0
		28.634	62	0	0	2
		30.701	95	1	0	1
		39.814	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
		63.935	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
		82.780	9	1	0	5
		83.647	4	2	1	2
		85.844	<1	2	0	4
		89.209	6	3	0	0
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 3.80000 c = 6.23000 Z = 2		Mol. weight = 97.44 Volume [CD] = 77.91 Dx = 4.154 Dm = 4.050 I/cor = 3.40				
ICSD COLLECTION CODE : 031081 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

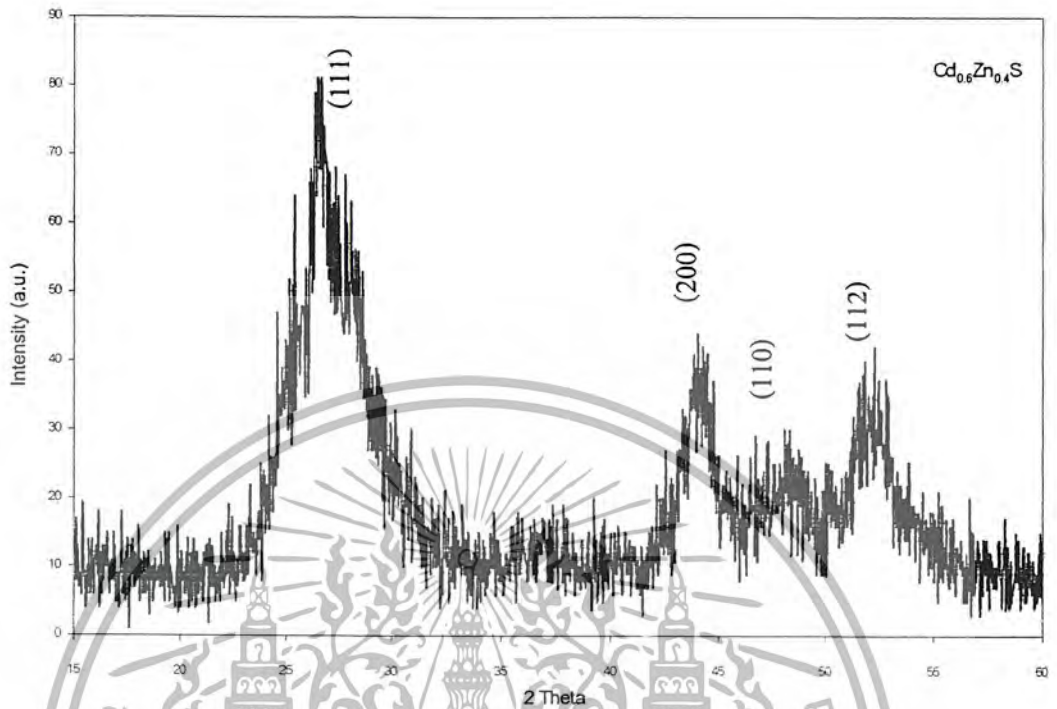


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ CdS ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี

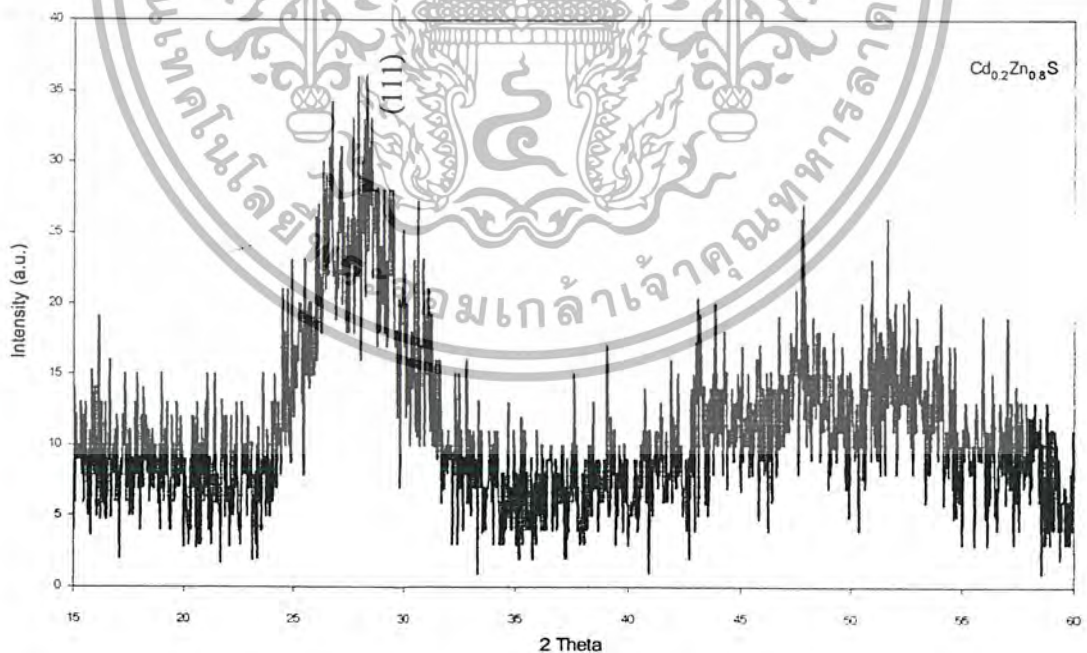


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}S$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีออบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

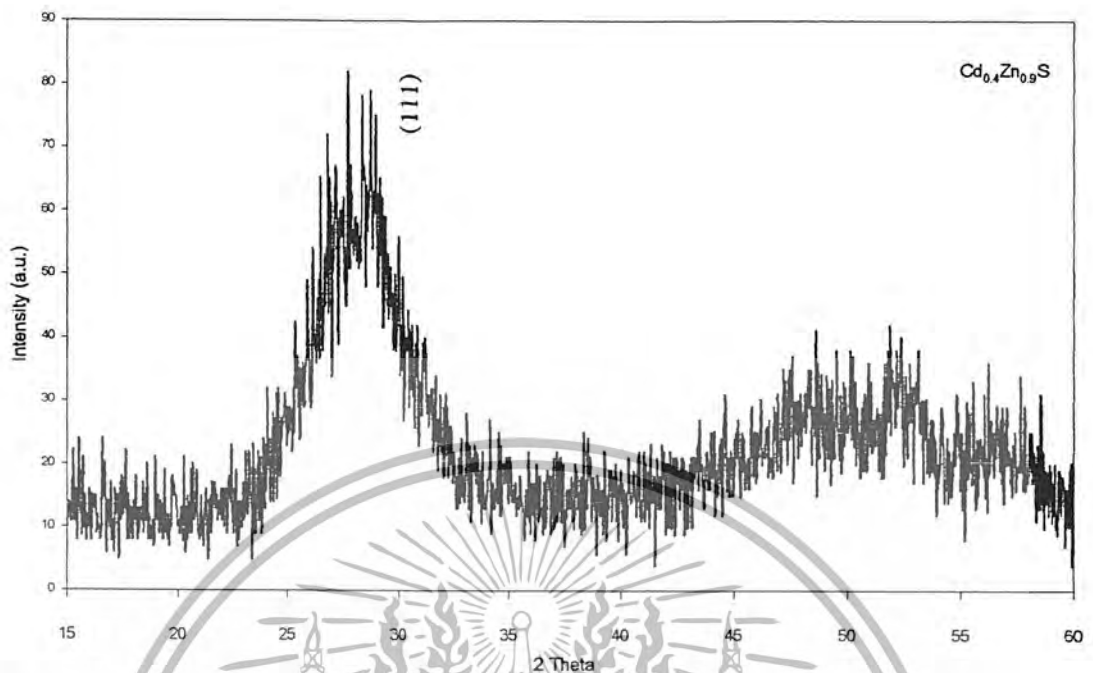


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีออบสารละลายเคมี

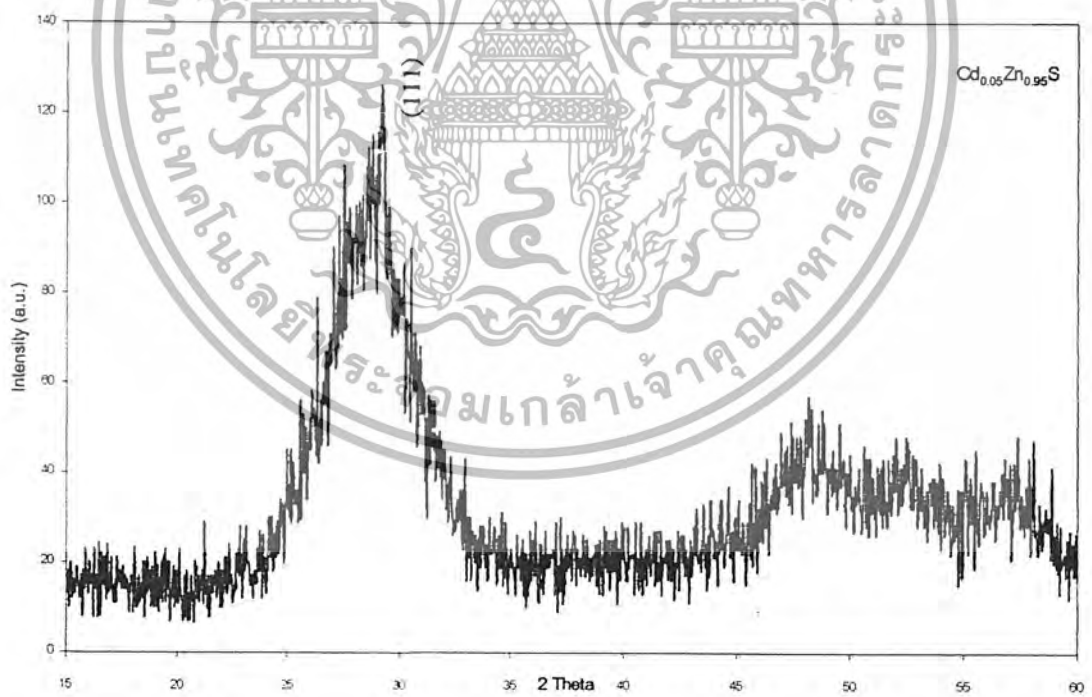


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีออบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

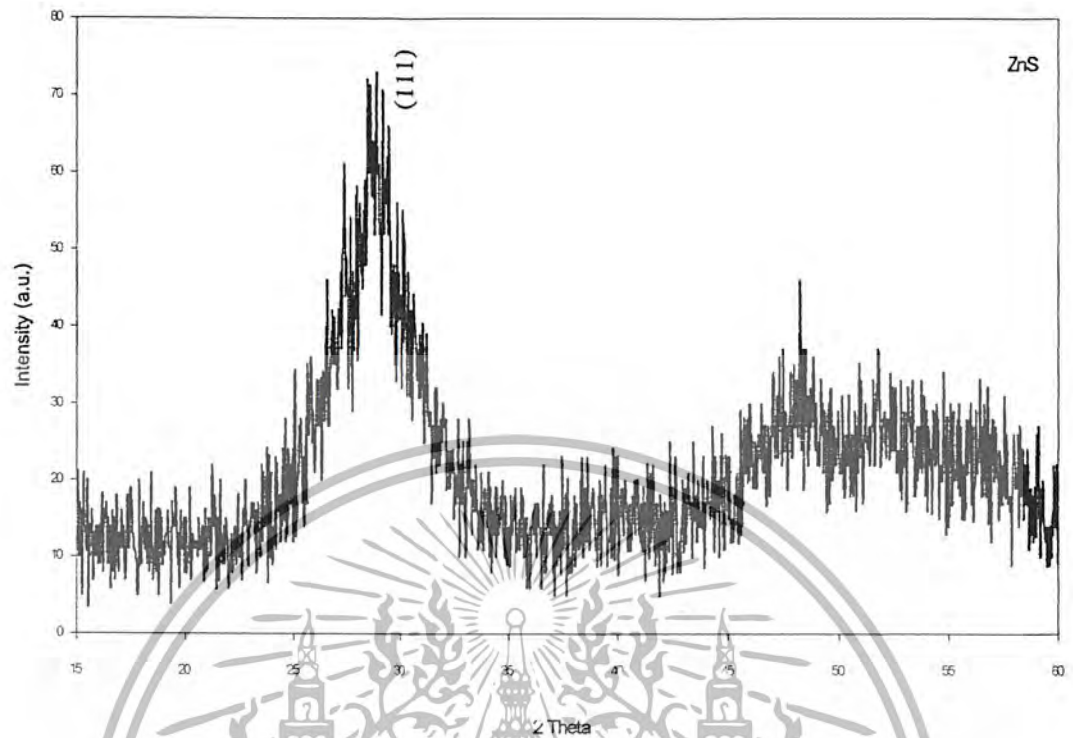


แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $Cd_{0.4}Zn_{0.9}S$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีอบสารละลายเคมี



แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $Cd_{0.05}Zn_{0.95}S$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีอบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnS ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวประภาพรณ ตั้งษ์โสศ เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2524 เป็นคนสมุทรปราการ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สวนกุหลาบวิทยาลัย สมุทรปราการ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542

นางสาวฤทัย ครังควชิรกุล เกิดเมื่อวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2524 เป็นคนสมุทรปราการ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542

นายวิทยา สุทธาริคุลชัย เกิดเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2524 เป็นคนกรุงเทพมหานคร โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนนวมินทราชินูทิศบดินทรเดชา และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้