

ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางแกดเมียมซิงค์ซัลไฟด์เตรียมโดยวิธีการ  
ระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

OPTICAL CHARACTERIZATION OF Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S THIN FILMS  
PREPARED BY THERMAL EVAPORATION METHOD IN VACUUM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๕

KMITL-2012-SC-M-050-047

ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์เตรียมโดยวิธีการ  
ระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

OPTICAL CHARACTERIZATION OF  $Cd_{1-x}Zn_xS$  THIN FILMS  
PREPARED BY THERMAL EVAPORATION METHOD IN VACUUM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-030-047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**OPTICAL CHARACTERIZATION OF  $Cd_{1-x}Zn_xS$  THIN FILMS  
PREPARED BY THERMAL EVAPORATION METHOD IN VACUUM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2012**

**KMITL-2012-SC-M-030-047**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2012**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์เตรียมโดย  
วิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ  
Optical Characterization of  $Cd_{1-x}Zn_xS$  Thin Films Prepared by  
Thermal Evaporation Method in Vacuum

นักศึกษา

นายวุฒิ สารรัตน์

รหัสประจำตัว

52650651

ปริญญา




วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิชิต ศิริโชติ	ศิริโชติ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	วงษ์เจริญ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เจริญ	ภูริรักษ์เจริญ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	แก้วแดง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2555 เวลา 9.30 – 12.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารูพลาภรณ์วลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิน ธนะบริพัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 18 เดือน 10 พ.ศ. 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
นักศึกษา	นายวุฒิ สารรัตน์
รหัสประจำตัว	52650651
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ( $Cd_{1-x}Zn_xS$ ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำกว่า  $5.5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกอัดเม็ดของสารประกอบ CdS กับ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์สูง ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือในส่วนแรกเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีองค์ประกอบ x อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และไม่ได้รับการแอนนیل สำหรับส่วนที่สองเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่ได้รับการแอนนیل ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ในช่วงความยาวคลื่น 300 - 800 นาโนเมตร ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงสอดคล้องกับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญต่างๆ เช่น ค่าดัชนีหักเหของแสงสัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสง พลังงานออสซิลเลเตอร์ พลังงานคิสเพอร์ชัน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และสภาพนำทางแสงได้

**คำสำคัญ :** ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$ , วิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ, พารามิเตอร์ทางแสง

<b>Thesis</b>	Optical Characterization of Cd <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> S Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method in Vacuum.
<b>Student</b>	Mr. Wuth Sararath
<b>Student ID.</b>	52650651
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2012
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Thitinai Gaewdang

## ABSTRACT

In this thesis, Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S thin films were prepared on slide glass substrate by thermal evaporation method in vacuum better than  $5.5 \times 10^{-5}$  mbar using the high purity grade of CdS and ZnS powders pressed in pellet form as a source. The investigated Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S thin films were divided into two parts. The first part was the as-deposited Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S thin films within composition  $0 \leq x \leq 1$  and the second one was composed of CdS and Cd<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>S thin films annealed in a pure nitrogen atmosphere at temperature ranging 100 – 500 °C for 30 min. The X-ray diffraction analysis of the films was performed to investigate the crystal structure. The surface morphology of the films was studied using scanning electron microscope (SEM). The transmission spectra of the films were studied using a double beam spectrophotometer in the wavelength range at 300 - 800 nm. Optical band gap value of the films was determined from the transmission spectra. The dependence of the refractive index on the wavelength obeys the single oscillator model, from which the important parameters such as refractive index, extinction coefficient, oscillator energy ( $E_0$ ), dispersion energy ( $E_d$ ), dielectric constant and optical conductivity were determined.

**Keywords** : Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S thin films , thermal evaporation method , optical parameters

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความเมตตากรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รุ่นพี่และรุ่นน้องนักศึกษาทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณ อติสร นพรุจิกุล และคุณอัญญาพร อริยฤทธิ์ นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับคำแนะนำพื้นฐานทั่วไปตลอดจนเทคนิคต่างในส่วนกระบวนการเริ่มต้นจนถึงการเตรียมฟิล์มบาง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาให้การอบรมสั่งสอน และเป็นที่พักทางใจตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นาย วุฒิ สารรัตน์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	7
2.1 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสง	7
2.1.1 ย่านโปร่งแสง	11
2.1.2 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง	12
2.1.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง	14
2.1.4 แบบจำลองตัวเลข	15
2.2 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว	16
2.3 ไดอิเล็กทริก สเปกโตรสโคปี	23
2.3.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์	23
2.3.2 แบบจำลองของครูด	27
2.3.3 สภาพนำไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำๆ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.4 ความถี่พลาสมา	30
2.3.5 สมการของเฮเกน-รูเบนส์	31
2.3.6 ผลของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือสนามไฟฟ้าลอเรนตซ์	32
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	38
2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	39
2.4.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	39
2.4.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์	39
2.5 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	39
2.5.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน	39
2.5.1.1 โลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน	40
2.5.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	41
2.5.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	42
2.6 การส่งผ่านแสง	43
2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	44
2.6.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	46
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	49
3.1 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ	49
3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	50
3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ	51
3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามสัดส่วนค่าของ x โดย $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$ และ 1 กับกรณีฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ และ $CdS$ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัยการจำลองค่าตัวแปรทางแสง	53
3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบข้อมูลของฟิล์มบาง	53
3.5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	54
3.6 ขั้นตอนการ Simulate ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามสัดส่วนค่าของ $x$ โดย $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$ และ 1 กับกรณีฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ และ $CdS$ เมื่อไม่มีการแอนนีกัลและการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	54
3.6.1 วิธีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PUMA	54
3.7 วิธีการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางจากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	56
3.7.1 วิธีการหาค่าดัชนีหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสง	56
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล</b>	59
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้	60
4.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล	60

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 4.1.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 60
- 4.1.3 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 61
- 4.2 ผลการศึกษาฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 62
- 4.3 ผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 69
- 4.4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  72

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 4.4.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล 72
- 4.4.2 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที 79
- 4.4.3 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที 83
- 4.4.4 ผลการศึกษาส่วนหางของพลังงานที่มีอิทธิพลต่อช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที 87

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 4.5 การหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 91
- 4.6 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว 99
- 4.6.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$ ,  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 99

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6.2 ผลการหาค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสม $x$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	105
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	114
ภาคผนวก ก การคำนวณสารตั้งต้น	121
ภาคผนวก ข ตารางไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	123
เอกสารอ้างอิง	128
ประวัติผู้เขียน	132

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงอัตราส่วนผสมปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1 กรัม) กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์	51
4.1	แสดงค่าคงที่ของ โคร่งผลึก, FWHM, ขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x$ ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	64
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	66
4.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	68
4.4	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x$ ค่าต่างๆ ในที่กรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	77

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.5	แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม $x$ ค่าต่างๆในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีส	103
4.6	แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	103
4.7	แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	104

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง(T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่โปร่งแสง	8
2.2	แสดงรีวิวกการแทรกสอดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\alpha$ -Si : H หนา $1 \mu\text{m}$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส	9
2.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $\lambda^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF	19
2.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $\lambda^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารประกอบ $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	19
2.5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $\lambda^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS	20
2.6	แสดงความสามารถในการ โพลารไรซ์สุทธิที่ความถี่ต่างๆของสารไดอิเล็กตริก	36
2.7	แสดงกราฟจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่	36
2.8	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของเบียร์ก์	38
2.9	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของของแข็ง ก. โลหะ ข. กึ่งโลหะ ค. ฉนวน	40
2.10	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ก. โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง ข. โครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง	41

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	42
	ก. โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
	ข. โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีกระบวนการสร้างโฟนอน	
2.12	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของCdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต	42
2.13	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต	43
2.14	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง	43
2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	45
2.16	แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	46
2.17	แสดงเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับพลังงาน $h\nu$ ที่อุณหภูมิใดๆ	47
3.1	ภาพถ่ายแสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	50
3.2	แสดงตำแหน่งต่างๆภายในระบบสุญญากาศ	50
3.3	เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณจำลองค่า	53
3.4	คู่มือเรียนรู้อการใช้งานโปรแกรมบน Linux	53
3.5	แสดงภาพถ่ายเครื่อง เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์	54
3.6	ก.กราฟของค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสง	
	ข.กราฟของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียกับความยาวคลื่นแสง	57

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม $x$ ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	60
4.2	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	61
4.3	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	61
4.4	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x$ ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	63
4.5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ $x$ ค่าต่างๆ กับ $a_0$ , $c_0$ อังสตรอม ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x$ ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.6	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	65
4.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงสร้างที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับอุณหภูมิแอนนีสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	66
4.8	แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	67
4.9	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงสร้างที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับอุณหภูมิแอนนีสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	68

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10	ลักษณะผิวหน้าที่ถ่ายด้วย SEM โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x$ ต่างๆในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	69
4.11	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	70
4.12	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	71
4.13	แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ $x$ ค่าต่างๆในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	72

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	73
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0.2$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	74
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0.4$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	74
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0.6$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	75

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.18	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0.8$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	75
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0.9$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	76
4.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม $x = 1.0$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อหาค่า $E_g$	76
4.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $E_g$ กับอัตราส่วนผสมของ $x$ ค่าต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล	78

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	79
4.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิล	80
4.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	80
4.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	81
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	81

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	82
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	82
4.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	83
4.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	84
4.31	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	84

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.32	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	85
4.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	85
4.34	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	86
4.35	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	86

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.36 ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตรา  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

ข. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_g$  กับ อัตราส่วนผสม ( $x$ ) ของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.37 ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_g$  กับ อุณหภูมิแอนนีส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

87

88

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.38	ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	89
	ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $E_g$ กับ อุณหภูมิแอนนีส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สในโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	89
4.39	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม $x$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีส	93
4.40	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่อัตราส่วนผสม $x$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีส	93

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	94
4.42	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	94
4.43	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	95
4.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	95

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.45	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหพิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าช่องว่างแถบพลังงานในแต่ละอัตราส่วนผสม x ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีส	97
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหพิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	97
4.47	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหพิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	98
4.48	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีส	99

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.49	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	100
4.50	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	100
4.51	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม $x$ ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	106
4.52	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม $x$ ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	106

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.53	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม $x$ ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	107
4.54	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม $x$ ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ $CdS$ และ $ZnS$ ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	107
4.55	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	108
4.56	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	108

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.57	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	109
4.58	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	109
4.59	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	110
4.60	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	110

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.61	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	111
4.62	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	111

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ยุคสมัยที่โลกหมุนไปพร้อมกับการเติบโตของเทคโนโลยีนั้นมีส่วนทำให้การดำรงชีวิตของมนุษย์มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากมา จากเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่เป็นสิ่งอำนวยความสะดวก รวมไปถึงอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์จากองค์ความรู้ทางด้านสารกึ่งตัวนำเช่นกัน ในปี พ.ศ. 2490 ได้มีการคิดค้นทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก สารกึ่งตัวนำจึงเป็นที่น่าสนใจ ส่งผลให้เกิดการศึกษาพัฒนาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ผลดีที่เกิดขึ้นคืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและเบาขึ้นแต่ใช้ไฟฟ้าในการทำงานน้อย สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายประเภทและหลากหลายคุณสมบัติได้ถูกนำมาใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ทางด้านการติดต่อสื่อสาร มีการนำเอาสารกึ่งตัวนำมาใช้ในโทรศัพท์และคอมพิวเตอร์ จากอดีตคอมพิวเตอร์ตัวแรกของโลกมีขนาดใหญ่มาก ต้องอาศัยหลอดสุญญากาศจำนวน 18,000 หลอดและมีน้ำหนัก 30 ตัน นับตั้งแต่มีเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำเข้ามามีส่วนช่วยในการพัฒนาส่งผลให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงและใช้งานตอบสนองได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ในสมัยที่มีการศึกษาพลังงานทดแทนมีการนำเอาสารกึ่งตัวนำไปใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยตัวเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเปลี่ยนแสงอาทิตย์ที่สาดส่องลงมาบน โลกเปลี่ยนเป็นพลังงาน ไฟฟ้า ข้อดีคือเป็นการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เป็นการลดต้นทุนในการซื้อพลังงานจำพวกปิโตรเลียมซึ่งมีราคาสูงและพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำยังถูกประดิษฐ์เป็นเครื่องตรวจจับต่างๆ เช่น การนำสารกึ่งตัวนำไปใช้ในการตรวจจับแก๊สพิษ นับเป็นประโยชน์อย่างมากในการตรวจหาสารพิษในบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการได้รับสารพิษตัวอย่างเช่นเขตพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับใช้สารเคมีอันตราย

จากที่กล่าวมาว่าการศึกษาคูณสมบัติของสารกึ่งตัวนำจึงเป็นสิ่งที่ดี และเป็นแนวทางในการพิจารณาตลอดจนตัดสินใจ วิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาขีดความสามารถการนำเอาสารกึ่งตัวนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ไม่ว่าจะเป็นด้านใดๆ ก็ตามและเพื่อเป็นการนำเอาสารกึ่งตัวนำไปใช้ได้เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด รวมไปถึงการเสาะหาคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำบางอย่างที่ใกล้เคียงสารกึ่งตัวนำบางชนิดที่หายากมีจำนวนจำกัด เพื่อทดแทนในการสร้างเครื่องมือหรือปรับปรุงคุณภาพให้มีลักษณะใกล้เคียงจนถึงดีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น (n-type) มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) มีช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ณ อุณหภูมิห้องเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นฟิล์มบางที่ได้การยอมรับว่าเหมาะกับการสร้างเป็นชั้นหน้าต่าง สำหรับใช้สร้างประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำเป็นรอยต่อระหว่างหัวต่อพี-เอ็น (เมื่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีความหนา 0.1 ไมโครเมตร จะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานที่สูงกว่า 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้ถึง 36 เปอร์เซ็นต์) [1] แต่ข้อจำกัดประการหนึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ก็คือมีช่องว่างแถบพลังงานที่ไม่กว้างนัก จึงต้องเพิ่มช่องว่างแถบพลังงานให้กว้างขึ้น ซึ่งทำโดยการผสมกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnS ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน 3.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้คือจะเกิดเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง จะมี 2 แบบ คือ ซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic) หรือเวิร์ทไซท์ (wurtzite) [2] ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ยังช่วยให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้นอีกด้วย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน โมล ของอะตอม Cd/Zn

สำหรับการศึกษาในส่วนนี้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  จะเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์สูง ฟิล์มบางที่จะทำการเตรียมนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือในส่วนแรกเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีองค์ประกอบ x อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และไม่ได้รับการแอนนัล สำหรับส่วนที่สองเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่ได้รับการแอนนัลในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ในช่วงความยาวคลื่น 300 - 800 นาโนเมตร ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ศึกษาค่าตัวแปรทางแสงจากข้อมูลสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เช่น ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง จากการที่ทราบถึงปริมาณของค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงแล้วสามารถเชื่อมโยงไปถึงค่าตัวแปรอื่นอีก เช่น ค่าพลังงานคิสเพอร์ชัน ค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์ สภาพการนำแสงที่สัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่น ทั้งหมดนี้จะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำที่ตอบสนองกับแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ หรือแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแสงและแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ได้ทำการศึกษา โดยการหาค่าดัชนีหักเห นั้นอาศัยจากการคำนวณรั้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมการส่งผ่าน

แสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ การอธิบายและหาค่าตัวแปรทางแสงจากค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ศึกษานั้นอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ เมื่อไม่มีการแอนนیلโดย  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1.0

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

1.2.3 หาค่าตัวแปรเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ,  $CdS$  ด้วยวิธีการจำลองแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ เมื่อไม่มีการแอนนิลโดย  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1.0 กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆเมื่อไม่มีการแอนนิลโดย  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.8, 0.9 และ 1.0 กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

- 1.3.3 ทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆเมื่อไม่มีการแอนนิลโดย  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1.0 กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
- 1.3.4 ทำการจำลองแบบจากข้อมูลสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ,  $CdS$  ดังที่ได้กล่าวข้างต้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป
- 1.3.5 หาค่าตัวแปรเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ,  $CdS$  โดยการสังเคราะห์แบบคอซีและแบบเวมเพิล-ไดโดเมนนิโค

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูลจากผลงานวิจัยที่ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่
- 1.4.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ เมื่อไม่มีการแอนนิลโดย  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1.0 กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

- 1.4.3 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่อัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆเมื่อไม่มีการแอนนีสโดย x เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1.0 กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
- 1.4.4 วัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตรของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ เมื่อไม่มีการแอนนีสโดย x เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1 กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่
- 1.4.5 ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และสิ่งที่ได้จากการจำลองแบบคือ ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ
- 1.4.6 ทำการหาค่าตัวแปรเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ,  $CdS$  โดยการสังเคราะห์แบบคอลลอยด์และแบบเวมเพิล-โคโคเมนนิโค
- 1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.4.8 เขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ อีกทั้งทราบถึงเงื่อนไขรวมถึงปริมาณการใช้สารเคมีตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้ได้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกัน
- 1.5.2 ทำให้ได้ทราบถึงสมบัติบางประการของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xZn_{1-x}S$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ,  $CdS$  โดยวิธีการจำลองแบบจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต และย่านตามองเห็นได้จากนั้นจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆ เช่น ช่องว่างแถบพลังงาน ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน
- 1.5.3 จากความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่จำลองแบบได้สามารถนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงอื่นๆได้อีก โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ที่เสนอโดยเวมเพิลและโคโคเมนิโค
- 1.5.4 นำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยใช้เป็นแนวทางและพิจารณาเพื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

## บทที่ 2

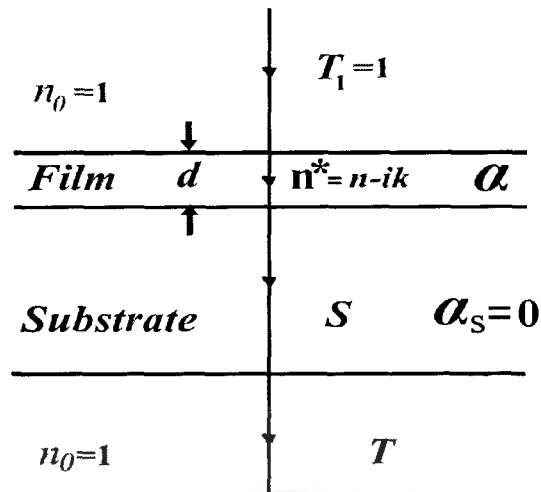
### ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการศึกษาค่าตัวแปรทางแสงซึ่งจะได้อธิบายทฤษฎีและหลักการในส่วนที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 2.1 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง [3-18]

ความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง สามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่โปร่งแสง ซึ่งจะแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 2.1 ฟิล์มบางมีความหนา  $d$  และดัชนีหักเหเชิงซ้อน  $n^* = n - ik$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนจริงของค่าดัชนีหักเห ส่วน  $k$  คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง (extinction coefficient) สำหรับความหนาของแผ่นฐานรองรับจะต้องมีค่ามากกว่าความหนาของฟิล์มบางในระดับ 100-1000 เท่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางคือ  $s$  และประมาณว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแผ่นฐานรองรับ ( $\alpha_s$ ) มีค่าน้อยมากและประมาณให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าดัชนีหักเหของอากาศ  $n_0=1$  การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จะต้องพิจารณาการสะท้อนแสงทวีคูณ (multiple reflections) ที่รอยต่อ (ดังรูปที่ 2.1) จำนวน 3 รอยต่อ

ถ้าฟิล์มบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือความหนามีลักษณะลาดชัน ลักษณะรีวการแทรกสอดของที่ส่งผ่านฟิล์มบางจะหายไป ดังนั้นจะเห็นเพียงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เป็นเส้นกราฟที่เรียงดังแสดงด้วยเส้นโค้ง  $T_\alpha$  ของรูปที่ 2.2 จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่โปร่งแสง ค่า  $\alpha = 0$  และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จะขึ้นกับ  $n$  และ  $s$  โดยจะต้องมีการสะท้อนแสงทวีคูณเกิดขึ้น สำหรับบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบาง  $\alpha$  มีค่าน้อยและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะเริ่มมีค่าลดลง ส่วนบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงผ่านกลาง  $\alpha$  จะมีค่ามากและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงเนื่องจากผลของ  $\alpha$  นี้ และบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างมากด้วยอิทธิพลของ  $\alpha$  ดังกล่าว เส้นกราฟสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียบ  $T_\alpha$  มักจะถูกนำไปใช้หาค่า  $\alpha(\lambda)$  ในช่วงแสงตามองเห็นได้และช่วงอินฟราเรดเสมอ



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่โปร่งแสง

ถ้าความหนา  $d$  ของฟิล์มบางมีค่าสม่ำเสมอ จะส่งผลให้สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของรูปที่ 2.1 เป็นเส้นที่ราบเรียบ การแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบางได้ โดยเริ่มจากการพิจารณากรณีแผ่นฐานรองรับอย่างเดียวก่อน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของแผ่นฐานรองรับจะแสดงได้ดังสมการ

$$T_s = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$R_s = \left\{ \frac{(s-1)}{(s+1)} \right\}^2 \quad (2.2)$$

หรือ

$$T_s = \frac{2s}{s^2 + 1}$$

และ

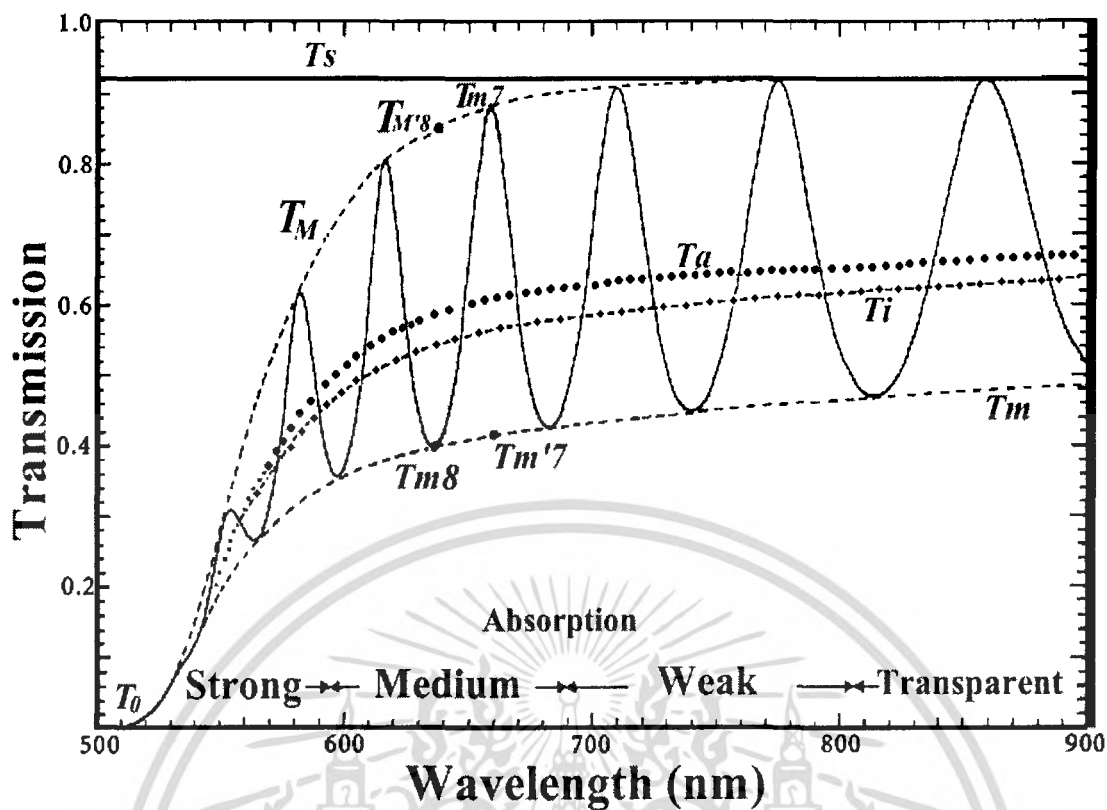
$$s = \frac{1}{T_s} + \left( \frac{1}{T_s} - 1 \right)^{1/2}$$

การเกิดริ้วการแทรกสอดจะเป็นไปตามสมการ

$$2nd = m\lambda \quad (2.3)$$

เมื่อ  $m$  คือเลขจำนวนเต็มสำหรับริ้วการแทรกสอดชนิดเสริมกัน (ซึ่งก็คือสันคลื่น) และ  $m$  จะเป็นเลขจำนวนนับหารด้วย 2 สำหรับริ้วการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (ซึ่งก็คือท้องคลื่น) ในสมการที่ (2.3) เพียงสมการเดียว ก็ไม่สามารถหาค่า  $n$  และ  $d$  ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงวิธีการแทรกสอดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\alpha$ -Si : H หนา  $1 \mu\text{m}$  ที่เคลื่อนอยู่บนแผ่นฐานรองที่เป็นกระจกใส

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  ของรูปที่ 2.2 จะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = T(\lambda, s, n, d, \alpha)$$

ถ้ารู้ค่า  $s$  แล้ว  $T$  สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของ  $n(\lambda)$  และค่าการดูดกลืน  $x(\lambda)$  (absorbance) เมื่อค่าการดูดกลืนแสง ( $x$ ) นี้จะแสดงดังสมการ (2.5) แล้วสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  จะกลายเป็น

$$T = T(n, x)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานทางแสงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางดังรูปที่ 2.1 จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = \frac{A'x}{B' - C'x + D'x^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $A' = 16s(n^2 + k^2)$

$$B' = [(n+1)^2 + k^2][(n+1)(n+s) + k^2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C' = [(n^2-1+k^2)(n^2-s^2+k^2)-2k^2(s^2+1)]2\cos\phi - k[2(n^2-s^2+k^2) + (s^2+1)(n^2-1+k^2)]2\sin\phi$$

$$D' = [(n-1)^2+k^2][(n-1)(n-s^2)+k^2]$$

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda}$$

$$x = \exp(-\alpha d)$$

$$\alpha = 4\pi k/\lambda$$

ในกรณีที่แผ่นฐานรองรับมีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มบางมากๆ (แผ่นฐานรองรับมีความหนาเป็นอนันต์) แล้ว T จะกลายเป็น

$$T = \frac{A''x}{B'' - C''x + D''x^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $A'' = 16s(n^2+k^2)$

$$B'' = [(n+1)^2+k^2][(n+1)(n+s^2)+k^2]$$

$$C'' = [(n^2-1+k^2)(n^2-s^2+k^2)-2k^2(s^2+1)]2\cos\phi - k[2(n^2-s^2+k^2) + (s^2+1)(n^2-1+k^2)]2\sin\phi$$

$$D'' = [(n-1)^2+k^2][(n-1)(n-s^2)+k^2]$$

ค่าการดูดกลืนแสง  $x$  ของรูปที่ 2.1 สามารถเขียนอยู่ในพจน์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เป็นเส้นโค้งเรียบ ( $T_\alpha$ ) ดังนี้คือ

$$x = \frac{P + [P^2 + 2QT_a(1 - R_2R_3)]^{1/2}}{Q} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $Q = 2T_\alpha(R_1R_2 + R_1R_3 - 2R_1R_2R_3)$

$$P = (R_1-1)(R_2-1)(R_3-1)$$

$$R_1 = [(1-n)/(1+n)]^2$$

$$R_2 = [(n-s)/(n+s)]^2$$

$$R_3 = (s-1)/(s+1)^2$$

เพื่อให้พิจารณาได้ง่ายขึ้น เราจะให้  $k=0$  แล้วสมการที่ (2.4) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} \quad (2.7)$$

$$\text{เมื่อ } A = 16n^2 s \quad (2.8a)$$

$$B = (n+1)^3(n+s^2) \quad (2.8b)$$

$$C = 2(n^2-1)(n^2-s^2) \quad (2.8c)$$

$$D = (n-1)^3(n-s^2) \quad (2.8d)$$

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (2.8e)$$

$$x = \exp(-\alpha d) \quad (2.8f)$$

แล้วจะได้ว่า  $T_M$  และ  $T_m$  ของรูปที่ 2.1 คือ

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (2.9)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (2.10)$$

ถ้าพิจารณาให้  $T_M$  และ  $T_m$  เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$  หรือเป็นฟังก์ชันของ  $n$  ( $\lambda$ ) และของ  $x$  ( $\lambda$ ) อีกทั้ง  $T_M$  และ  $T_m$  เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  ใดๆค่า  $T_M$  จะสัมพันธ์กับ  $T_m$  ยกตัวอย่างเช่น  $T_{M7}$  จะสัมพันธ์กับ  $T'_{M7}$  และ  $T_{M8}$  จะสัมพันธ์กับ  $T'_{M8}$

### 2.1.1 ย่านที่โปร่งแสง

เป็นบริเวณที่  $\alpha = 0$  หรือ  $x = 1$  ให้แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9)

$$\text{จะได้ว่า } T_M = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) นี้จะให้ผลเหมือนกับสมการที่ (2.1) และจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันจะเป็นฟังก์ชันของ  $s$  อย่างเดียว และซ้อนทับกับเส้น  $T_s$  แต่เมื่อจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันนี้เริ่มเบนออกจาก  $T_s$  จะแสดงว่าจุดเริ่มต้น (onset) ของการดูคลื่นแสงเริ่มปรากฏขึ้น แล้วดังนั้นค่า  $s$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.11)

ทำการแทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.10) โดยให้  $x = 1$  จะได้ว่า

$$T_m = \frac{4n^2s}{n^4 + n^2(s^2 + 1) + s^2}$$

หรือ 
$$n = [M + (M^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.12)$$

เมื่อ 
$$M = \frac{2s}{T_m} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

โดยที่  $T_m$  จะเป็นฟังก์ชันของทั้ง  $n$  และ  $s$  แล้วค่า  $n$  จะคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.12) นี้เองและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ  $\lambda$

### 2.1.2 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางนี้  $\alpha \neq 0$  และ  $X < 1$  จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) ผลต่างของส่วนกลับของ  $T_M$  และ  $T_m$  จะไม่ขึ้นกับตัวแปร  $x$  ดังนี้คือ

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (2.13)$$

ทำการแทนที่สมการที่ (2.8) ลงใน (2.13) จะสามารถทำให้หาค่า  $n$  ได้

$$n = [N + (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ 
$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{(s^2 + 1)}{2}$$

สมการที่ (2.14) นี้สามารถนำไปหาค่า  $n(\lambda)$  จาก  $T_M$  และ  $T_m$  ได้ เมื่อทราบค่า  $n(\lambda)$  แล้วค่าคงที่ทุกตัว ของสมการที่ (2.8) ก็จะหาได้ทันที และค่า  $x$  สามารถคำนวณหาได้จากหลายวิธี สมการที่ (2.9) และ (2.10) เป็นสมการยกกำลังสอง (quadratic function) ของตัวแปร  $x$  จากการแก้สมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$x = \frac{E_M - [E_M^2 - (n^2 - 1)^3(n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n - 1)^3(n - s^2)} \quad (2.15)$$

เมื่อ 
$$E_M = \frac{8n^2s}{T_M} (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

จากการแก้สมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$x = \frac{E_m - [E_m^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^2)]^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.16)$$

เมื่อ 
$$E_m = \frac{8n^2 s}{T_m} (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

และจากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้ว่า

$$\frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} = \frac{Ax}{B + Dx^2} \quad (2.17)$$

แก้สมการเพื่อหาค่า  $x$  จะได้ว่า

$$x = \frac{F - [F^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.18)$$

เมื่อ 
$$F = \frac{8n^2 s}{T_i}$$

และ 
$$T_i = \frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.17) และ (2.7) เห็นได้ว่า  $T_i$  คือเส้นโค้งที่ผ่านจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของรีวกการแทรกสอดของรูปที่ 2.2 เส้นโค้งของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียก  $T_\alpha$  สามารถที่จะคำนวณหาได้จากรีวกการแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสง โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.7) ระหว่างจุดสูงสุด (สันคลื่น) กับจุดต่ำสุด (ท้องคลื่น) ดังนี้คือ

$$T_\alpha = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{Ax}{\pi_0 B - Cx \cos \phi + Dx^2} d\phi$$

ประมาณว่าเป็นการอินทิเกรตในบริเวณแคบๆ (narrow integration region) ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวมีค่าคงที่ แล้วผลของการอินทิเกรตคือ

$$T_\alpha = \frac{Ax}{[(B - Cx + Dx^2)(B + Cx + Dx^2)]^{1/2}} \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ (2.9) และ (2.10) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้ว่า

$$T_\alpha = \sqrt{T_M T_m} \quad (2.21)$$

โดยที่  $T_\alpha$  จะเป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean) ของ  $T_M$  และ  $T_m$  ซึ่งสมการที่ (2.21) จะเป็นสมการที่มีประโยชน์ จากสมการที่ (2.20) สามารถหาค่า  $x$  ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \frac{\{G - [G^2 - (n^2 - 1)^6(n^2 - s^4)]^{1/2}\}^{1/2}}{(n-1)^3(n-s^2)} \quad (2.22)$$

เมื่อ 
$$G = \frac{128n^4s^2}{T^2} + n^2(n^2 - 1)^2(s^2 - 1)^2 + (n^2 - 1)^2(n^2 - s^2)^2$$

สมการที่ (2.22) สมมูลกับสมการที่ (2.6) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงในย่านตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด สมการที่ (2.22) นี้ยังสามารถใช้หาค่า  $n$  จากสเปกตรัม  $T_\alpha$  ในบริเวณที่โปร่งแสง (เมื่อ  $\alpha=0$ ) การคำนวณหาค่า  $n$  จะเริ่มจากการให้ค่า  $x$  ของสมการที่ (2.22) เท่ากับ 1 แล้วจะได้ว่า

$$n = [H + (H^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.23)$$

เมื่อ 
$$H = \frac{4s^2}{(s^2 + 1)T\alpha^2} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

มานิฟาซีเยร์และผู้ร่วมงานได้ทำการคำนวณหาค่า  $x$  จากเงื่อนไขแผ่นฐานรองรับมีความหนาอนันต์(infinite substrate) ซึ่งจะได้ว่า

$$x = \frac{(n+1)(s+n)[1 - (T_M/T_m)^{1/2}]}{(n-1)(s-n)[1 + (T_M/T_m)^{1/2}]} \quad (2.24)$$

แต่น่าเสียดายว่าสมการที่ (2.24) ไม่สมมูลกับสมการที่ (2.12), (2.13), (2.18) และ (2.22)

### 2.1.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนคลื่นอย่างแรง รั้วการแทรกสอดจะไม่ปรากฏให้เห็น ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณค่า  $n$  และ  $x$  จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงแต่เพียงอย่างเดียวได้ ค่า  $n$  ของบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรงนี้สามารถประมาณได้จากการลากส่วนต่อจากบริเวณอื่น เช่น จากบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง เป็นต้น ส่วนค่า  $x$  สามารถคำนวณได้จากสมการใดสมการหนึ่งของสี่สมการอันได้แก่ สมการที่(2.15), (2.16), (2.18) และ (2.22) สำหรับ  $\alpha$  ที่มีค่ามากๆ เส้นกราฟทั้งสี่ คือ  $T_M$ ,  $T_\alpha$ ,  $T_i$  และ  $T_m$  จะลู่เข้าซ้อนกันเป็น  $T_0$  ถ้าไม่พิจารณารั้วการแทรกสอดและให้  $x \leq 1$  สมการที่ (2.7) สามารถเขียนได้เป็น

$$T_0 \approx \frac{Ax}{B}$$

หรือ 
$$x \approx \frac{(n-1)^3(n+s^2)}{16n^2s} T_0 \quad (2.25)$$

#### 2.1.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อทดสอบความแม่นยำของทฤษฎีนี้ จะกำหนดให้  $s = 1.51$  ความหนาของฟิล์มบาง ( $d$ )  $\alpha$ -Si:H เท่ากับ 1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหจะเขียนในรูปของสมการคوشي (Cauchy's equation) ดังนี้

$$n = \frac{3 \times 10^5}{\lambda^2} + 2.6 \quad (2.26)$$

ส่วนค่าลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคือ

$$\log \alpha = \frac{1.5 \times 10^6}{\lambda^2} - 8 \quad (2.27)$$

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็น (นาโนเมตร)<sup>-1</sup>

จากค่า  $n(\lambda)$  และ  $\alpha(\lambda)$  ดังกล่าวข้างต้น นำเอาไปทำแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี เมื่อทราบค่า  $\alpha(\lambda)$  แล้วก็สามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง  $k(\lambda)$  จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

สำหรับการหาค่าความหนาของฟิล์มบาง ( $d$ ) ให้พิจารณาที่สันคลื่นหรือท้องคลื่น ที่อยู่ติดกัน เมื่อ  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่มีความยาวคลื่น  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ตามลำดับ จากสมการที่ (2.3) จะได้ว่าความหนาของฟิล์มบางคือ

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2)} \quad (2.28)$$

สรุปได้ว่าสำหรับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับ 100 นาโนเมตร จะเป็นเส้นโค้งเรียบแผ่นฐานรองรับเป็นกระจกสไลด์มีความหนาในราว 2 มิลลิเมตรดังนั้นจึงประมาณว่า ความหนาของแผ่นฐานรองรับเป็นอนันต์แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางจะหาได้จากสมการที่ (2.5) ส่วน  $\alpha$  จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า  $x$  จากสมการที่ (2.6)

## 2.2 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว ( single oscillator model ) [3-18]

หลักการพื้นฐานของการกระตุ่นทางแสงของวัสดุสามารถอธิบายได้ในพจน์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน  $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$  ซึ่งมีค่าขึ้นกับความถี่ของแสง พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญต่างๆ ของวัสดุจะปรากฏอยู่ในพจน์จำนวนจริง  $\epsilon_1(\omega)$  หรือไม่ก็พจน์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ  $\epsilon_2(\omega)$  โดยที่พจน์  $\epsilon_1(\omega)$  และพจน์  $\epsilon_2(\omega)$  จะสัมพันธ์กันดังปรากฏในทฤษฎีของเครเมอร์-โครนิก (Kramer-Kronig (K-K theory)) ดังนี้คือ

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.29)$$

$$\epsilon_2(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

โดยที่ P คือส่วนหลัก (principal part) สำหรับในวัสดุที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะอยู่ในย่าน โปร่งแสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน และค่าจำนวนจริงนี้จะสัมพันธ์กับค่าจำนวนจินตภาพซึ่งค่าจำนวนจินตภาพนี้จะอยู่ในย่านดูดกลืนแสงและมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างแถบพลังงานตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = n^2(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_{\omega_c}^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad \omega < \omega_c \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\omega_c$  คือ ความถี่ขีดเริ่ม และ  $\epsilon_1 = n^2$  สำหรับความถี่  $\omega$  นี้จะกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งหมด จากสมการที่ (2.30) ค่าดัชนีหักเหสามารถหาได้จากการอินทิเกรตตลอดทุกความถี่ ถึงแม้ว่ากระบวนการคำนวณหาค่า  $\epsilon_2(\omega)$  จะอยู่ในกรอบของทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็งที่มีอิเล็กตรอนตัวเดียว (one electron band theory of solids) กระบวนการคำนวณดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดบริลลัน โซน (brillouin zone) รวมทั้งอินทิเกรตตลอดทุกความถี่ ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์อาจจะมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกับการคำนวณ นอกจากนั้นยังมีการใส่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรับค่าได้เข้าไปในกระบวนการคำนวณ ถ้ายังวัสดุนั้นเป็นวัสดุไอออนิกการย้ายสถานะพลังงานเนื่องจากการกระตุ่นด้วยแสงก็ยิ่งยากที่จะหาค่าในเชิงปริมาณได้อย่างถูกต้อง ฟิลลิปส์และฟาน วิกเทน (Phillips and Van Vechten) ได้ใช้แบบจำลองของเพนน์ (Penn model) ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant) เพื่อนิยามค่าช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย (average energy gap,  $E_g$ ) ในขณะที่ เวมเพิล-โคโดเมนนิโค ใช้ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่ของแสง เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามพารามิเตอร์ พลังงานคิสเพอร์ชัน ( dispersion energy,  $E_d$  ) พารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์มาก เนื่องจากสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายได้และใช้ได้ดีกับสารประกอบจำนวนมาก ถึงแม้ว่าสมการความสัมพันธ์เหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียด แต่สิ่งที่เหมือนกันคือจะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกและความเป็นไอออนิกของผลึกซึ่งส่งผลต่อลักษณะสมบัติของค่าดัชนีหักเหของวัสดุของแข็งต่างๆ

จากการใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชันที่ขึ้นกับเวลา ( time dependent perturbation theory ) จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\epsilon_1 = 1 + \frac{e^2}{\pi^2 m} \sum_{i,j} \int_{BZ} d^3k \frac{f_{ij}^\alpha(\vec{k})}{(\omega_{ij}^2(\vec{k}) - \omega^2)} \quad (2.31)$$

ซึ่ง  $e$  และ  $m$  คือประจุและมวลของอิเล็กตรอน ทำการหาค่าผลรวม ( summation ) ครอบคลุมทุกแถบพลังงาน  $i$  และ  $j$  โดยที่  $i \neq j$  และทำการอินทิเกรตทั่วทั้ง Brillouin zone สำหรับ  $f_{ij}^\alpha(\vec{k})$  คือความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงาน  $i$  และ  $j$  ในทิศทางโพลาไรซ์  $\alpha$  จากสมการที่ 2.31 สามารถทำการประมาณได้สองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าทำการทดลองวัดได้จริงโดยการประมาณแบบที่หนึ่งคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตซึ่งจะพิจารณาถึงความถี่ของแสงเท่ากับศูนย์ ส่วนประมาณแบบที่สองคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่แสงที่อยู่ในย่านโปร่งแสงเช่น  $\omega < \omega_{ij}$

เพนนี (Penn) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตของสารกึ่งตัวนำสามารถคำนวณหาค่าได้โดยการใช้แบบจำลอง อิเล็กตรอนอิสระในแบบไอโซโทโรปิกที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  ถ้าประมาณให้  $\hbar\omega_{ij} \approx E_g$  แล้วสมการที่ (2.31) จะกลายเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m E_g^2} \sum'_{i,j} \int_{BZ} d^3k f_{ij}^\alpha(\vec{k}) \quad (2.32)$$

และ 
$$\sum_j \int_{BZ} d^3k = 4\pi n_v \quad (2.33)$$

เมื่อ  $n_v$  คือความหนาแน่นยังผลของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ ( effective density of valence electrons ) แล้วสมการที่ (2.32) จะลดรูปได้เป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{(\hbar\omega_p)^2}{E_g^2} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\omega_p^2 = 4\pi n_v e^2 / m$  คือความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่สูง ถ้ากำหนดให้แถบนำและแถบวาเลนซ์มีอย่างละหนึ่งแถบ (single group of valence and conduction band) แล้วสมการที่ (2.31) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{4\pi e^2}{m\Omega} \sum_{\vec{k}} \frac{f_{cv}^\alpha(\vec{k})}{\omega_{cv}^2(\vec{k}) - \omega^2} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $\Omega$  คือปริมาตรของผลึก ส่วน  $c$  และ  $v$  คือแถบนำและแถบวาเลนซ์ ถ้าประมาณว่าการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำในบริลลันโซนเกิดเป็นออสซิลเลเตอร์และอิเล็กตรอนวาเลนซ์หนึ่งตัวจะทำให้เกิดเป็นออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว ดังนั้นจะประมาณสมการที่ (2.35) ได้ว่าเป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \omega_p^2 \sum_n \frac{f_n}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $f_n$  คือ ความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ของไดโพลทางไฟฟ้าที่สังสรรค์กับการย้ายสถานะพลังงานที่สอดคล้องกับความถี่  $\omega_n$  การหาผลรวม (summation) ให้ครอบคลุมทุกออสซิลเลเตอร์ที่สอดคล้องกับความถี่  $\omega_n$  (โดยที่  $\omega < \omega_n$ ) สามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ซึ่งส่วนแรกคือออสซิลเลเตอร์ตัวที่หนึ่งซึ่งมีค่า  $f_1/(\omega_1^2 - \omega^2)$  และส่วนที่สองคือ

$$\sum_{n \neq 1} (f_n/\omega_n^2)(1 + \omega^2/\omega_n^2)$$

ทำการรวมส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเข้าด้วยกัน โดยที่ยังคงรักษาพจน์  $\omega^2$  จะทำให้ได้ว่าการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยวมีค่าดังนี้คือ

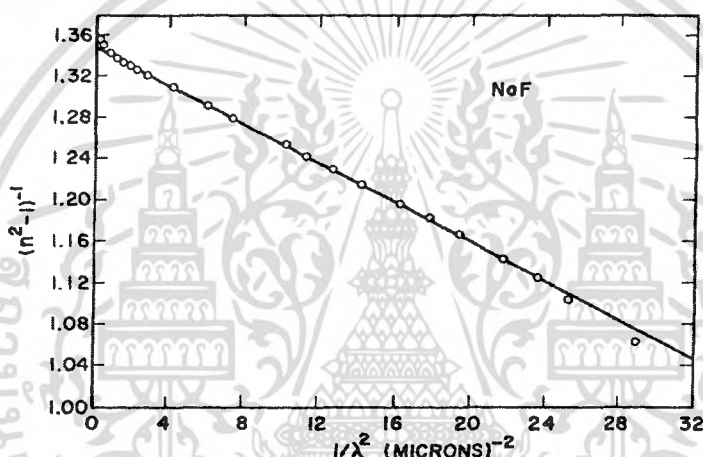
$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx \frac{F}{[E_0 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.37)$$

ซึ่งพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $F$  จะสัมพันธ์กับ  $f_n$  และ  $\omega_n$  ของสมการที่ (2.36) จากสมการที่ (2.37) จะทำให้สามารถประมาณหาค่าพารามิเตอร์สองตัวได้ที่พลังงาน  $\hbar\omega < \hbar\omega_c$  สมการที่ (2.37) จะมีประโยชน์หรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะให้ผลสอดคล้องดีกับสมบัติทางแสงของวัสดุโดยส่วนใหญ่หรือไม่ และพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $F$  ที่ได้จากการทดลองสามารถสร้างมุมมองใหม่ๆเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆ ได้หรือไม่ แวมเพิล-ไดโดเมนนิโคได้ทำการทดลองกับวัสดุมากกว่า 50 ชนิดทั้งที่เป็นผลึกไอออนิกและผลึกโควาเลนซ์ของสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะอีกทั้งยังได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $E_d = F/E_0$  ซึ่งสอดคล้องกันดีกับการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สมการที่ (2.37) สามารถเขียนอยู่ในรูปพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) ดังนี้คือ

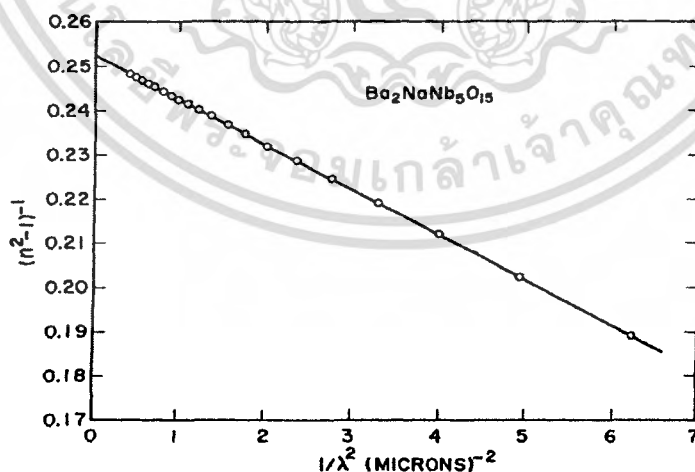
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n^2(\omega) - 1 = \frac{E_d E_o}{[E_o^2 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.38) ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $\omega^2$  แล้วจะได้ความชันคือ  $1/E_d E_o$  ส่วนจุดตัดแกน y คือ  $E_o/E_d$  ตัวอย่างสมการที่ (2.38) ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF,  $Ba_2NaNb_5O_{15}$  และ CdS จะแสดงดังรูป 2.3-2.5 ที่ความยาวคลื่นยาว ( long wavelength ) เส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงเนื่องจากการสั่นไหวของแลททิซที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF สำหรับความยาวคลื่นสั้นเส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงในลักษณะที่มีความโค้งอีกแบบหนึ่งเนื่องจากการดูดกลืนแสงของช่องว่างแถบพลังงานหรือเนื่องมาจากอิเล็กตรอน ดังปรากฏในสารสารกึ่งตัวนำ CdS

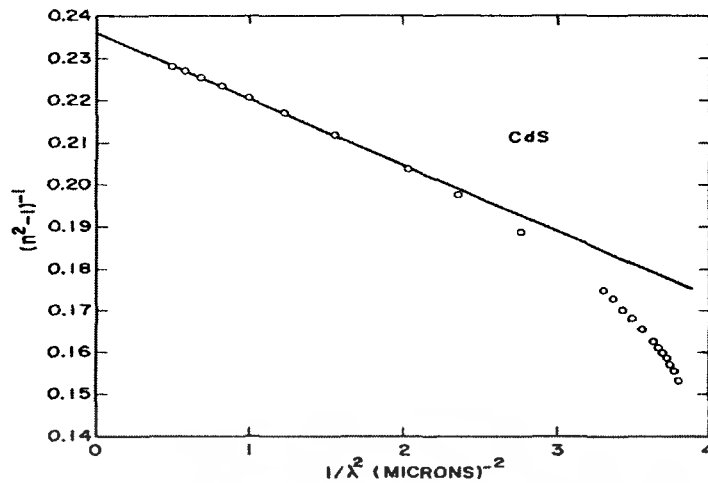


รูปที่ 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $\lambda^{-2}$  ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $\lambda^{-2}$  ของฟิล์มบางของสารประกอบ  $Ba_2NaNb_5O_{15}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $\lambda^{-2}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

ความเชื่อมโยงระหว่างพารามิเตอร์  $E_0$  กับ  $E_d$  ของออสซิลเลเตอร์เดี่ยวกับสเปกตรัมของ  $\epsilon_2(\omega)$  ได้จากสมการที่ (2.38) กับสมการที่ (2.29) ผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในพจน์ของโมเมนต์ของสเปกตรัม  $\epsilon_2(\omega)$  ได้มีการนิยามโมเมนต์ที่  $r$  ของสเปกตรัมทางแสงดังนี้คือ

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_t}^{\infty} E^r \epsilon_2(E) dE \quad (2.39)$$

เมื่อ  $E \equiv \hbar\omega$  ส่วน  $E_r$  คือพลังงานศูนย์กลางแสงขีดเริ่ม พารามิเตอร์  $E_0$  และ  $E_d$  จะสัมพันธ์กับโมเมนต์ของสเปกตรัมทางแสงดังนี้คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.40)$$

และ

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (2.41)$$

พลังงานออสซิลเลเตอร์  $E_0$  จะไม่ขึ้นกับ  $\epsilon_2(\omega)$  และ  $E_0$  นี้คือค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงานในขณะที่  $E_d$  จะขึ้นอยู่กับ  $\epsilon_2(\omega)$  และ  $E_d$  จะทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์แสดงความแข็งแกร่งของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำ เนื่องจากโมเมนต์ที่ -1 กับโมเมนต์ที่ -3 จะเกี่ยวข้องกับ  $E_0$  และ  $E_d$  การให้น้ำหนักแก่สเปกตรัม  $\epsilon_2(\omega)$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเข้าใกล้ขอบการดูดกลืนแสงขีดเริ่ม จากการเปรียบเทียบสมการที่ (2.42) และ (2.43) กับสมการที่มีปริมาณ  $\hbar\omega_p$  และ  $E_g$  ของแบบจำลองฟิลิปส์แล้วพบว่า

$$(\hbar\omega_p)^2 = M_1 \quad (2.42)$$

และ

$$E_g^2 = \frac{M_1}{M_{-1}} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิลิปส์ ( $E_g$ ) คืออัตราส่วนของโมเมนต์ที่ 1 ต่อโมเมนต์-1 ( ดังสมการที่ (2.43) ) ในแบบจำลองของฟิลิปส์ความแข็งแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำจะอธิบายโดยพลังงานพลาสมา  $M_1$  แต่สำหรับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะใช้  $M_1^3/M_3$  เพื่ออธิบายความแข็งแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำดังกล่าว

โฮปฟิลด์ (Hopfield) ได้พัฒนาวิธีการใหม่ que แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแสงของวัสดุกับลักษณะการกระจายของประจุ ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์และ โฮปฟิลด์ได้นำเสนอพารามิเตอร์  $E_a$  โดยนิยามว่า

$$E_a^2 = M_3/M_1 \quad (2.44)$$

และยังแสดงให้เห็นว่าพลังงาน  $E_a$  นี้ จะสัมพันธ์กับอินทิกรัลของผลคูณระหว่างลาปลาเซียนของศักย์ไฟฟ้าของผลึกกับความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่า  $E_o$ ,  $E_g$  และ  $E_a$  จะแสดงความสมมาตรได้อย่างชัดเจนดังสมการที่ (2.40), (2.43), (2.44) และยังแสดงให้เห็นว่า

$$E_i < E_o < E_g < E_a \quad (2.45)$$

เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในวัสดุตัวกลาง (media) อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมจะโพลาริซ์ตามสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ออสซิลเลตรอบๆ ไอออนคอร์ ( ion core ) โดยประมาณว่าทุกๆ อะตอมของผลึกมีการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในลักษณะเดียวกันหมด ราวกับว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุตัวกลางอธิบายได้ด้วยออสซิลเลเตอร์ชนิดเดียวก็เพียงพอจากแบบจำลองของเวมเพิลและไดโดเมนิโก (Wemple-DiDomenico) ในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหจะแสดงได้ดังสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{E_o E_d}{E_o^2 - (hv)^2}$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_o}{E_d} - \frac{1}{E_o E_d} (hv)^2 \quad (2.46)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.46) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_o E_d} \quad (2.47)$$

และ 
$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.47) และ (2.48) สามารถที่จะหาค่า  $E_0$  และ  $E_d$  ได้โดยที่  $E_0$  คือพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่วงช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ส่วน  $E_d$  คือพลังงานคิสเฟอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแข็งแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (2.49)$$

เมื่อ 
$$\beta = 0.26 \pm 0.03 \text{eV}$$

$N_c$  = เลข โคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน  
(number of the cation nearest neighbor to anion)

$Z_a$  = วาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion)

ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

$N_e$  = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อหนึ่งแอนไอออน (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

และ  $f = E_0 E_d$  คือความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่  $r$  ของสเปกตรัมทางแสง ( $r^{\text{th}}$  moments of the optical spectra) จะสัมพันธ์กับ  $E_0 E_d$  ดังนี้ คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.50)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (2.51)$$

เมื่อ  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  คือโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 ของสเปกตรัมเชิงแสงตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเห ( $n^*$ ) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (2.52)$$

เมื่อ 
$$n^* = n - ik \quad (2.53)$$

เมื่อ  $n$  = ค่าดัชนีหักเห

$k$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่} \quad \varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.55)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (2.56)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของสภาพนำแสง (optical conductivity,  $\sigma$ ) ไว้ดังนี้ คือ

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

$$\text{เมื่อ} \quad \sigma_1 = \omega\varepsilon_2\varepsilon_0 \quad (2.57)$$

$$\text{และ} \quad \sigma_2 = \omega\varepsilon_1\varepsilon_0 \quad (2.59)$$

## 2.3 ไดอิเล็กตริก สเปกโทรสโคปี (Dielectric Spectroscopy)

### 2.3.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์ (Lorentz model) [4-18]

อิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กตริกจะยึดเหนี่ยวอยู่กับไอออนคอร์ (ion core) ของแลตทิส (lattice) เมื่อสารไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะกวัดแกว่ง (oscillate) รอบจุดสมดุลในแบบฮาร์โมนิก ในเชิงกลศาสตร์ควอนตัมจะหมายถึงอิเล็กตรอนมีการทรานซิชันจากระดับพลังงานค่าหนึ่งไปยังระดับพลังงานอีกค่าหนึ่ง ในกลศาสตร์แผนเดิมจะประมาณว่า ออสซิลเลเตอร์เป็นแบบหน่วง (damped oscillator) ซึ่งแรงหน่วงนี้เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเอง และอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิส เป็นต้น ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กตรอนจะมาจากแรงคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แรงคืนตัวเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนคอร์ และแรงหน่วงเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิส จากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า

$$\sum F = mx'' = -\beta x' - k_s x - eE_x \quad (2.59)$$

สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ

$$E_x = E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.60)$$

แทนสมการที่ (2.60) ลงในสมการที่ (2.59) จะได้

$$x'' + \gamma x' + \omega_0^2 x = \frac{-e}{m} E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.61)$$

เมื่อ  $\beta = \gamma m$  โดยที่  $\gamma$  คือแฟกเตอร์การหน่วง (damping factor) ส่วน  $k_s$  คือค่าสปริง เมื่อ  $k_s = \omega_0^2 m$  โดย  $\omega_0$  คือความถี่กำทอนของตัวออสซิลเลเตอร์ และ  $m$  คือมวลของอิเล็กตรอน สมการคำตอบของการกระจัดของออสซิลเลเตอร์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$x(t) = A \exp(-i\omega t) \quad (2.62)$$

แทนสมการที่ (2.62) ลงในสมการที่ (2.61) จะได้ว่า

$$A = \frac{-eE_0}{m} \left( \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right) \quad (2.63)$$

สมการที่ (2.62) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$x(t) = \left[ \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \right] \exp(-i\omega t) \quad (2.64)$$

ไดโพล โมเมนต์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัว หรือเรียกว่าการโพลาไรซ์ของออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว จะมีค่าดังนี้คือ

$$P = -ex = \frac{e^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.65)$$

การโพลาไรซ์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีค่า

$$\begin{aligned} P &= Nex \\ &= \frac{Ne^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \\ &= \left[ \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right] \epsilon_0 E \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} = \text{ความถี่พลาสมา} \quad (2.67)$$

และ N คือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

การโพลาไรซ์ยังสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างี้

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.68)$$

จากสมการที่ (2.66) และ (2.68) จะได้ว่า

$$\chi = \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.69)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon^*$ ) จะสัมพันธ์กับ  $\chi$  ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon^* &= \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi \\ &= 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \end{aligned} \quad (2.70)$$

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (2.71)$$

$$\epsilon' = \frac{\omega_p^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2} \quad (2.72)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega_p^2 \omega \gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2} \quad (2.73)$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าดัชนีหักเห ( $n^*$ ) จะสัมพันธ์กับไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$n^* = \sqrt{\varepsilon^*} = n + ik \quad (2.74)$$

โดยที่

$$n^2 - k^2 = \varepsilon' \quad (2.75)$$

$$2nk = \varepsilon'' \quad (2.76)$$

เมื่อ  $n$  และ  $k$  คือ ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตัวกลาง สำหรับในกลศาสตร์แผนเดิม  $\omega_0$  คือ ความถี่กำหนดของออสซิลเลเตอร์แบบฮาร์โมนิกอย่างง่ายหนึ่งตัวแต่สำหรับกลศาสตร์ควอนตัม  $\omega_0$  จะสอดคล้องกับผลต่างของระดับพลังงานตอนสุดท้ายกับระดับพลังงานตอนต้น สำหรับระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัว (multiple oscillator) ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + \chi$  ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon^* = 1 + \omega_p^2 \sum_j \left[ \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.77)$$

เมื่อ  $f_j$  คือ ความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) ซึ่งหมายถึงอิเล็กตรอน  $f_j$  ตัวที่มีความถี่  $\omega_j$  และแฟกเตอร์การหน่วง  $\gamma_j$  ในแต่ละโมเลกุลและจะสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งโมเลกุล ( $Z$ ) ดังนี้ คือ

$$\sum_j f_j = Z \quad (2.78)$$

นิยมเรียกสมการที่ (2.77) ว่าเป็นสมการของแบบจำลองลอเรนตซ์ (Lorentz model)

จากสมการที่ (2.77) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon^* = 1 + \frac{Nq^2}{m\varepsilon_0} \sum_j \left[ \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.78)$$

โดยทั่วไปแล้วในส่วนที่เป็นจินตภาพ  $i\omega\gamma_j$  จะไม่มีความสำคัญมากนัก แต่ทว่าในกรณีที่  $\omega$  มีค่าเข้าใกล้ ค่าความถี่  $\omega_0$  ในส่วนจินตภาพจะกลับมามีผลอย่างมาก ดังที่จะแสดงต่อไปนี้

กรณีตัวกลางดิสเพอร์ชัน (dispersion medium) สมการของคลื่นที่ความถี่ใดๆคือ

$$\nabla^2 \tilde{E} = \tilde{\varepsilon} \mu_0 \frac{\partial^2 \tilde{E}}{\partial t^2} \quad (2.79)$$

จะได้สมการของคลื่นระนาบคือ

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.80)$$

ถ้าเลขคลื่นเชิงซ้อน  $\tilde{k}$  คือ

$$\tilde{k} \equiv \sqrt{\tilde{\epsilon}} \mu_0 \omega \quad (2.81)$$

เมื่อเขียน  $\tilde{k}$  อยู่ในพจน์ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

$$\tilde{k} = k + ik \quad (2.81)$$

จากสมการที่ (2.80) กลายเป็น

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{-kz} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.82)$$

จะเห็นว่าคลื่นจะถูกลดทอนลง เนื่องจากความเข้มของคลื่นเป็นอัตราส่วนกับ  $E^2$  (และความเข้มจะสัมพันธ์กับ  $e^{-2kz}$ ) และนิยามได้ว่า

$$\alpha \equiv 2k \quad (2.83)$$

สมการที่ (2.83) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ในขณะเดียวกัน ความเร็วคลื่นคือ  $\omega/k$  และค่าดัชนีหักเหคือ

$$n = \frac{ck}{\omega} \quad (2.84)$$

สำหรับก๊าซแล้ว พจน์ที่สองของสมการที่ (2.78) จะมีค่าน้อยและสามารถประมาณค่ารากที่สองในสมการที่ (2.81) โดยใช้พจน์แรกของการกระจายแบบไบโนเมียล  $\sqrt{1+\epsilon} \cong 1 + \frac{1}{2}\epsilon$  จะได้ว่า

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} \cong \frac{\omega}{c} \left[ 1 + \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega} \right] \quad (2.85)$$

$$n = \frac{ck}{\omega} \cong 1 + \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j(\omega_{0j}^2 - \omega^2)}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 + \gamma_j^2\omega^2}$$

ถ้าพิจารณาในช่วงความถี่ที่ต่างจากความถี่กำทอน แล้วการหน่วงสามารถตัดทิ้งได้และสูตรในการหาค่าดัชนีหักเหเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายคือ

$$n = 1 + \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \quad (2.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุโดยส่วนใหญ่มีความถี่ธรรมชาติ  $\omega_j$  แต่สำหรับวัสดุที่โปร่งแสงแล้วความถี่กำหนดจะอยู่ในย่านอัลตราไวโอเลตดังนั้น  $\omega < \omega_j$  แล้วจะได้

$$\frac{1}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} = \frac{1}{\omega_{0j}^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0j}^2}\right)^{-1} \cong \frac{1}{\omega_{0j}^2} \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_{0j}^2}\right)$$

และจากสมการที่ (2.85) เปลี่ยนรูปเป็น

$$n = 1 + \left( \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2} \right) + \omega^2 \left( \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^4} \right) \quad (2.87)$$

หรือในพจน์ของความยาวคลื่นในสุญญากาศ ( $\lambda = 2\pi c/\omega$ )

$$n = 1 + A \left(1 + \frac{B}{\lambda^2}\right) \quad (2.88)$$

จากสมการที่ (2.88) เป็นที่รู้จักในนามของ สมการคอสซี (Cauchy's formula) ค่าคงที่ A คือค่าสัมประสิทธิ์ของการหักเห และ B คือค่าสัมประสิทธิ์ของดิสเพอร์ชัน สมการคอสซีใช้ได้กับก๊าซที่อยู่ในย่านคลื่นแสง (optical region)

### 2.3.2 แบบจำลองของดรูค (Drude Model) [4-18]

สำหรับสารประเภทโลหะ อิเล็กตรอนอิสระจะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับ ไอออนคอร์และประมาณว่าไม่มีค่านิจของสปริง ดังนั้น  $\omega_0 = 0$  จากสมการที่ (2.70) จะได้ว่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของโลหะคือ

$$\epsilon^* = 1 + \frac{\omega_p^2}{(-\omega^2 - i\omega\gamma)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.89)$$

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของแบบจำลองของดรูค คือ

$$\epsilon' = 1 - \left( \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \right) \quad (2.90)$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \quad (2.91)$$

โดยทั่วไป  $\omega_p > \gamma$  ถ้าพิจารณาที่ความถี่  $\omega > \omega_p$  เราจะได้ว่าค่า  $\epsilon''$  เข้าสู่ศูนย์ซึ่ง  $k$  จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ด้วย หมายความว่าที่ความถี่สูง ( $\omega > \omega_p$ ) ตัวกลางที่เป็นโลหะจะไม่ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือตัวกลางจะโปร่งแสงกล่าวคือ อิเล็กตรอนในโลหะจะไม่ตอบสนองตามสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามา โลหะจึงยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (โดยเฉพาะย่านอัลตราไวโอเลต) ส่งผ่านไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการเตรียมฟิล์มบางของวัสดุโดยการระเหยด้วยลำเลเซอร์ อนุภาคที่หลุดจากผิวหน้าของสารตั้งต้น (precursor) มักจะเป็นอะตอมที่ถูกไอออไนซ์ ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่เป็นพลาสมา ถ้าความถี่ของเลเซอร์มีค่าน้อยกว่าความถี่ของพลาสมา ลำเลเซอร์จะถูกสะท้อนกลับออกมา จึงทำให้เลเซอร์เดินทางเข้าไปไม่ถึงเป้าที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ดังนั้นจำเป็นต้องใช้งานในช่วงความถี่  $\omega$  โดยมีเงื่อนไขว่า

$$\omega > \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}} \quad (2.92)$$

เมื่อ  $N$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (หรือไอออนประจุลบ) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งจำนวนของอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ขณะที่กำลังระเหยสารต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$N < \frac{\omega^2 m \epsilon_0}{e^2} \quad (2.93)$$

### 2.3.3 สภาพนำไฟฟ้าที่ความถี่ค่าต่ำ [4-18]

บางครั้งในหนึ่งโมเลกุลอาจมีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเราจะให้  $f_0$  เป็นเศษส่วนของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระต่อหนึ่งโมเลกุล โดยที่อิเล็กตรอนอิสระจะส่งผลให้  $\omega_0 = 0$  จากสมการที่ (2.77) ให้เอา  $\epsilon_0$  คูณตลอดและแทนพจน์แรกด้วย  $\epsilon_b(\omega)$  เมื่อ  $\epsilon_b(\omega)$  คือค่าไดอิเล็กตริกของอะตอมพื้นหลัง (background lattice) และให้  $\omega_0 = 0$  แล้วจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \epsilon^*(\omega) &= \epsilon_b(\omega) + \frac{\omega_p^2 f_0 \epsilon_0}{(-\omega^2 - i\omega\gamma_0)} = \epsilon_b(\omega) + \frac{\omega_p^2 f_0 \epsilon_0}{(i^2 \omega^2 - i\omega\gamma_0)} \\ &= \epsilon_b(\omega) + \frac{\omega_p^2 f_0 \epsilon_0}{-i\omega(-i\omega + \gamma_0)} \left( \frac{i}{i} \right) \\ &= \epsilon_b(\omega) + i \left[ \frac{\omega_p^2 f_0 \epsilon_0}{\omega(\gamma_0 - i\omega)} \right] \end{aligned}$$

หรือ

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_b(\omega) + i \left[ \frac{Ne^2 f_0}{m\omega(\gamma_0 - i\omega)} \right] \quad (2.94)$$

พจน์ที่ 1 ของสมการที่ (2.94) เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนที่ผูกพันกับไอออนคอร์ ส่วนพจน์ที่ 2 จะเกี่ยวกับอิเล็กตรอนอิสระที่มีเศษส่วนเป็น  $f_0$  ในหนึ่งโมเลกุล จากกฎของแมกเวลล์-แอมแปร์

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (2.95)$$

เมื่อ  $\vec{H}$ ,  $\vec{J}$  และ  $\vec{D}$  คือ สนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และการกระจัดเชิงไฟฟ้าตามลำดับ โดยที่การกระจัดเชิงไฟฟ้า  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  ส่วนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$  แทนค่า  $\vec{J}$  และ  $\vec{D}$  ลงในสมการที่ (2.95) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \frac{d}{dt}(\epsilon_b \vec{E}) = \sigma \vec{E} + \frac{d}{dt}[\epsilon_b \epsilon_0 \exp(-i\omega t)] \\
&= \sigma \vec{E} - i\omega \epsilon_b \vec{E} = -i\omega \left( \epsilon_b \vec{E} + i \frac{\sigma}{\omega} \vec{E} \right) \\
&= -i\omega \left( \epsilon_b + i \frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E}
\end{aligned} \tag{2.96}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H} &= -i\omega \epsilon(\omega) \vec{E} \\
\text{เมื่อกำหนดให้} \quad \epsilon^*(\omega) &= \epsilon_b + i \left( \frac{\sigma}{\omega} \right)
\end{aligned} \tag{2.97}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.97) เทียบกับสมการที่ (2.94) จะได้ว่า

$$\sigma = \frac{f_0 N e^2}{m(\gamma_0 - i\omega)} \tag{2.98}$$

สมการที่ (2.98) นี้แสดงถึงสภาพนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระที่มีจำนวน  $f_0 N$  ตัวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant) คือ  $\gamma_0/f_0$  สามารถคำนวณทำได้จากการทดลอง ยกตัวอย่างเช่น โลหะทองแดง มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระประมาณ  $8 \times 10^{28}$  ต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิห้องมีสภาพนำไฟฟ้าประมาณ  $5.9 \times 10^7$  ซีเมนส์ต่อเมตร จากการคำนวณจะได้ว่า  $\gamma_0/f_0 = 4 \times 10^{13}$  ต่อวินาที ถ้าประมาณว่า  $f_0 = 1$  จะได้ว่าที่ความถี่ตั้งแต่ย่านไมโครเวฟลงมา ( $\omega < 10^{11}$  ต่อวินาที) สภาพนำไฟฟ้าของโลหะทองแดงจะเป็นจำนวนจริง (กล่าวคือกระแสไฟฟ้าจะมีเฟสตรงกับสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) และไม่ขึ้นกับความถี่ แต่ถ้าความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงกว่านี้ (เช่น ตั้งแต่คลื่นอินฟราเรดขึ้นไป) สภาพนำไฟฟ้าจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนและขึ้นกับความถี่ จากสมการที่ (2.97) สามารถที่จะแสดงสมบัติของตัวกลางได้จากค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน  $\epsilon^*(\omega)$  ที่สัมพันธ์กับสภาพนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับความถี่ ดังนี้คือ

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_b(\omega) + i \left( \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \tag{2.99}$$

หรือบางครั้งนิยมเขียน  $\epsilon(\infty)$  แทน  $\epsilon_b(\omega)$  ดังนี้

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_b(\infty) + i \left( \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \tag{2.100}$$

เมื่อ  $\epsilon(\infty)$  คือ ค่าไดอิเล็กตริกเชิงแสง (optical dielectric constant) มักจะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งเมื่อความถี่ค่าสูงๆระดับอินฟราเรดขึ้นไป

### 2.3.4 ความถี่พลาสมา [4-18]

ที่ความถี่สูงกว่าความถี่กำหนดสูงสุด (highest frequency) จากสมการที่ (2.77) จะได้ว่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะกลายเป็น

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon^* = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.101)$$

เมื่อ 
$$\omega_p^2 = \frac{NZe^2}{m\epsilon_0} \quad (2.102)$$

เมื่อ  $\omega_p$  คือ ความถี่พลาสมาซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอน  $NZ$  ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สำหรับตัวกลางที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กความสัมพันธ์การกระจาย (dispersion relation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

$$\epsilon^*(\omega, k)\omega^2 = c^2k^2 \quad (2.103)$$

แทนค่า  $\epsilon^*(\omega)$  ของสมการที่ (2.101) ลงใน (2.103) แล้วจะได้ว่า

$$\omega^2 - \omega_p^2 = c^2k^2$$

หรือ 
$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2k^2 \quad (2.104)$$

สมการที่ (2.104) คือ ความสัมพันธ์การกระจายในตัวกลางไดอิเล็กตริกโดยที่  $\omega$  เป็นฟังก์ชันของ  $k$  สำหรับในสารไดอิเล็กตริก สมการที่ (2.101) จะใช้ได้เมื่อ  $\omega^2 \gg \omega_p^2$  แล้วค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง สำหรับ  $\omega < \omega_p$  แล้วค่า  $k$  ของสมการที่ (2.104) จะมีเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่า  $k$  เป็นค่าจินตภาพ ซึ่งหมายความว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้และสะท้อนกลับออกมา สนามไฟฟ้าภายในตัวกลางจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยสัมพันธ์การลดทอนที่  $\omega = 0$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$\alpha_{\text{plasma}} \approx \frac{2\omega_p}{c} \quad (2.105)$$

ถ้าในระบบพลาสมามีความหนาแน่นของพลาสมาประมาณ  $10^{18}$ - $10^{22}$  ต่อลูกบาศก์เมตร ความถี่พลาสมา ( $\omega_p$ ) จะมีค่าประมาณ  $6 \times 10^{10}$ - $6 \times 10^{12}$  ต่อวินาที แล้วระยะเวลาลดทอน ( $\alpha^{-1}$ ) ของคลื่นความถี่ต่ำ จะมีค่าอยู่ในช่วง  $0.2$ - $2 \times 10^{-3}$  เซนติเมตร จากสมการที่ (2.94) ค่าไดอิเล็กตริกของโลหะที่ความถี่สูงๆ ( $\omega \gg \gamma_0$ ) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_b(\omega) - \frac{\omega_p^2 \epsilon_0}{\omega^2} \quad (2.106)$$

ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่  $\omega \ll \omega_p$  แล้วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านโลหะได้ ดังที่อธิบายด้วยสมการที่ (2.101) แต่ถ้า  $\omega \gg \omega_p$  โลหะจะยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านไปได้

### 2.3.5 สมการของเฮเกน-รูเบนส์ (Hagen-Rubens Equation) [4-18]

สำหรับในโลหะเราสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับสภาพนำไฟฟ้าได้จากแบบจำลองของลอเรนตซ์ การกระจัดของอิเล็กตรอนจะขึ้นกับเวลา ดังสมการที่ (2.74) ซึ่งเราสามารถหาความเร็วของอิเล็กตรอนในเวลาใดๆ ได้ดังนี้ คือ

$$v = \frac{-eE_0(-i\omega)\exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.107)$$

ในกรณีไฟฟ้ากระแสตรง  $\omega \rightarrow 0$  (และอิเล็กตรอนอิสระมี  $\omega = 0$ ) แล้วจะได้ว่า

$$v = \frac{eE}{m\gamma} \quad (2.108)$$

ความหนาแน่นของกระแสสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{J} = Ne\vec{v} = \sigma_{dc}\vec{E} \quad (2.109)$$

จากสมการที่ (2.108) และ (2.109) จะได้ว่า

$$\sigma_{dc} = \frac{Ne^2}{m\gamma} = \frac{\omega_p^2 \epsilon_0}{\gamma} \quad (2.110)$$

ในกรณีที่ง่ายที่สุด จะพิจารณาว่า แพกเคอร์การหน่วงเกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนด้วยกันเองหรือระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ แล้ว  $\gamma = 1/\tau$  เมื่อ  $\tau$  คือเวลาของการกระเจิง (scattering time) ดังนั้นสมการที่ (2.110) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma_{dc} = \frac{Ne^2\tau}{m} \quad (2.111)$$

จากสมการที่(2.110) เราสามารถที่จะคำนวณหาค่า  $\gamma$  ได้ จากนั้นจึงแทน  $\gamma$  ลงในแบบจำลองของครูด เพื่อคำนวณหา  $n$  และ  $k$  ซึ่งกรณีไฟฟ้ากระแสตรง ( $\omega \rightarrow 0$ ) จะได้ว่า

$$\epsilon' = n^2 - k^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\gamma^2} \quad (2.112)$$

$$\epsilon'' = 2nk = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \approx \frac{\omega_p^2}{\omega\gamma} \quad (2.113)$$

และประมาณว่า

$$n \approx k = \left( \frac{\omega_p^2}{2\omega\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{\sigma_{dc}}{2\omega\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{0.003\lambda}{\rho_{dc}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.114)$$

เรียกสมการที่ (2.114) นี้ว่าสมการของเฮเกน-รูเบนส์



จากสมการที่ (2.119) จะได้  $\vec{E}_{\text{ex}} = \left( \frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} \right) \vec{E}_{\text{local}}$  และจากสมการที่ (2.120) จะได้  $\vec{P} = \chi\varepsilon_0 \vec{E}_{\text{local}}$   
แทนค่าความสัมพันธ์ทั้ง  $\vec{E}_{\text{ex}}$  และ  $\vec{P}$  ที่ได้นี้ลงในสมการที่ (2.118) แล้วจะได้ว่า

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \left( \frac{\varepsilon + 2\varepsilon_0}{3\varepsilon_0} \right) \chi$$

$$\frac{\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 1 \right)}{\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} + 2 \right)} = \frac{1}{3} \chi$$

และจากค่า  $\chi$  ของสมการที่ (2.110) จะได้ว่า

$$\frac{\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 1 \right)}{\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} + 2 \right)} = \frac{(\varepsilon^* - 1)}{(\varepsilon^* + 2)} = \frac{(n + ik)^2 - 1}{(n + ik)^2 + 2} = \frac{1}{3} \sum_j \left[ \frac{\omega_{pj}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.123)$$

ผลรวมของพจน์ขวามือของสมการที่ (2.123) มาจากตัวออสซิลเลเตอร์จำนวน  $j$  ตัวและเรียกสมการที่ (2.123) นี้ว่า ความสัมพันธ์ของคลอเซียส-มอสซอตติ (Clausius-Mossotti relation) เป็นการแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นปริมาณมหภาค จะสัมพันธ์อยู่กับตัวออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นปริมาณจุลภาค นอกจากนั้นสมการที่ (2.123) ยังสามารถเขียนได้เป็น

$$\varepsilon^* = 1 + \sum_j \left[ \frac{\omega_{pj}^2}{\Omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.124)$$

สมการที่ (2.124) นี้เหมือนกับสมการที่ (2.70) ซึ่งได้จากแบบจำลองของลอเรนตซ์ เพียงแต่เปลี่ยน  $\omega_0$  เป็น  $\Omega_0$  โดยที่

$$\Omega_{0j}^2 = \omega_{0j}^2 - \frac{\omega_{pj}^2}{3} \quad (2.125)$$

เมื่อ  $\omega \ll \omega_0$  เราอาจจะไม่ต้องคิดพจน์  $\omega$  ที่เป็นตัวหารของสมการที่ (2.124) ก็ได้ ดังนั้นด้านขวามือของสมการที่ (2.124) จะไม่ขึ้นกับความถี่ ( $\omega$ ) แต่จะขึ้นกับ  $\omega_p^2$  และ  $\omega_p^2$  นี้จะแปรตรงกับจำนวนออสซิลเลเตอร์ซึ่งก็คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $\rho$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{(\varepsilon^* - 1)}{(\varepsilon^* + 2)} = \rho \times \text{constant} \quad (2.126)$$

ในกรณีที่ความถี่ ( $\omega$ ) ต่างจากค่า  $\omega_0$  มากๆ การดูคลื่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ เราอาจเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \text{constant} \quad (2.127)$$

จะเรียกสมการที่ (2.127) ว่าเป็น สมการของลอเรนตซ์-ลอเรนตซ์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นอิเล็กตรอนกับค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) บางครั้งเหมาะกับการทดลองซึ่งบ่งบอกว่าค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไปมีสาเหตุมาจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนไป สำหรับระบบที่เป็นก๊าซ ค่าดัชนีหักเห  $n \approx 1$  แล้วสมการที่ (2.127) จะลดรูปลงเป็น

$$\frac{n-1}{\rho} = \text{constant} \quad (2.128)$$

บางครั้งมีการเขียนไดโพลโมเมนต์ของอะตอมใดๆให้อยู่ในรูปของ  $E_{\text{local}}$  ดังนี้คือ

$$P = \alpha E_{\text{local}} \quad (2.129)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ความสามารถในการโพลาริซซ์ของอะตอมใดๆ ซึ่งหมายถึง แนวโน้มการกระจายของประจุ เช่น กลุ่มเมฆอิเล็กตรอนในอะตอมที่ผิดรูปไปจากรูปทรงปกติขณะที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นการโพลาริซซ์ของผลึกของวัสดุ จะมีค่าดังนี้

$$P = \sum_j N_j p_j = \sum_j N_j \alpha_j E_{\text{local}}(j) \quad (2.130)$$

เมื่อ  $N_j$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมชนิดที่  $j$  และ  $\alpha_j$  คือความสามารถในการโพลาริซซ์ของอะตอมชนิดที่  $j$  โดยที่  $E_{\text{local}}(j)$  คือสนามไฟฟ้าของอะตอมชนิดที่  $j$  แทนสมการที่ (2.117) ลงใน (2.130) จะได้ว่า

$$P = \left( \sum_j N_j \alpha_j \right) \left( E + \frac{P}{3\epsilon_0} \right)$$

$$P = \frac{\sum_j N_j \alpha_j E}{1 - \frac{\sum_j N_j \alpha_j E}{3\epsilon_0}}$$

จาก นิยาม

$$\chi = \frac{P}{\epsilon_0 E}$$

ดังนั้น

$$\chi = \frac{\frac{1}{\epsilon_0} \left( \sum_j N_j \alpha_j \right)}{1 - \frac{\sum_j N_j \alpha_j}{3\epsilon_0}}$$

และจากนิยาม

$$\epsilon^* = 1 + \chi$$

ดังนั้น

$$\varepsilon^* = 1 + \frac{\sum_j N_j \alpha_j}{1 - \frac{\sum_j N_j \alpha_j}{3\varepsilon_0}}$$

$$\varepsilon^* - 1 = \frac{\frac{\sum_j N_j \alpha_j}{\varepsilon_0}}{1 - \frac{\sum_j N_j \alpha_j}{3\varepsilon_0}} = \frac{3 \sum_j N_j \alpha_j}{3\varepsilon_0 - \sum_j N_j \alpha_j} \quad (2.131)$$

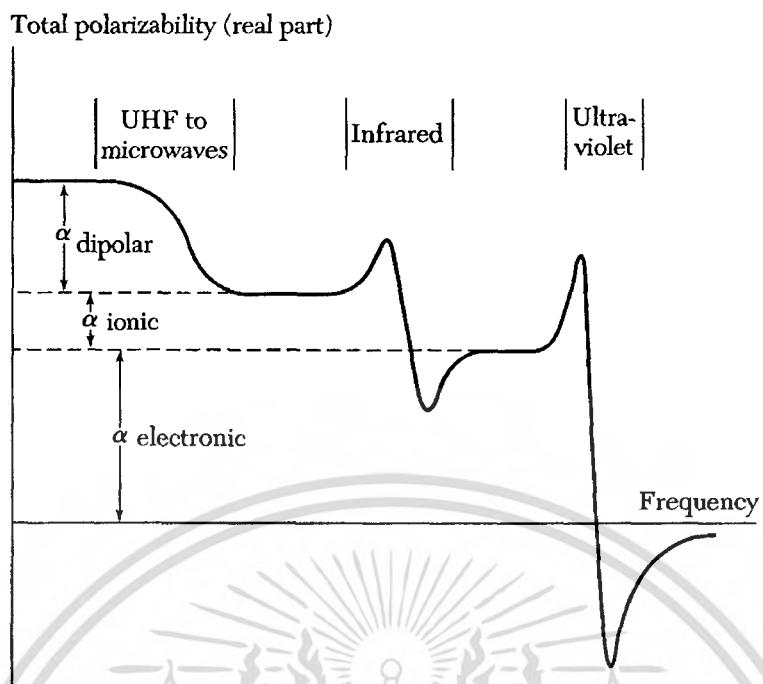
จากสมการที่ (2.131) ให้เอา 3 บวกเข้าทั้งด้านซ้ายและขวาจะได้ว่า

$$\varepsilon^* + 2 = \frac{3 \sum_j N_j \alpha_j}{1 - \frac{\sum_j N_j \alpha_j}{3\varepsilon_0}} + 3 = \frac{9\varepsilon_0}{3\varepsilon_0 - \sum_j N_j \alpha_j} \quad (2.132)$$

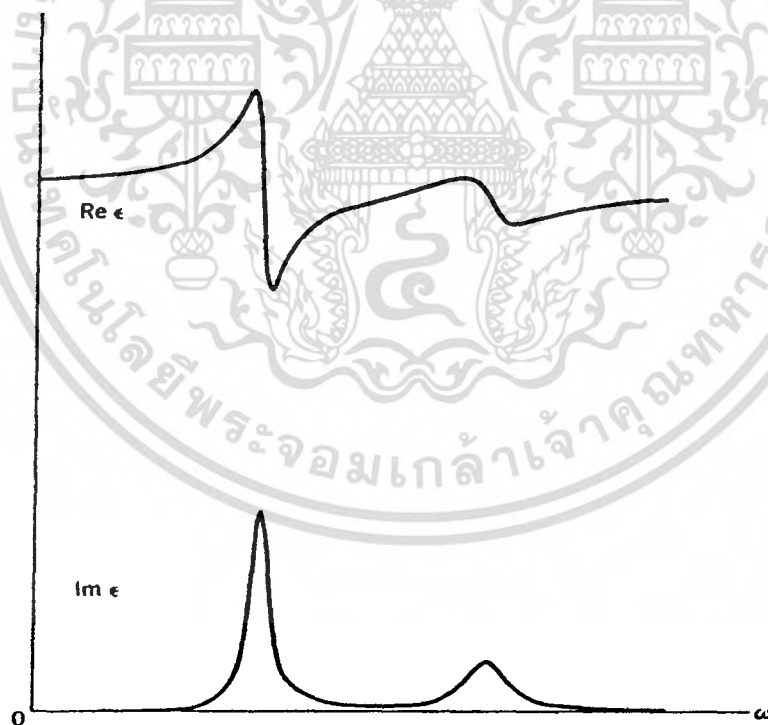
เอาสมการที่ (2.131) หาคำด้วย (2.132) จะได้ว่า

$$\frac{\varepsilon^* - 1}{\varepsilon^* + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \sum_j N_j \alpha_j \quad (2.133)$$

สมการที่ (2.133) เรียกว่าสมการของคลอเซียส-มอสซอตติ ที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความสามารถในการโพลาไรซ์ของอะตอมของสารไดอิเล็กตริก ความสามารถในการโพลาไรซ์สุทธิจะมาจากสามส่วนคือ ส่วนแรก มาจากการบิดรูปของวงโคจรของอิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียส (electronic contribution) ส่วนที่สองมาจากการกระจัดของประจุไอออนเมื่อเทียบกับไอออนข้างเคียง (ionic contribution) ส่วนที่สามมาจากไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุล (dipolar contribution) ซึ่งสามารถขยับได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจากภายนอก ในรูปที่ 2.6 จะแสดงความสามารถในการโพลาไรซ์สุทธิของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่างๆ ส่วนรูปที่ 2.7 แสดงจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่ ซึ่งในรูปนี้ได้แสดงความถี่กำหนดจำนวนสองค่า



รูปที่ 2.6 แสดงความสามารถในการโพลาไรซ์สุทธิที่ความถี่ค่าต่างๆของสาร ไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมักจะกล่าวถึงอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี หรือ แอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีด้วยเหมือนกัน โดยที่แอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน( $Y^*$ ) จะสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนดังนี้

$$Y^* = \frac{1}{Z^*} \quad (2.134)$$

นอกจากนี้ยังมีอิเล็กทริกโมดูลัสเชิงซ้อน(complex electric modulus,  $M^*$ ) และสภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อน(complex permittivity,  $\epsilon^*$ ) รวมทั้งแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor,  $\tan\theta$ ) รวมทั้งหมดเป็น 5 สมการที่สัมพันธ์ดังนี้

$$Z^* = Z' - jZ'' \quad (2.135)$$

$$Y^* = Y' + jY'' = j\omega C_0 \epsilon^* \quad (2.136)$$

$$M^* = M' + jM'' = j\omega C_0 Z^* \quad (2.137)$$

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = (M^*)^{-1} \quad (2.138)$$

$$\tan\theta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{-Z''}{Z'} = \frac{C''}{C'} = \frac{M''}{M'} = \frac{Y''}{Y'} \quad (2.139)$$

เมื่อ  $C_0$  = ความจุของตัวเก็บประจุที่มีอากาศเป็นตัวกลาง

จำนวนจริง ( $\epsilon'$ ) กับ จำนวนจินตภาพ ( $\epsilon''$ ) ของสภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อน( $\epsilon^*$ ) จะสัมพันธ์กับ  $Z'$  และ  $Z''$  ดังนี้ คือ

$$\epsilon' = \frac{Z''}{\omega C |Z|^2} \quad (2.140)$$

$$\epsilon'' = \frac{Z'}{\omega C |Z|^2} \quad (2.141)$$

เมื่อ  $|Z|^2 = (Z' - jZ'')(Z' + jZ'') = |Z'|^2 + |Z''|^2$  (2.142)

จำนวนจริง ( $M'$ ) กับ จำนวนจินตภาพ ( $M''$ ) ของโมดูลัสเชิงซ้อน ( $M^*$ ) จะสัมพันธ์กับ  $Z'$  และ  $Z''$  ดังนี้ คือ

$$M' = \omega C_0 Z'' \quad (2.143)$$

## 2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [4, 9, 12, 14-18]

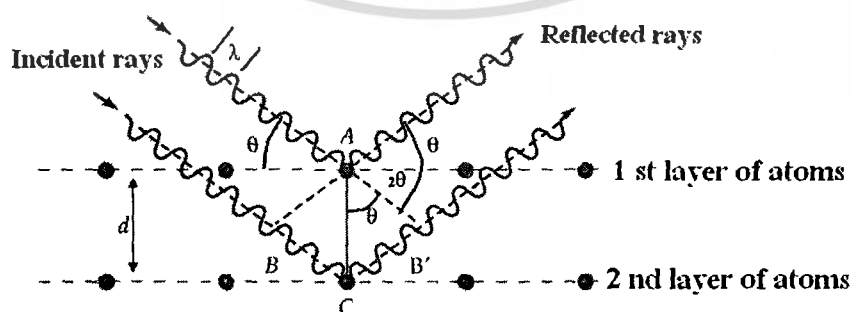
การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยวิธี  $\theta$ - $2\theta$  ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบร์รอก์

ในปี ค.ศ. 1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.144)$$

- เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน  
 $\theta$  คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ  
 $n$  คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,...

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไประนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบร์รอก์ เรียกว่าระนาบแบร์รอก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร์รอก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีเวิร์กการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โดยพิจารณาได้ในแต่ละโครงสร้างผลึกดังนี้

#### 2.4.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จัดอยู่ในรูปผลึกแบบคิวบิก (cubic) จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.145)$$

#### 2.4.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ทำได้จากสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.146)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก

$h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อของระนาบ

## 2.5 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [4, 9, 12, 14-18]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำทำให้ทราบถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโดยจะกล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์, ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของแควมียมซัลไฟด์, สเปกตรัมการส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

### 2.5.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน

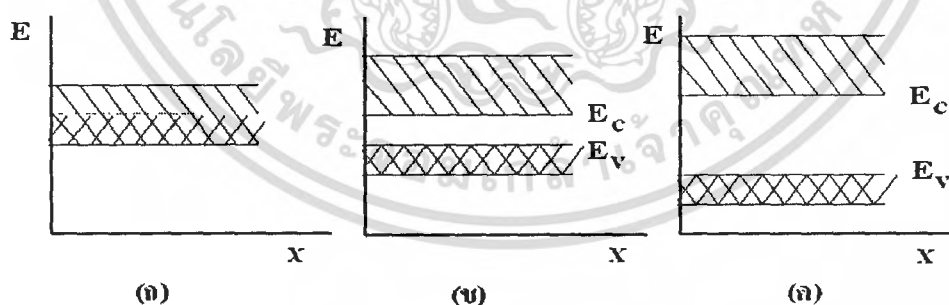
ในโลหะอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กทรอนิกส์และถือว่าเป็นอิเล็กทรอนิกส์อิสระไม่ถูกยึดอยู่ที่อะตอมหนึ่งอะตอมใดโดยเฉพาะซึ่งไม่เหมือนกับอิเล็กทรอนิกส์ในสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ไม่เป็นอิสระอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดกระแสอาจถูก เรียกว่า ตัวนำอิเล็กตรอน (conduction electron) และในผลึกของแข็งอาจพิจารณาได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในผลึกซึ่งมี ศักย์แบบเป็นคาบ (periodic potential) อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างของไอออนคอร์ (ion core) มีระยะเท่ากันตลอดซึ่งเท่ากับค่าคงที่ของ โครงผลึก (lattice constant) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงาน ของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีได้นั้นจะมีได้ในแถบหนึ่งแถบใดเท่านั้นคือ แถบยินยอม (allowed band) และ แถบพลังงานที่จะมีได้นี้จะถูกแบ่งกันไว้ด้วยแถบพลังงานต้องห้ามซึ่งหมายถึงพลังงานในย่านนี้ อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะมีได้ แถบดังกล่าวถูกเรียกว่า “แถบต้องห้ามหรือช่องว่าง แถบพลังงาน” (forbidden band or energy gap) ภายในแถบยินยอมหนึ่งๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนี้ จะแสดงตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระทุกประการ

### 2.5.1.1 โลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

ลักษณะ โครงสร้างของแถบพลังงานของของแข็งดังรูปที่ 2.12 สามารถบ่งบอกคุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของวัสดุของแข็งนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี สภาพความนำไฟฟ้าของสารใดๆ จะมีค่ามากหรือ น้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือปริมาณของความหนาแน่นของประจุพาหะที่มีอยู่กรณีที่จะมีการนำ ไฟฟ้าได้แล้วจำเป็นที่จะต้องมีส่วนที่ว่างอยู่ในแถบพลังงานและเมื่อมีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ ระดับต่างๆซึ่งอยู่ได้ระดับพลังงานที่ว่างอยู่ก็จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ใน สถานะที่ ว่างอยู่นั้นจากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นๆก็จะเคลื่อนที่ตามกันไปอย่างนี้จะทำให้เกิดการไหล ของกระแสอิเล็กตรอนขึ้น ตัวนำที่ดีจะต้องมีพาหะซึ่งอยู่ในระดับต่างๆ ภายในแถบพลังงานซึ่ง ประกอบด้วยแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบนำและแถบวาเลนซ์ซ้อนเหลื่อมกันซึ่งคือ โครงสร้าง แถบพลังงานของโลหะนั่นเอง ดังรูปที่ 2.9 (ก)

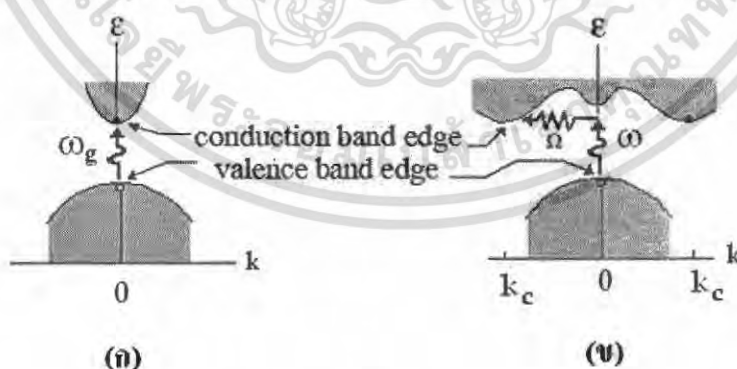


รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของของแข็ง

- ก. โลหะ
- ข. กึ่งโลหะ
- ค. ฉนวน

### 2.5.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบคือ แบบตรง (direct bandgap) และแบบเฉียง (indirect bandgap) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น (wave vector ;  $k$ ) ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากันถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $h\nu = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึกคือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนโฟตอน (absorption coefficient) กับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.11 (ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้เกิดกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟนอนเกิดขึ้น  $h\omega = E_g \pm \hbar\Omega$  เมื่อ  $\Omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอนนั้นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ทำให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังต่ำสุดของแถบนำ จะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุมมีเวกเตอร์คลื่น  $k \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอนและสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระแสดงดังรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนดังรูป 2.11 (ข)

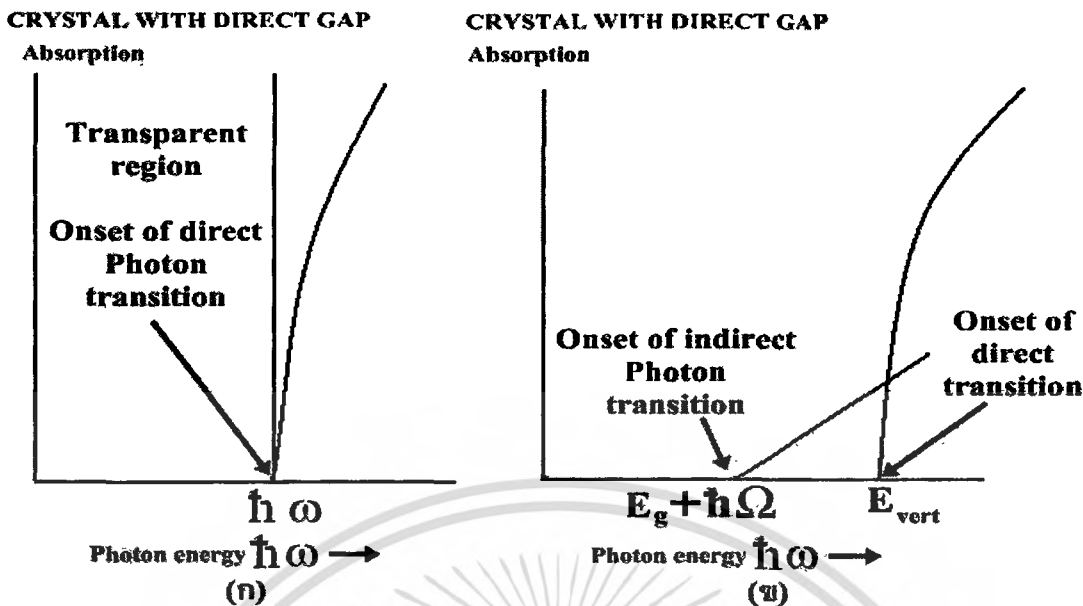


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

ก. โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

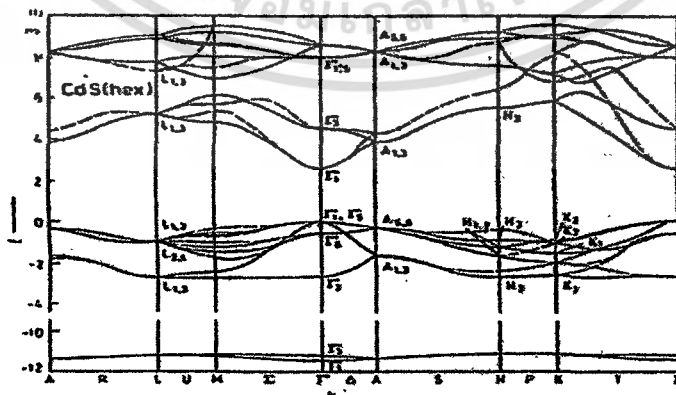
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์  
 ก. โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีกระบวนการสร้างโฟนอน

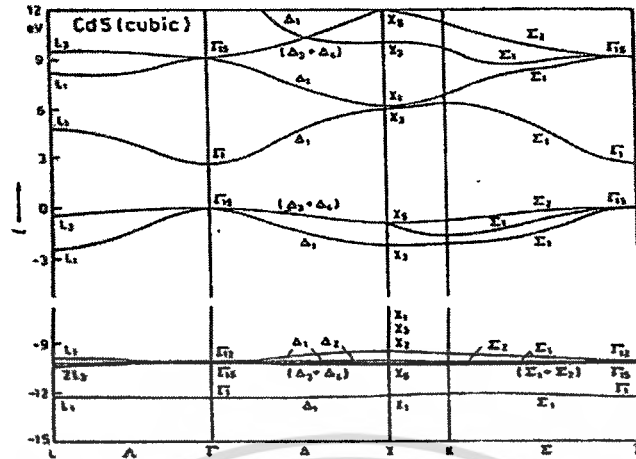
2.5.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์

แคดเมียมซัลไฟด์ มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงคือ มีการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปจุดต่ำสุดของแถบนำซึ่งอยู่ที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรือที่ตำแหน่ง  $\Gamma$  ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และเวิร์ทไซท์ ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 โดยที่โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.5 และ 2.51 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต

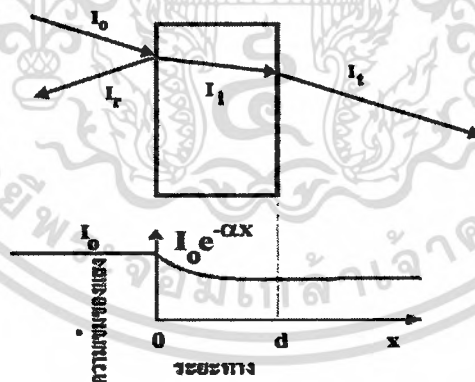
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงก์เบลนด์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต

## 2.6 การส่งผ่านแสง [4, 9, 12, 14-18]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

- เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง  
 $I_R$  คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง  
 $I_T$  คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $I_t$  คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง  
 $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)  
 $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)  
 $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)  
 $d$  คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.147)$$

หรือ 
$$I_x = RI_0 \quad (2.148)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_t = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.149)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

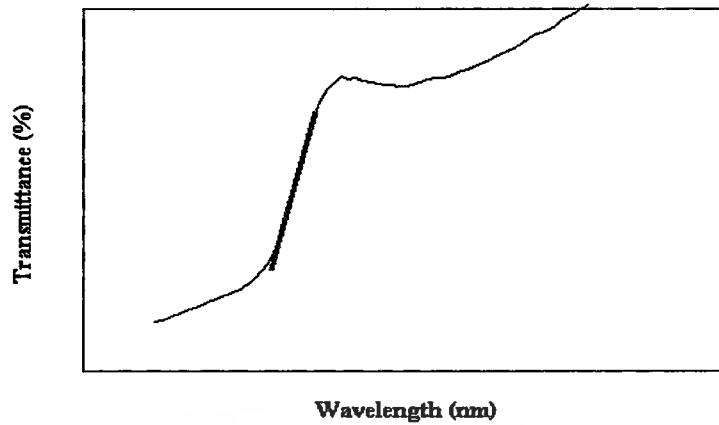
$$I_t = I_t e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.150)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.151)$$

### 2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.17 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.152)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.153)$$

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.154)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.154) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

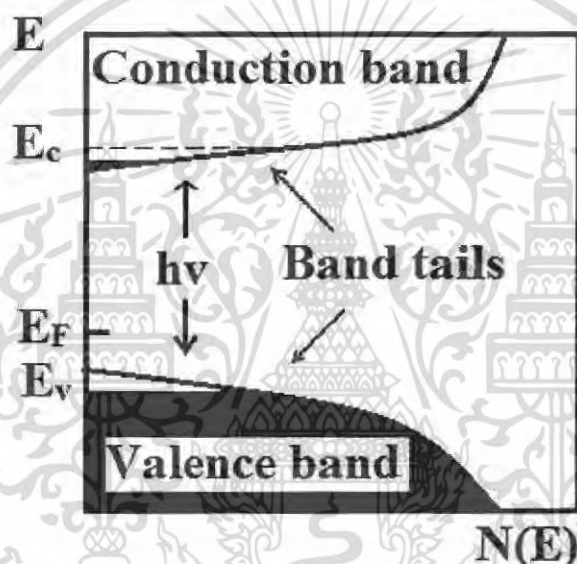
$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.155)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.155) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน [4, 12, 15-23]

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.34



รูปที่ 2.1.6 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

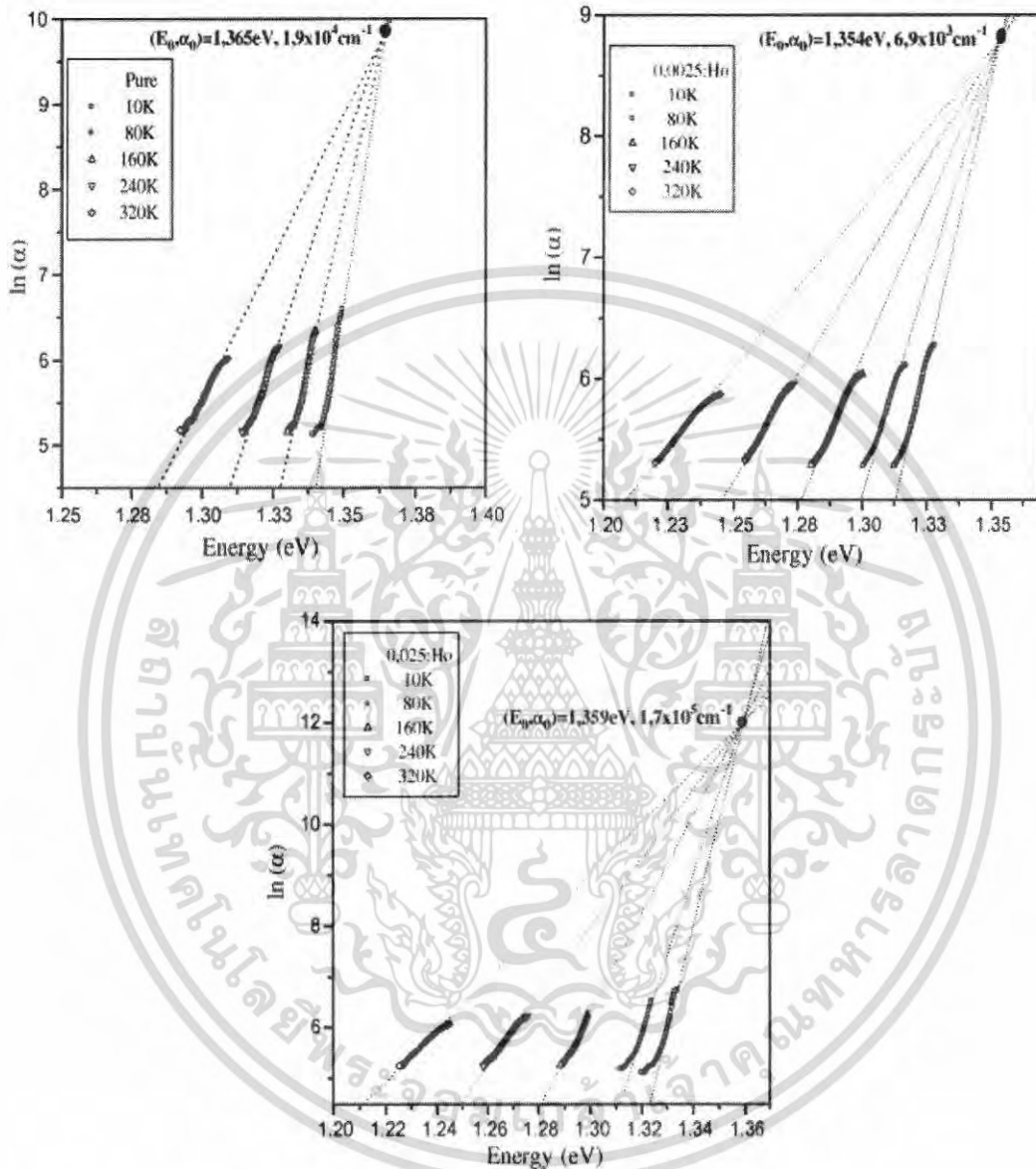
ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.156)$$

เมื่อ  $\alpha_0$  และ  $E_0$  เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน  $k_B$  คือค่าของที่ของโบลตซ์มันน์  $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ  $\sigma$  คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.80)

นี้บอกเป็นนัยๆว่า กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆจะเข้าสู่จุด  $(E_0, \alpha_0)$  ซึ่งเรียกจุดนี้ว่าจุดลู่รวม (converging point) ดังปรากฏในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.17 แสดงเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับ พลังงาน  $h\nu$  ที่อุณหภูมิใดๆ

บิลกิน (Bilgin) และผู้ร่วมงาน [20] เสนอว่าที่อุณหภูมิห้องและในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า  $E_g$  สมการที่ (2.80) จะลดรูปลงเป็นสมการที่ (2.81) ดังนี้

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right) \quad (2.157)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\alpha_0$  เป็นค่าคงตัว ส่วน  $E_0$  เป็นความกว้างของแถบช่องว่างของพลังงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้นค่า  $E_0$  จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับพลังงาน ( $E$ ) ในช่วงพลังงานที่มีค่าต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$

อริบารเรน (Iribarren) และผู้ร่วมงาน [21] ได้เสนอว่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้องจะสัมพันธ์กับขนาดของเกรน ( $R$ ) ดังสมการ

$$E_0 = 21.18 + \frac{121.84}{R} \quad (2.158)$$

เมื่อ  $R$  คือขนาดของเกรนมีหน่วยเป็น ไมโครเมตร และ  $E_0$  มีหน่วยเป็น มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตามการเกิด  $E_0$  ในฟิล์มบางยังขึ้นกับปัจจัยต่างๆอีกอย่างน้อย 4 ชนิด คือชนิดของขอบเกรน อันตรกิริยาระหว่างพาหะอิสระกับสารเจือและระหว่างพาหะอิสระกับโฟนอน ข้อบกพร่องของเนื้อผลึก (bulk defects) และการจัดเรียงตัวใน โครงผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น  $E_0$  จะเป็นผลรวมของส่วนหางของพลังงานที่เกิดจากปัจจัยอย่างน้อย 4 ชนิดจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$E_0 = E_{0i} + E_{0,GB} + E_{0,def} + E_{0v} \quad (2.159)$$

เมื่อ

$E_{0i}$  คือ ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างพาหะอิสระกับสารเจือและระหว่างพาหะอิสระกับโฟนอน

$E_{0,GB}$  คือ ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของขอบเกรนในฟิล์มบาง

$E_{0,def}$  คือ ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของข้อบกพร่องผลึกในเนื้อผลึก

$E_{0v}$  คือ ส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของการจัดเรียงตัวของอะตอมใน โครงผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

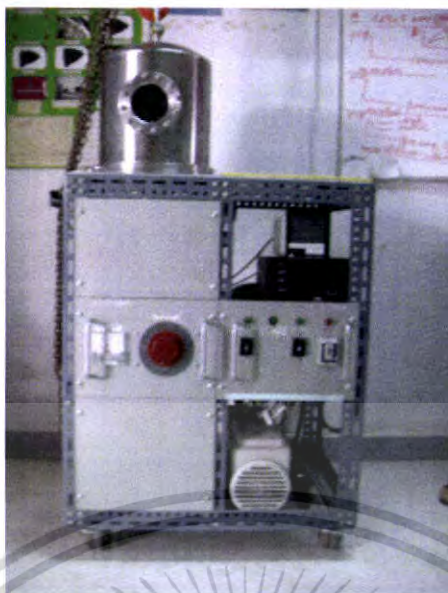
ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางประการของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ รวมทั้งกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาพร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าส่วนหางของแถบพลังงาน ค่าดัชนีหักเห และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสง

#### 3.1 ระบบการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ [4, 12, 15-18, 22-28]

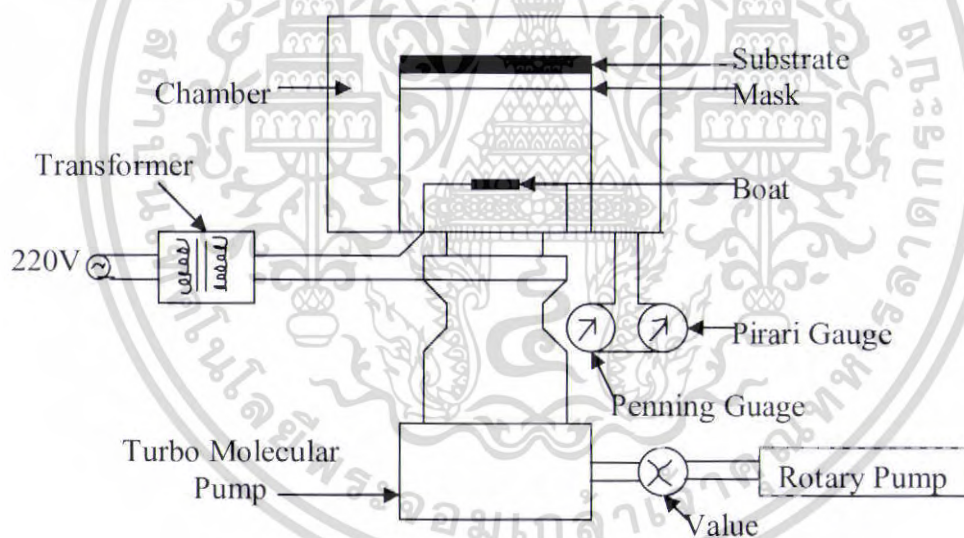
ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สิ่งจำเป็นที่สุดก็คือระบบการระเหยสารเคมีซึ่งเป็นสุญญากาศ โดยองค์ประกอบของระบบการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศประกอบด้วย

1. ภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบระเหยสารความร้อน
2. เบ้าหลอมสาร ทำหน้าที่รองรับและให้ความร้อนแก่สารเคมีที่ใช้ในการระเหย
3. แผ่นฐานรองรับมักเป็นกระจกสไลด์ทำหน้าที่รองรับไอของสารเคมีที่ระเหยขึ้นมาเกาะติดเป็นฟิล์มบาง
4. ชัตเตอร์ ทำหน้าที่เปิดกั้นไอระเหยของสาร
5. หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เบ้าหลอมสาร เพื่อใช้ในการระเหย ซึ่งเป็นแบบที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันต่ำ แต่จะให้กระแสสูง
6. แวริแอก ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง
7. เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันในสุญญากาศ
8. บีมกลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันในระบบขึ้นดัน สามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-3}$  มิลลิบาร์
9. บีมดิฟฟิวชัน ทำหน้าที่ลดความดันในภาชนะ โดยทำงานร่วมกับบีมกลโรตารี สามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ  $10^{-5}$  มิลลิบาร์
10. เครื่องทำความเย็น ทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่บีมดิฟฟิวชันเพื่อระบายความร้อนให้กับไอน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายแสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งต่างๆภายในระบบสุญญากาศ

### 3.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ [4, 12, 15-18, 22, 28]

ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้วมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไตรคลอโรเอททีลีน (TCE)
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรดกัดแก้วหรือกรดไฮโดรฟลูอออริกเจือจางความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้วก็จะได้แผ่นฐานรองรับที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้วเพื่อนำไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนต่อไป

### 3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

[4, 12, 15-18, 22, 28]

การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ( $Cd_xZn_{1-x}S$ ) ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% และผลึกผงซิงค์ซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% เตรียมได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

1. ทำการบดผลึกแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ให้ละเอียด นำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้
2. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่ชั่งแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำผงซิงค์ซัลไฟด์ไปชั่งตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้
4. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่อบไว้แล้ว มาบดผสมกับผงซิงค์ซัลไฟด์ที่ชั่งเตรียมไว้ให้เข้ากัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ผสมซิงค์ซัลไฟด์ที่อบแล้วนำไปอัดเป็นเม็ด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ด้วยความดันสูงประมาณ 3.8 เมกะปาสกาล
6. นำมาตัดให้ได้ขนาดพอดีกับภาชนะระเหยสาร แล้วนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำการระเหยสารต่อไป

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1 กรัม) กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

Composition Zn (x)	Starting Material Content (total 1 g)	
	CdS (g)	ZnS (g)
0	1	-
0.2	0.8557	0.1443
0.4	0.6898	0.3102
0.6	0.4971	0.5029
0.8	0.2704	0.7296
0.9	0.1414	0.8586
1.0	-	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามสัดส่วนค่า  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  และ  $1.0$  กับกรณีฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ [4, 12, 15-18, 22, 28]

ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.2 โดยมีขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบางดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆ และคราบไขมันด้วยอะซิโตนและเอทธานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำผลึกแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ใส่ลงในภาชนะระเหยสารซึ่งเป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางลงบนหน้ากากซึ่งทำมาจากแผ่นอลูมิเนียม เจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารว่าวาล์วผีเสื้อและวาล์วปล่อยอากาศเข้า ให้อยู่ตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. สับสวิทช์ไปที่ วาล์วหยาบ (roughing) และเปิดปั๊มกลโรตารี (ยี่ห้อ Edwards ชนิด Two stage รุ่น E2M8) รอจนความดันอยู่ในย่านมิลลิบาร์
7. สับสวิทช์กลับมาที่แบคกิ้ง (backing) และเปิดระบบน้ำวนให้ปั๊มคิฟิวชั่น
8. รอจนเข็มตีกลับมาที่เดิม แล้วเปิดปั๊มคิฟิวชั่น (ยี่ห้อ Edwards รุ่น 63-150M) รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ น้ำมันในปั๊มเดือด
9. สับสวิทช์กลับไปทวาล์วหยาบ ให้ความดันกกลับมาอยู่ในย่านมิลลิบาร์
10. สับสวิทช์กลับมาที่แบคและเปิดวาล์วผีเสื้อ รอจนกระทั่งความดันอยู่ที่  $5.5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์
11. เริ่มทำการระเหยสาร โดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเสียบปลั๊กแบริแอด แล้วเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 130 แอมแปร์ (อัตราการเคลือบอยู่ที่ประมาณ 88 นาโนเมตรต่อนาที)
12. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแบริแอดและถอดปลั๊กออก
13. ปิดวาล์วผีเสื้อ โดยสวิทช์ยังอยู่ที่ตำแหน่งแบค
14. ปิดปั๊มคิฟิวชั่น และรอจนปั๊มเย็น โดยใช้เวลาประมาณ 40-50 นาที
15. ปิดระบบน้ำวนและปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. เปิดวาล์วล้อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ (chamber)
17. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบออกมา
18. นำฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาความหนาด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก
19. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance รังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5418 อังสตรอม
20. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาลักษณะผิวหน้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 และ FESEM ยี่ห้อ HITACHI S - 370 scanning microscope
21. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ (UV/VISIBLE spectrometer JASCO7800) โดยใช้ช่วงความยาวคลื่น ในช่วง 300-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน

### 3.5 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัยการจำลองค่าตัวแปรทางแสง [4-6, 15-18]

#### 3.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบข้อมูลของฟิล์มบาง

- เครื่องคอมพิวเตอร์
- คู่มือการใช้งานโปรแกรม Puma
- คู่มือการใช้งานโปรแกรมบน Linux



รูปที่ 3.3 เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณจำลองค่า



รูปที่ 3.4 คู่มือเรียนรู้การใช้งานโปรแกรมบน Linux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ (UV/VISIBLE spectrometer JASCO7800) โดยใช้ช่วงความยาวคลื่น ในช่วง 300-800 นาโนเมตร



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่อง เครื่อง ยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ (UV/VISIBLE spectrometer JASCO7800)

3.6 ขั้นตอนการจำลองแบบข้อมูล simulate ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามสัดส่วนค่า  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  และ 1 กับกรณีฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที [4, 12, 15-18, 22, 28]

#### 3.6.1 วิธีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PUMA

1. เปิด Excel → ข้อมูล → นำเข้าข้อมูลจากภายนอก → นำเข้าข้อมูล → (เลือกไฟล์ที่จะ Sim)
2. เอาค่า %T ÷ 100
3. Copy ค่า  $\lambda$  กับ (%T ÷ 100) ไปวางใน Excel หน้าใหม่
4. Copy ข้อมูลจาก Excel ไปวางใน notepad
5. ลบข้อความออกให้เหลือเฉพาะค่าของ  $\lambda$  และ (%T ÷ 100)
6. นับจำนวนข้อมูลตั้งแต่ค่าเริ่มต้นจนถึงค่าสุดท้ายแล้วพิมพ์ไว้บนสุดของหน้ากระดาษ
7. คลิก แฟ้ม → Save as / Drives C / PUMA / บันทึกไฟล์ลงในโฟลเดอร์ที่มีโปรแกรม พูม่า บันทึกเป็นนามสกุล -Dat.txt เช่น sample-Dat.txt แล้วปิดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เปิด Command prompt หรือ terminal ในกรณีระบบปฏิบัติการ Linux
9. พิมพ์ Cd\

Cd puma

Puma ชื่อไฟล์ที่บันทึกไว้ 4 10 T 100 0540 1530 0010 0200 10 0540

1530 100 3000 1e+100 0 3 5 1 3 5 1 0.10 0.10 0.05

(พิมพ์ทั้งหมดเสร็จแล้วกด Enter)

NOTE :

4 : จำนวนชั้น (มี 4 ชั้น คือ อากาศชั้นแรก + ฟิล์ม + กระจกสไลด์ + อากาศชั้นสุดท้าย)

10 : ฐานรอง (กระจกเบอร์ 7059)

T : ชนิดของข้อมูล (เป็นการส่งผ่าน)

100 : NOBS (เป็นค่าที่ยอมรับ)

0540 : ความยาวคลื่นของจุดเริ่มต้น

1530 : ความยาวคลื่นของจุดสุดท้าย (Note : ความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดคือ 1 และความยาวคลื่นที่มากที่สุดคือ 5000)

0010 : ความหนาต่ำสุด

0200 : ความหนาสูงสุด

10 : วัดความหนาไปครั้งละ 10

0540 : INFLE ต่ำสุด

1530 : INFLE สูงสุด

100 : วัด INFLE ไปครั้งละ 100

3000 : MAXIT

1e+100 : QUAD

0 : INIT หมายถึงค่าตอนแรกที่คาดคะเนไว้

3 : NOini , 5 : NOfin , 1 : NOstep , 3 : NFin , 5 : NFfin , 1 : NFstep

10. จะได้ Output ที่แสดงอยู่ในไฟล์ (ชื่อที่เราบันทึกครั้งแรก)-inf.txt → เปิดไฟล์นี้ขึ้นมา

11. เปิด Command prompt หรือ terminal ในกรณีระบบปฏิบัติการ Linux

12. พิมพ์ puma ชื่อไฟล์ที่บันทึกไว้ 4 10 T 100 0540 1530 0050 0150 01 0540

0540 100 5000 6.429645e-03 9

NOTE :

- จากไฟล์จะได้ความหนาครั้งใหม่เป็น 100 แล้วนำมา +/- 50 จะได้ตั้งข้อมูลข้างต้น
  - ลด step การวัดความหนาสูงให้เหลือครั้งละ 1
  - ค่า INFLE ต่ำสุด = INFLE สูงสุด = 540 (ดูได้จาก  $\lambda$  ของไฟล์ (?) -inf.txt)
  - เพิ่มจำนวนการทำซ้ำจาก 3000 เป็น 5000
  - ค่า QUAD จาก “ previous quadratic error ” = 6.429645e-03 (อยู่ล่างสุดของไฟล์)
  - กำหนดค่า INIT = ?
13. เมื่อโปรแกรมรันเสร็จข้อมูลทั้งหมดก็จะไปแทนที่ในไฟล์เดิม (เมื่อจะเริ่มรัน โปรแกรมต้องเปิดไฟล์ (?) -inf.txt ก่อน)
14. เปิดไฟล์ (?) -inf.txt และเปิด Command prompt หรือ terminal ในกรณีระบบปฏิบัติการ Linux
15. พิมพ์ puma ชื่อไฟล์ที่บันทึก 4 10 T 100 0540 1530 0097 0097 01 0540  
0540 100 50000 2.656153e-04 9

NOTE :

- จากไฟล์ได้ความหนาครั้งใหม่เป็น 97 nm เราจะกำหนด ความหนาต่ำสุด = ความหนาสูงสุด = 97
  - ค่า INFLE ต่ำสุด = INFLE สูงสุด = 540
  - เพิ่มจำนวนการทำซ้ำจาก 5000 เป็น 50000
  - ค่า QUAD จาก “ previous quadratic error ” = 2.656153e-04 (อยู่ล่างสุดของไฟล์)
16. รัน โปรแกรมตามปกติ เมื่อ โปรแกรมรันเสร็จสิ้นก็จะไปแทนที่ไฟล์เดิม

### 3.7 วิธีการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางจากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

[4-6, 15-18]

#### 3.7.1 วิธีการหาค่าดัชนีหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสง

จาก

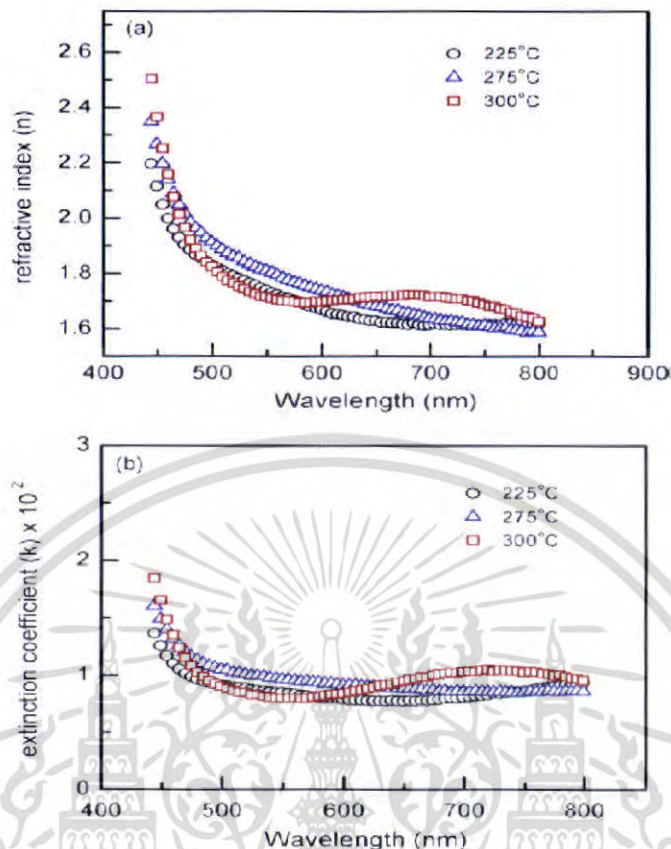
$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}}$$

ที่ T คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง,  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง, ค่า d คือ ความหนาของฟิล์มบาง

และ

$$R = (n-1)^2 + k^2 / (n+1)^2 + k^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ก. กราฟของค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสง

ข. กราฟของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียกับความยาวคลื่นแสง

เมื่อได้ค่าดัชนีหักเห (n) มาแล้ว สามารถที่จะหาค่า  $E_0 E_d$  และ  $M_1 M_3$  โดยการเขียนกราฟระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  และจะได้ค่า  $E_0 E_d$  จากสมการ

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d}$$

และ

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d}$$

และจะได้ค่า  $M_1 M_3$  จากสมการ

$$E_0^2 = \frac{M_1}{M_3}$$

$$E_d^2 = \frac{M_1^2}{M_3}$$

เมื่อได้ค่าดัชนีหักเห (n) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (k) มาแล้วเราสามารถที่จะหาค่าของ  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  โดยหามาจากการคำนวณจากสมการ

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2$$

และ

$$\epsilon_2 = 2nk$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้ออกมาจะสามารถเขียนกราฟระหว่าง  $\varepsilon_2$  กับ ความยาวคลื่นแสง (nm) ได้

เมื่อได้ค่า  $\varepsilon_1$  และ  $\varepsilon_2$  มาแล้วเราสามารถที่จะหาค่าของ  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  โดยหาจากการคำนวณจากสมการ

$$\sigma_1 = \omega \varepsilon_2 \varepsilon_0$$

ซึ่งผลที่ได้จะสามารถเขียนกราฟ ระหว่าง  $\sigma_1$  กับ ความยาวคลื่นแสง (nm) และ

$$\sigma_2 = \omega \varepsilon_1 \varepsilon_0$$

ผลที่ได้ออกมาจะสามารถเขียนกราฟระหว่าง  $\sigma_2$  กับ ความยาวคลื่นแสง (nm)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง CdS และ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  โดยการคำนวณจากสมการ

$$h\nu = \frac{1240}{\lambda}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{100}{T}\right)$$

และ

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

เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะแสดงถึงคุณสมบัติพื้นฐานและตัวแปรทางแสงของฟิล์มบางที่ได้ทำการศึกษา โดยแบ่งฟิล์มบางเป็น 3 ประเภทคือ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีการเพิ่มปริมาณของค่าองค์ประกอบ  $x$  ต่างๆ ที่  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0 และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  กับ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเตรียมขึ้นโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแล้วจึงนำไปทำการศึกษาถึงคุณลักษณะ โครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ในช่วงความยาวคลื่น 300 - 800 นาโนเมตร แล้วนำข้อมูลจากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงมาวิเคราะห์ผลช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของปรากฏการณ์ส่งผ่านแสงของฟิล์มที่เกิดวัดได้มาคำนวณถึงส่วนหางของแถบช่องว่างพลังงานที่เกิดขึ้นของตัวฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการศึกษา สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์และอธิบายถึงค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสง ส่วนข้อมูลค่าดัชนีหักเหที่มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นได้จากการจำลองด้วยข้อมูลการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซึ่งอาศัยการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PUMA และกล่าวถึงค่าตัวแปรทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้ศึกษา โดยการสังเคราะห์แบบคอปซีและแวมเพิล-โคโดเมนนิโค

#### 4.1 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้

4.1.1 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส

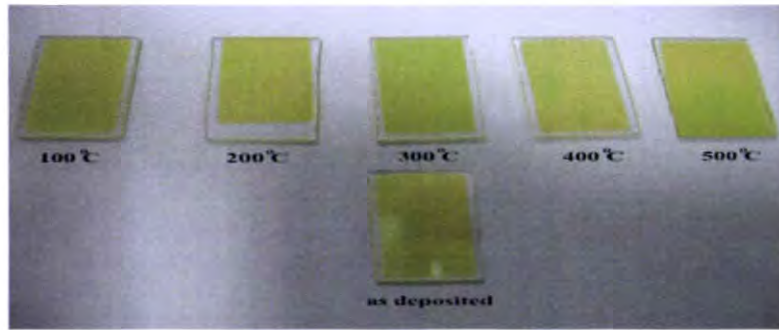
พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดีและยึดติดดีกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ สีของพิล์มบางที่ได้จะมีสีเหลือง โดยพบว่าพิล์มบางที่ได้เตรียมขึ้นมาแต่ละเงื่อนไขในของการเพิ่มปริมาณของอะตอมธาตุสังกะสีสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มของสีเหลืองจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะตอมของธาตุสังกะสีเพิ่มขึ้น (ZnS บริสุทธิ์จะใสไม่มีสี) จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณของอะตอมธาตุสังกะสีนั้นจะทำให้พิล์มบางมีความใสมากยิ่งขึ้นส่งผลให้แสงส่งผ่านพิล์มบางได้ดี ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของท่านอื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [1, 4, 15]



รูปที่ 4.1 แสดงพิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.1.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ลักษณะของเนื้อพิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ยังยึดติดอยู่กับแผ่นฐานรองรับเป็นอย่างดีแม้จะผ่านการแอนนีสไปแล้วก็ตามแต่รูปลักษณะภายนอกนั้นยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักและยังคงความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของพิล์มบางที่ทำจากสารแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งมีลักษณะเป็นสีเหลือง แต่เนื่องจากการเติมธาตุอะตอมของสังกะสีเข้าไปจึงสาเหตุให้พิล์มบางนั้นมีสีเหลืองซีดจางดังรูปที่ 4.2



**รูปที่ 4.2** แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

#### 4.1.3 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS$ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นจะมีสีเหลืองเข้มมากและยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี จากการที่ฟิล์มบางมีสีเหลืองเข้มมากจึงส่งผลให้มีการส่งผ่านแสงได้น้อยที่สุดในบรรดาฟิล์มบางที่ได้เตรียมขึ้น ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่มีสีของเนื้อฟิล์มที่ซีดจางกว่า จากข้อมูลที่ได้แสดงไว้ในก่อนหน้าจึงสรุปได้ว่าระดับความเข้มสีของฟิล์มบางสามารถจำแนกได้ว่าฟิล์มบางตัวใดมีปริมาณอะตอมของธาตุสังกะสีมากหรือน้อยกว่า ในภาพที่ 4.3 แสดงถึงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  ที่ใช้ในการศึกษา



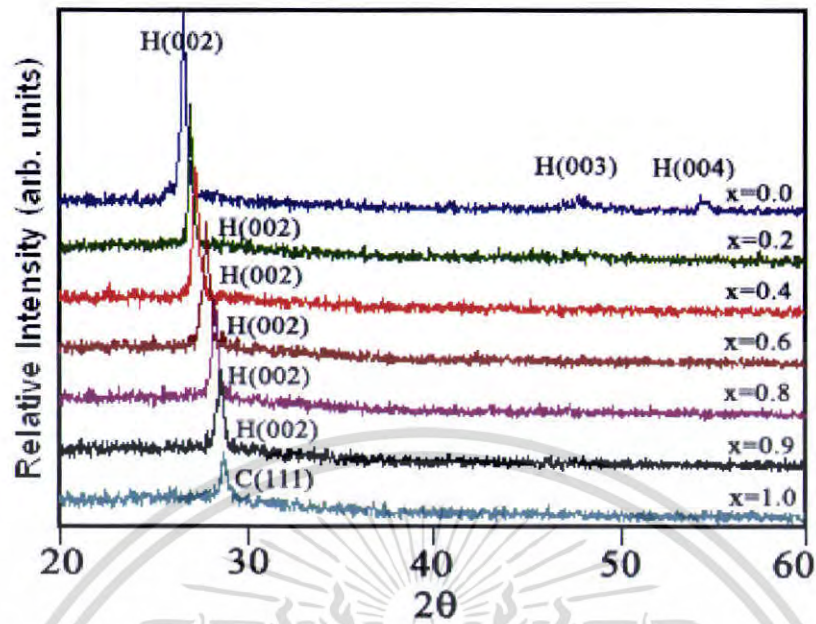
**รูปที่ 4.3** แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เนื่องจากต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่ค่า  $x$  ต่างๆ และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ,  $CdS$  ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ สำหรับเหตุผลที่ต้องรู้ถึงรูปแบบลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง เพราะในกรณีที่มีการเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงธาตุอย่างอื่นเข้าไปอาจเป็นสิ่งที่ทำให้ตัวฟิล์มบางที่มีปริมาณอะตอมของธาตุที่แตกต่างกันนั้นเมื่อได้นำไปประยุกต์ใช้งานอาจมีพฤติกรรมหรือการตอบสนองสิ่งเร้าที่ไม่เหมือน ทั้งนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหรือรูปแบบผลึกเนื้อสารซึ่งอย่างน้อยแค่ในส่วนนี้ก็สามารถเป็นสาเหตุที่ทำให้พฤติกรรมการนำไฟฟ้าหรือความสามารถในการส่งผ่านแสงมีการเปลี่ยนแปลงไป จึงจำเป็นต้องทราบให้แน่ชัดว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ได้เตรียมขึ้นมาเพื่อใช้ศึกษานั้นมีรูปแบบโครงสร้างผลึกเป็นรูปแบบใด ดังนั้นจึงได้นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลึ้วเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามผลรวมระหว่างมุมตกกระทบและมุมเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) ดังรูปที่ 4.4, 4.6 และ 4.9 แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับพิกมาตราฐาน

จากรูปที่ 4.4 ที่แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  จะเห็นว่าความเข้มของฟิสิกจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสม  $x$  เพิ่มขึ้นและฟิสิกจะเลื่อนไปทางขวามือ (มุม  $2\theta$  ที่เพิ่มขึ้น) ที่อัตราส่วนผสม  $x$  เพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ( $x < 0.9$ ) จะมีโครงสร้างแบบเวอริทไซท์ โดยระนาบที่โดดเด่นคือ (002) ส่วน  $ZnS$  จะมีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์และระนาบที่โดดเด่นคือ (111)



รูปที่ 4.4 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ของ  $ZnS$  อยู่ระหว่าง 0-0.9 จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล (เวิร์ตไซต์) แต่ที่อัตราส่วนผสม  $x = 1.0$  จะมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (ซิงค์เบลนด์) นอกจากนี้ยังพบว่าพีคของการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (002) จะเลื่อนเป็นมุม  $2\theta$  ที่เพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ  $ZnS$  ที่สูงขึ้น แสดงว่าระยะห่างของระนาบ (002) ลดลงนั่นเองส่งผลให้ค่าคงที่ผลึกของโครงสร้างเฮกซะโกนัลมีค่าลดลง ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ( $a_0, c_0$ ) สามารถเขียนได้ในรูปของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ( $a$ ) แทนได้ โดยมีวิธีการคำนวณ  $a_0$  กับ  $c_0$  สำหรับทุกองค์ประกอบของแผ่นฟิล์ม ดังนี้ [1]

$$d_{002} = d_{111} \quad (4.1)$$

$$c_0 = 2a/(3)^{1/2} \quad (4.2)$$

ในทำนองเดียวกัน  $d_{110} = d_{220} \quad (4.3)$

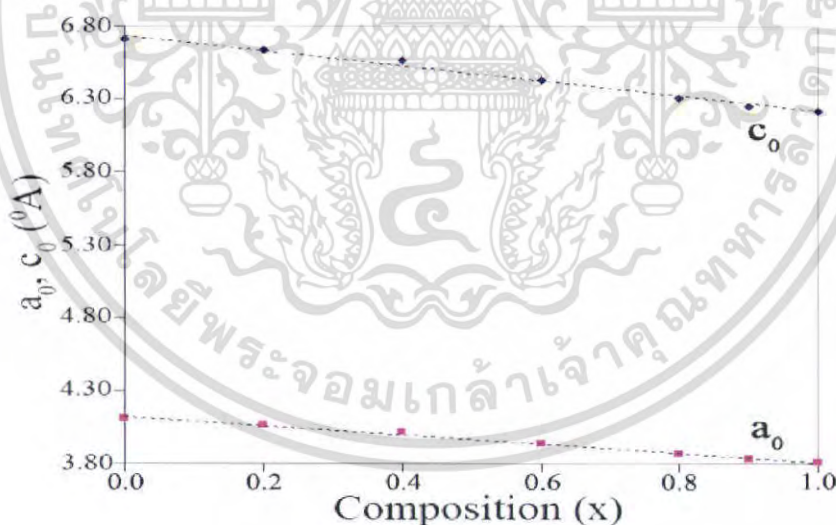
$$a_0 = a/(2)^{1/2} \quad (4.4)$$

การผันแปรของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกเมื่อเทียบกับค่า  $x$  แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 และเมื่อคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนของค่า  $x$  ต่างๆ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีสแสดงดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM, ขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

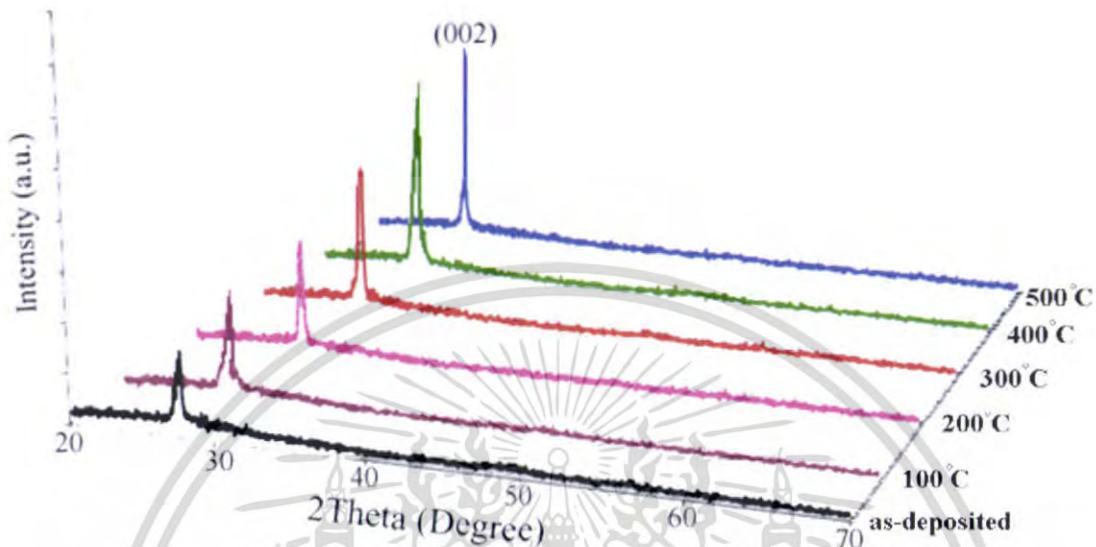
Composition (x)	FWHM	$a_0$ (Å)	$c_0$ (Å)	Grain size (nm)
0.0	0.212	4.11	6.71	42
0.2	0.240	4.06	6.64	34
0.4	0.246	4.02	6.56	31
0.6	0.298	3.94	6.43	28
0.8	0.336	3.86	6.31	25
0.9	0.354	3.83	6.25	23
1.0	0.371	3.81	6.22	22



**รูปที่ 4.5** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ กับ  $a_0$ ,  $c_0$  อังสตรอม ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเส้นประจะเชื่อมค่าคงที่ของโครงสร้างของแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS กับ ZnS เข้าด้วยกัน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงสร้างลดลงแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

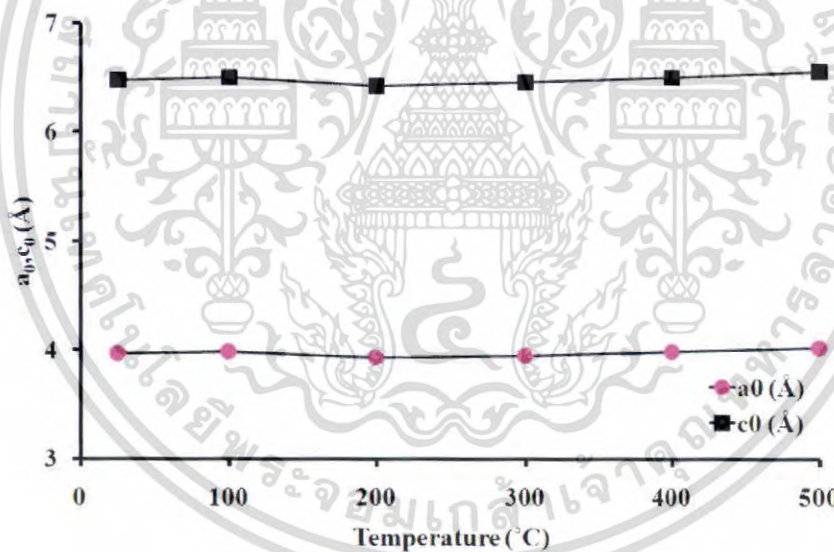
รูปที่ 4.6 แสดงถึงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400, และ 500 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีพีคเดียวที่มุม  $2\theta=26.54$  องศา ซึ่งจากไฟล์ JCPDS ระบุว่า เป็นพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002) ของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล ความเข้มของพีคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนีสที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิแอนนีสส่งผลให้อะตอมในโครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบางเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแอนนีสที่ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และเมื่อไม่มีการแอนนีส แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และส่วนคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้าง ขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่ได้ผ่านการแอนนีสอุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อไม่มีการแอนนีส ปรากฏอยู่ในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

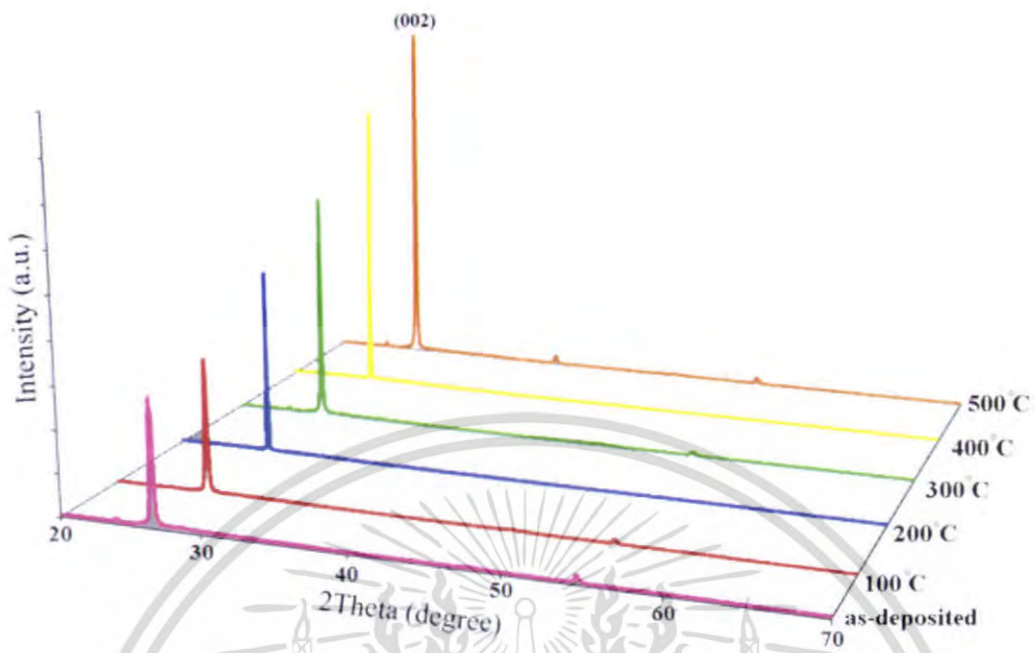
**ตารางที่ 4.2** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Temperature (°C)	FWHM	$a_0$ (Å)	$c_0$ (Å)	Grain size (nm)
as-deposited	3.238	3.968	6.480	2.80
100	3.251	3.984	6.507	2.79
200	3.209	3.933	6.423	2.84
300	3.226	3.954	6.457	2.82
400	3.249	3.982	6.503	2.80
500	3.279	4.019	6.563	2.77



**รูปที่ 4.7** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึกที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับอุณหภูมิแอนนิลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.8** แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นจันรอนรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

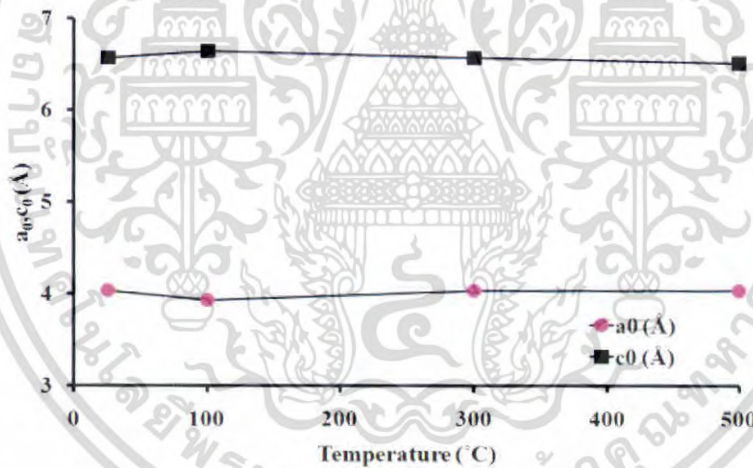
จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงผลของการจัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีส ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนที่โดดเด่นอยู่ที่ (002) ที่มุม  $2\theta$  ประมาณ 26.34 องศา ซึ่งสอดคล้องกับ โครงผลึกแบบเฮกซะ โกนัล จากรูปสังเกตได้ถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มสูงสุดรังสีเอกซ์ที่มุม  $2\theta$  ต่างๆ ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ความเข้มของพีคของระนาบการเลี้ยวเบน (002) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนีสที่เพิ่มขึ้น

ค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีสที่ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ และเมื่อไม่มีการแอนนีส แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และส่วนคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้าง ขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ได้ผ่านการแอนนีสอุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีและเมื่อไม่มีการแอนนีส แสดงดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

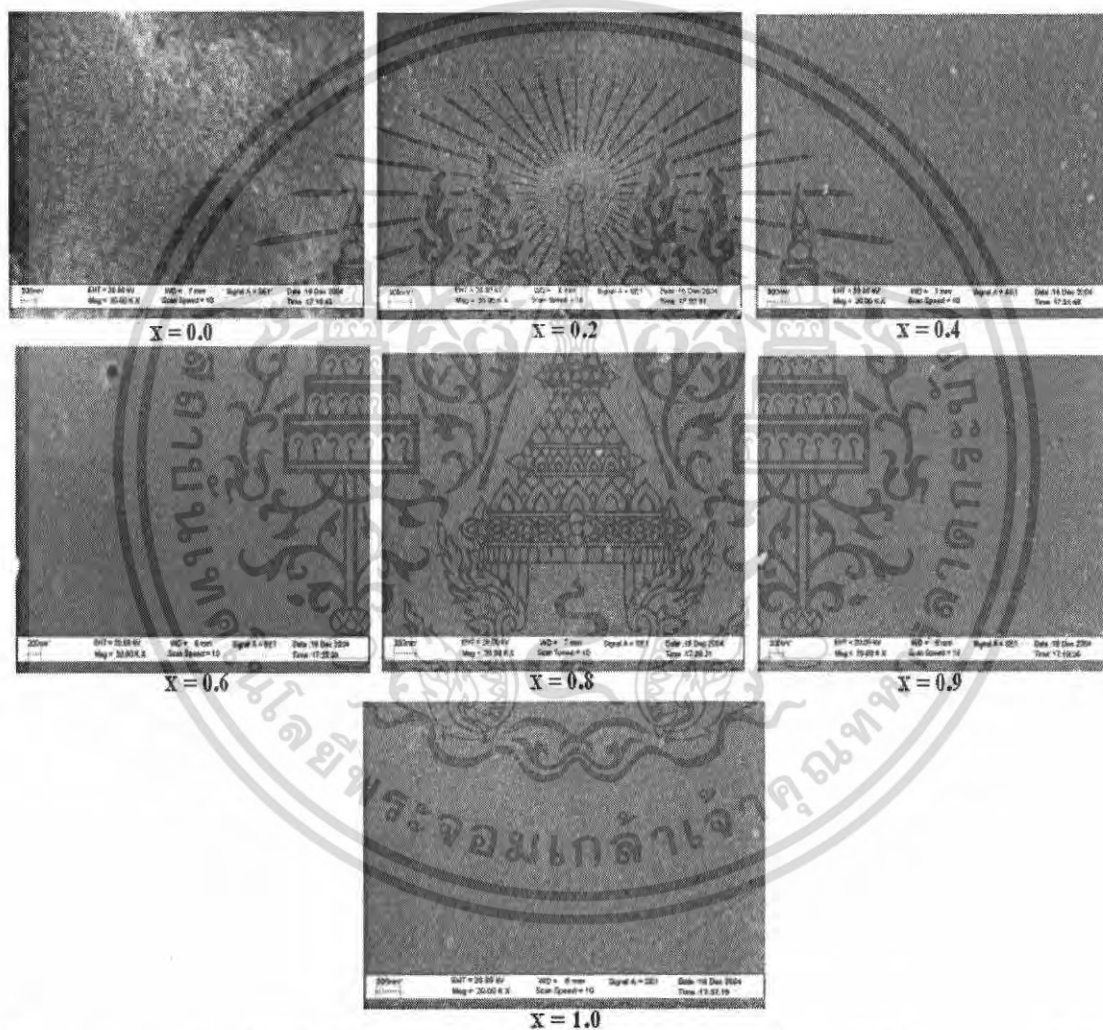
Temperature (°C)	FWHM	$a_0$ (Å)	$c_0$ (Å)	Grain size (nm)
as-deposited	-	4.032	6.872	260
100	-	3.929	6.642	300
200	-	-	-	200
300	-	4.038	6.571	400
400	-	-	-	260
500	-	4.037	6.515	200



**รูปที่ 4.9** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึกที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์กับอุณหภูมิแอนนิลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

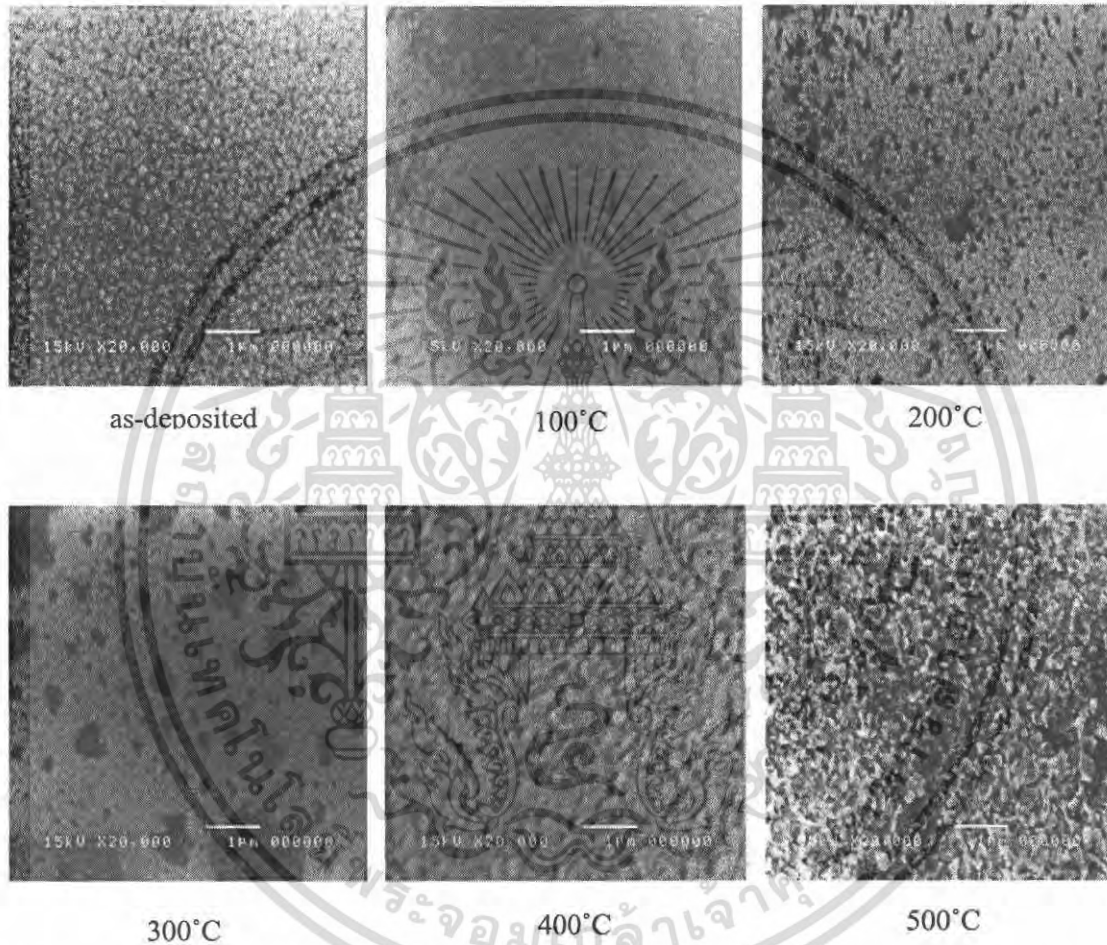
4.3 ผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.10 ลักษณะผิวหน้าที่ถ่ายด้วย SEM โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

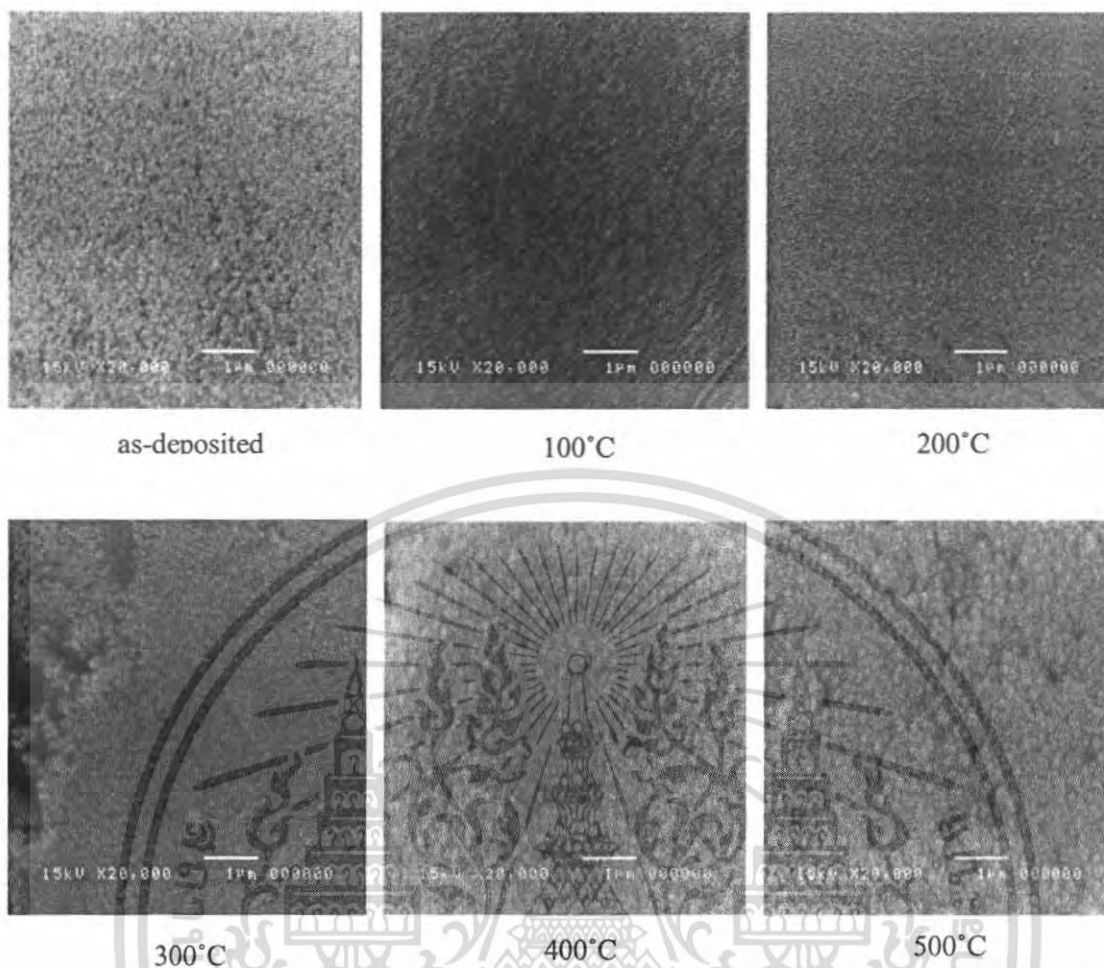
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ไปถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า นั้น ภาพที่ได้จะคงยังไม่เห็นเกรนของฟิล์มบางเนื่องจากฟิล์มบางมีความต้านทานสูงมาก จึงนำฟิล์มบางทั้งหมดไปเคลือบด้วยทอง จากนั้นนำฟิล์มที่ได้กลับมาถ่าย SEM อีกครั้งที่กำลังขยายเดิม ก็ทำให้สามารถเห็นขนาดเกรนของฟิล์มบางได้ เมื่อนำภาพที่ได้ในค่า  $x$  ต่างๆ มาวิเคราะห์ ที่  $x = 0$  ลักษณะของเกรนจะมีขนาดที่ใหญ่ที่สุด แต่เมื่ออัตราส่วนผสม  $x$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ลักษณะของเกรนก็ค่อยๆ มีขนาดลดลง จนที่  $x=1.0$  ขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กที่สุดดังรูปที่ 4.10



**รูปที่ 4.11** แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัลและการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.12** แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาทีแสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 มีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น

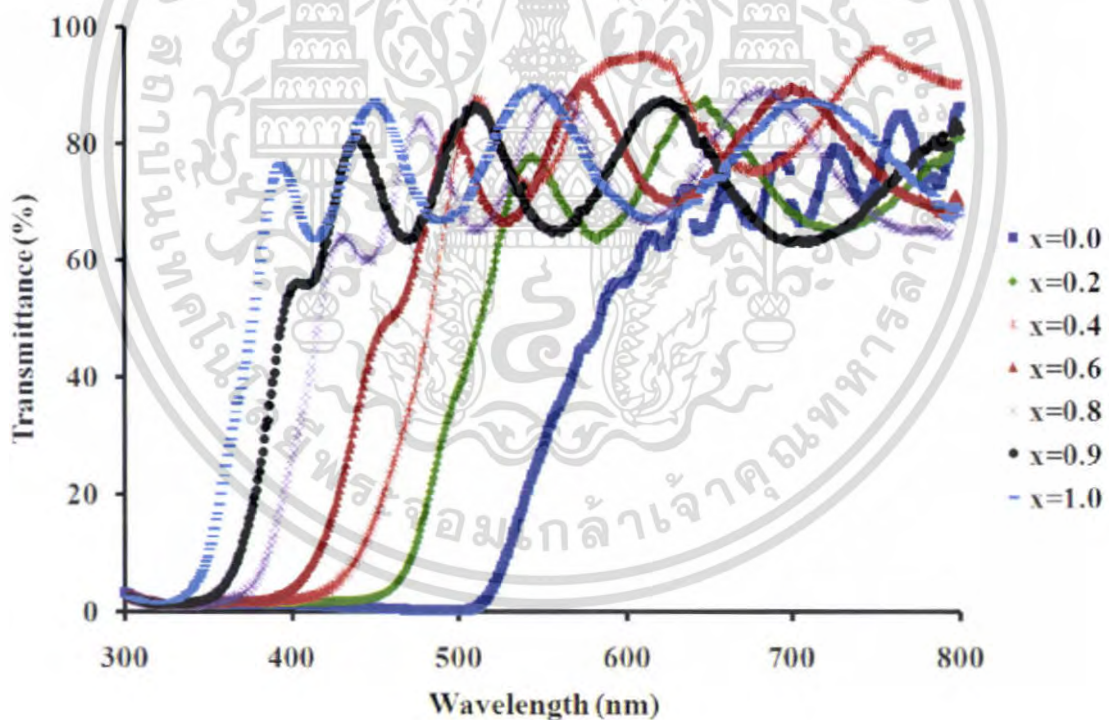
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่งผ่านแสงในตัวกลางและความยาวของคลื่นแสงในช่วงต่างๆ ข้อมูลค่าสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเป็นค่าที่บ่งบอกในเชิงคุณภาพจึงไม่สามารถระบุหน่วยได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะปรากฏข้อมูลในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาข้างต้นนั้นอาจเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงความโปร่งแสงของตัวกลางได้อีกเช่นกัน

##### 4.4.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$

ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

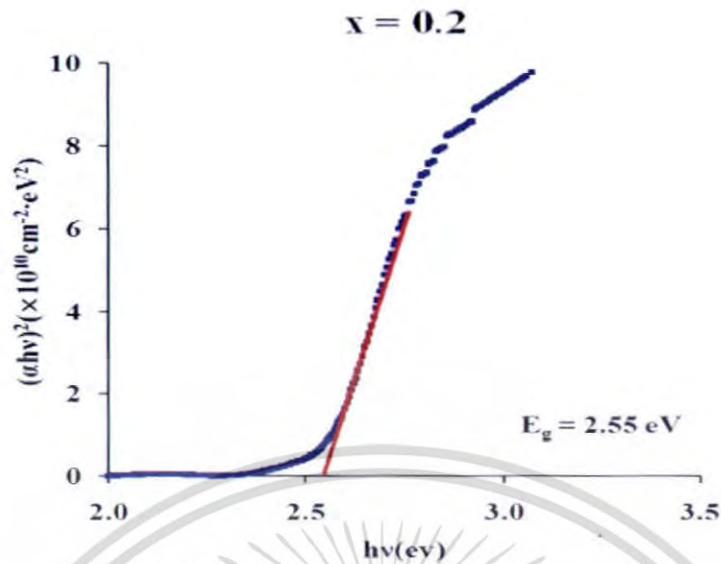
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ JASCO 7800 ที่ช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร พบว่าขอบของการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นกว่า เมื่อสัดส่วนการเจืออะตอมของธาตุ  $Zn$  เพิ่มมากขึ้น หมายความว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อเจืออะตอมของธาตุ  $Zn$  เพิ่มมากขึ้น เขียนกราฟระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหาค่า  $E_g$  ดังรูปที่ 4.14-4.20 ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ เมื่ออัตราส่วนผสมของ  $x$  มากขึ้นทำให้ ค่า  $E_g$  มากขึ้น

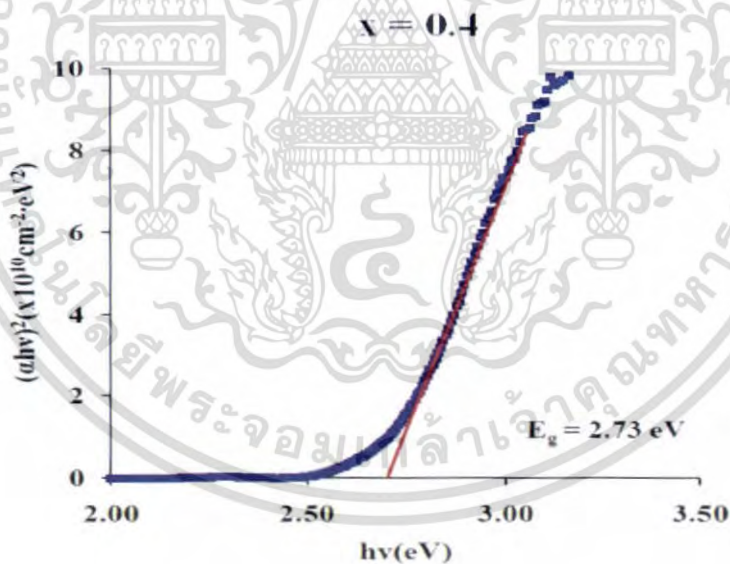


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل เพื่อหาค่า  $E_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

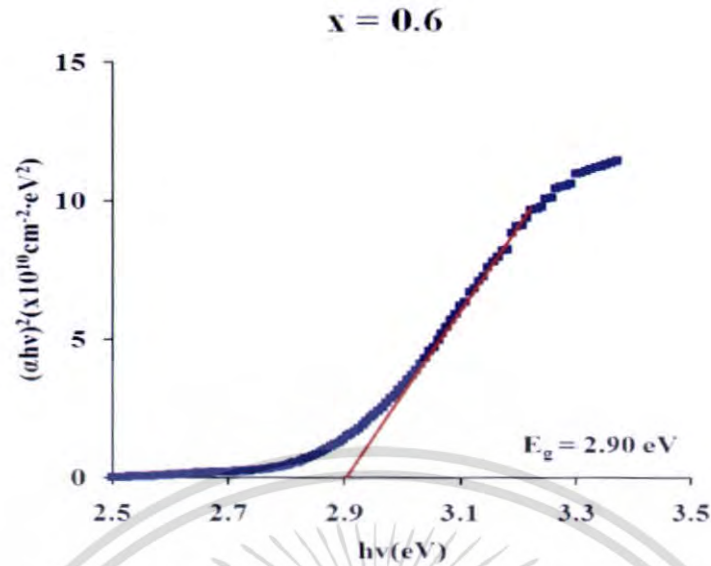


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0.2$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก เพื่อหาค่า  $E_g$

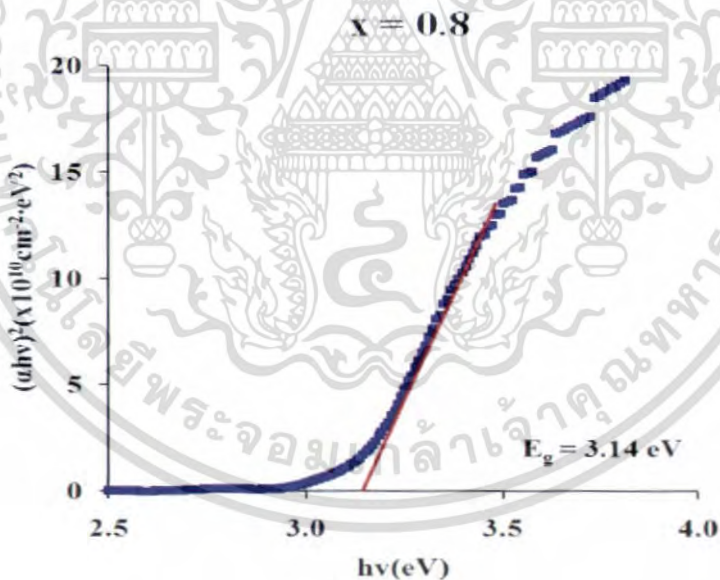


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0.4$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก เพื่อหาค่า  $E_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

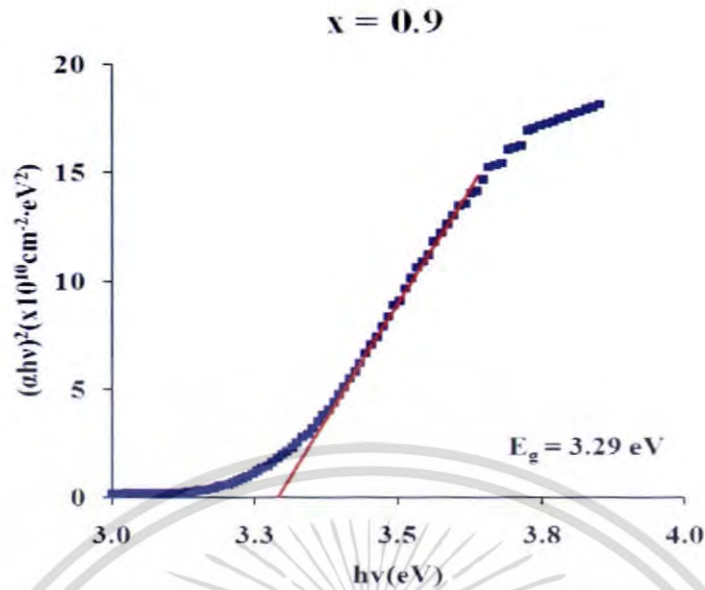


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0.6$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل เพื่อหาค่า  $E_g$

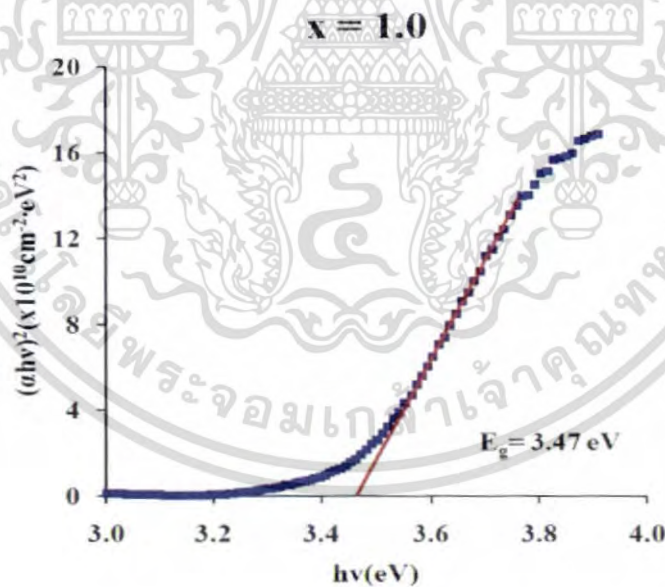


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0.8$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล เพื่อหาค่า  $E_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.19** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0.9$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CdS}$  และ  $\text{ZnS}$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل เพื่อหาค่า  $E_g$



**รูปที่ 4.20** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 1.0$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CdS}$  และ  $\text{ZnS}$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล เพื่อหาค่า  $E_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

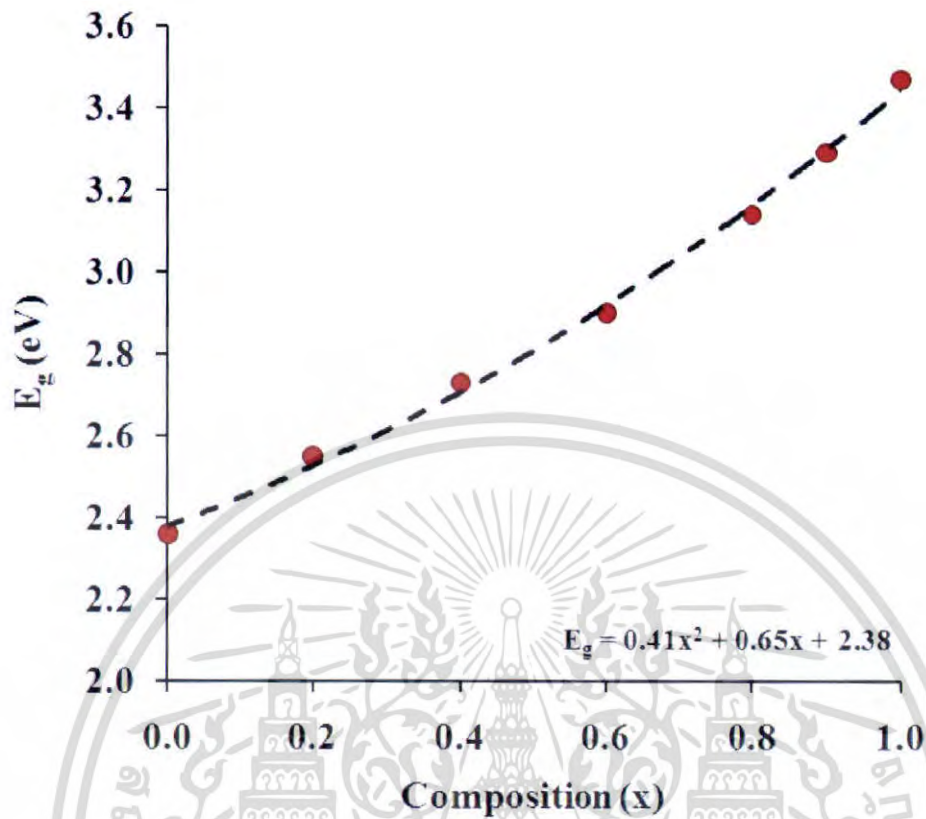
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ ในที่กรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل

Mole Fraction (x)	Energy Gap ( $E_g$ ) (eV)
0	2.36
0.2	2.55
0.4	2.73
0.6	2.90
0.8	3.14
0.9	3.29
1.0	3.47

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของ  $x$  ที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจาก 2.31 ถึง 3.47 อิเล็กตรอน โวลต์เมื่อ  $x$  เพิ่มจาก 0 ถึง 1.0 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (4.5)

$$E_g(x) = E_g(\text{CdS}) + (E_g(\text{ZnS}) - E_g(\text{CdS}) - b)x + bx^2 \quad (4.5)$$

เมื่อ  $E_g(\text{CdS})$  และ  $E_g(\text{ZnS})$  เป็นช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ ZnS ตามลำดับ ส่วน  $b$  คือโบว์ริงพารามิเตอร์ (bowing parameter) เส้นทึบของรูปที่ 4.21 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น โดยที่  $E_g(\text{CdS}) = 2.36$  อิเล็กตรอน โวลต์,  $E_g(\text{ZnS}) = 3.47$  อิเล็กตรอน โวลต์ และ  $b = 0.41$  อิเล็กตรอน โวลต์ซึ่งสอดคล้องดีกับผู้ที่มีการรายงานผลไว้ [1, 2]



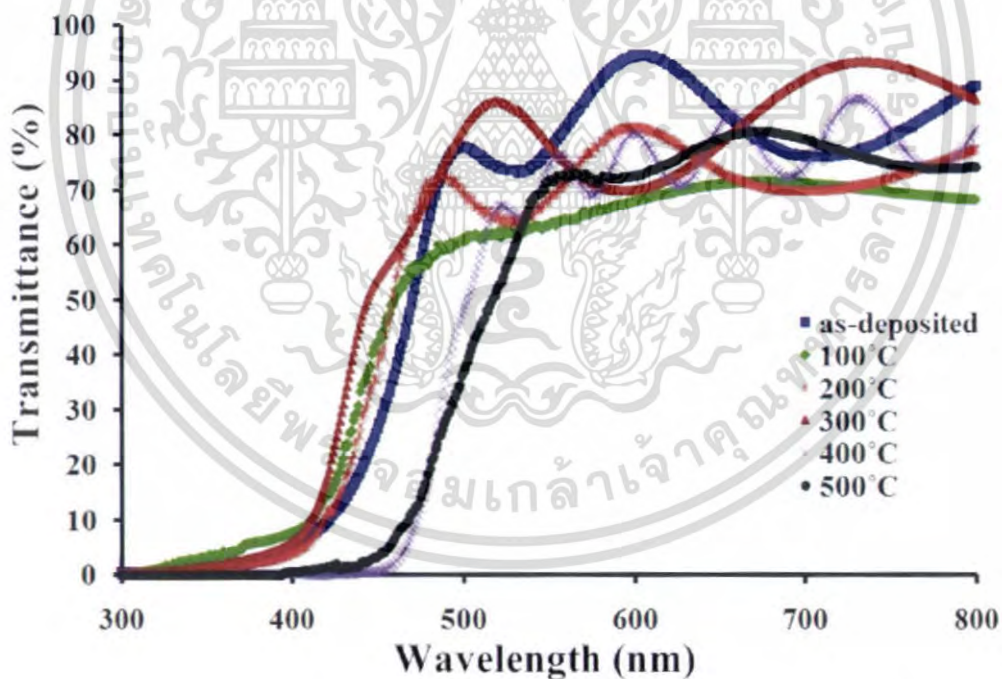
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_g$  กับอัตราส่วนผสมของ  $x$  ค่าต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xZn_{1-x}S$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$

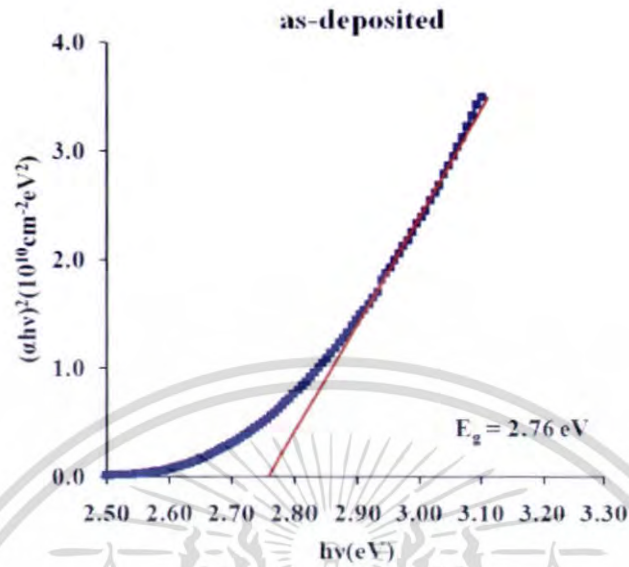
ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ผลปรากฏว่ามีการส่งผ่านแสงประมาณ 60 – 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ พลังงานโฟตอนแล้วลากส่วนต่อของเส้นตรงให้ตัดกับแกนพลังงานของโฟตอน โดยที่จุดตัดของแกนอนคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงในรูปที่ 4.23-4.28

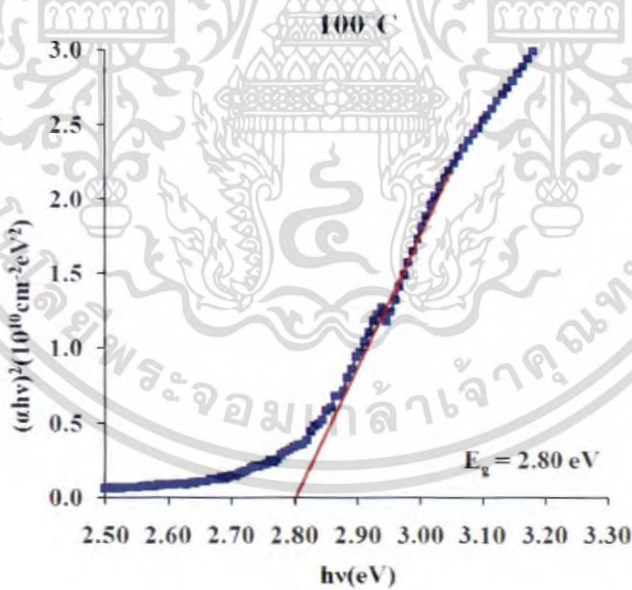


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

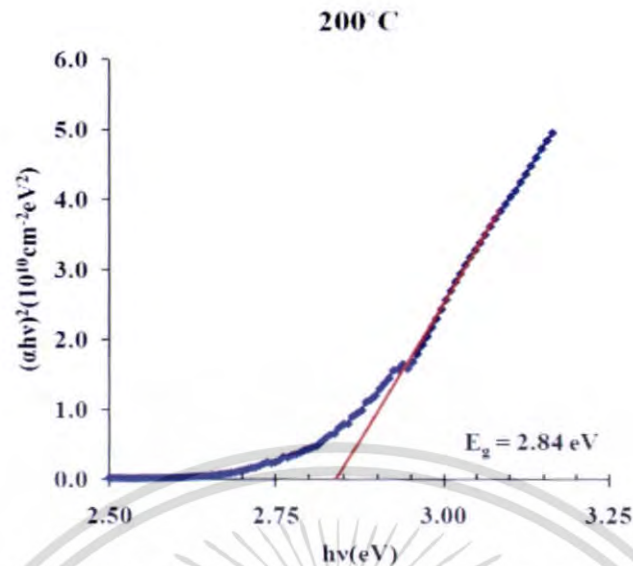


**รูปที่ 4.23** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล

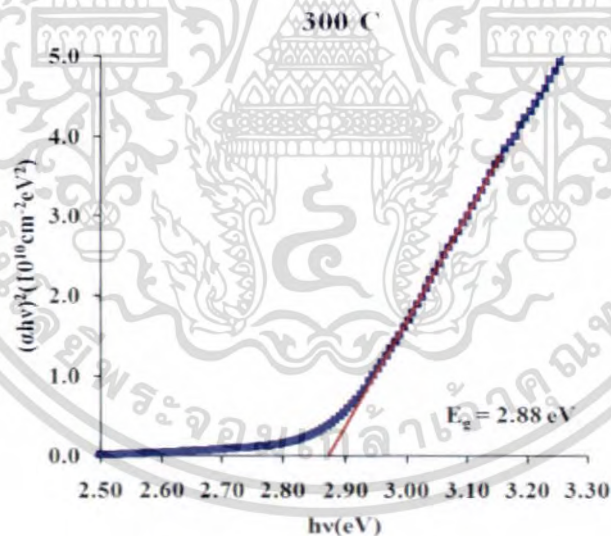


**รูปที่ 4.24** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

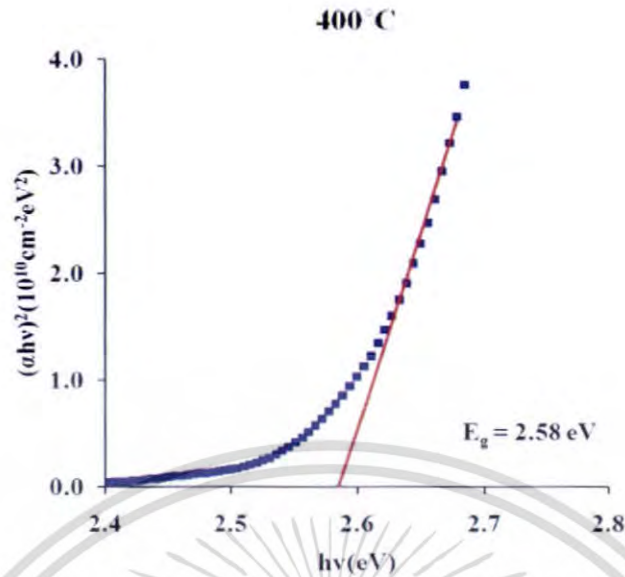


**รูปที่ 4.25** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

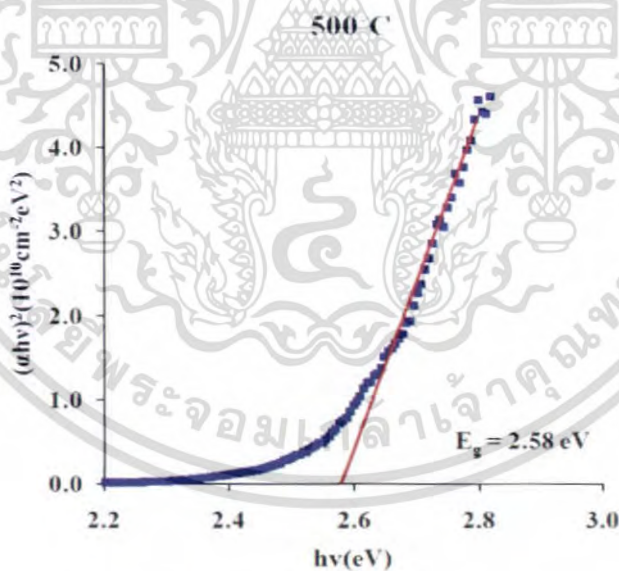


**รูปที่ 4.26** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



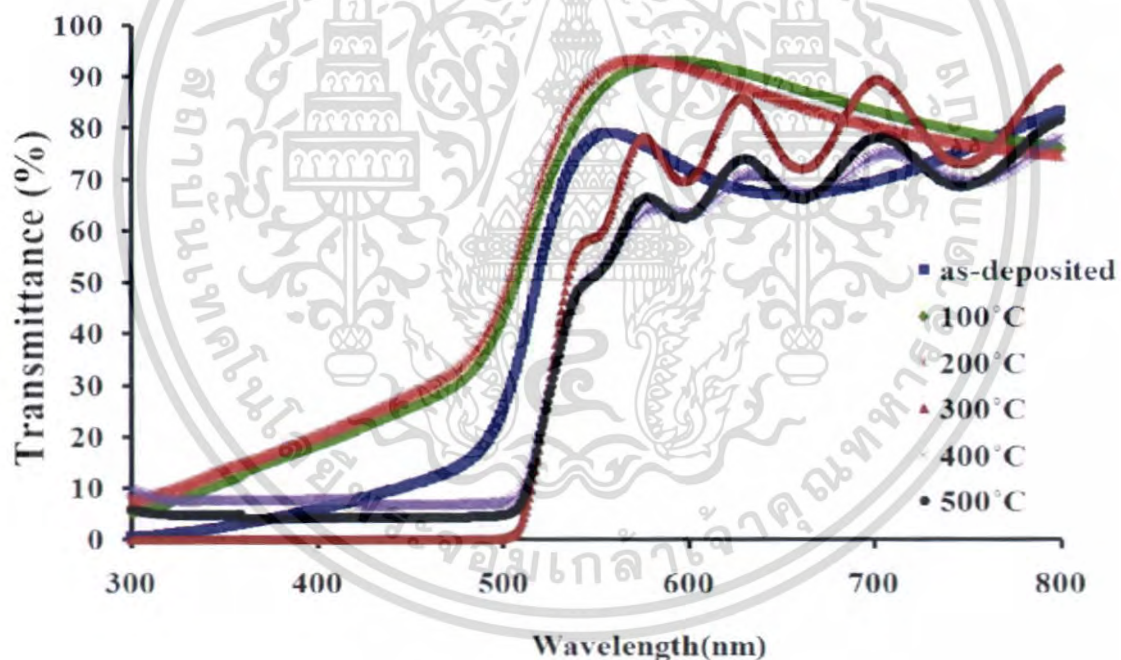
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 ผลการศึกษาและวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

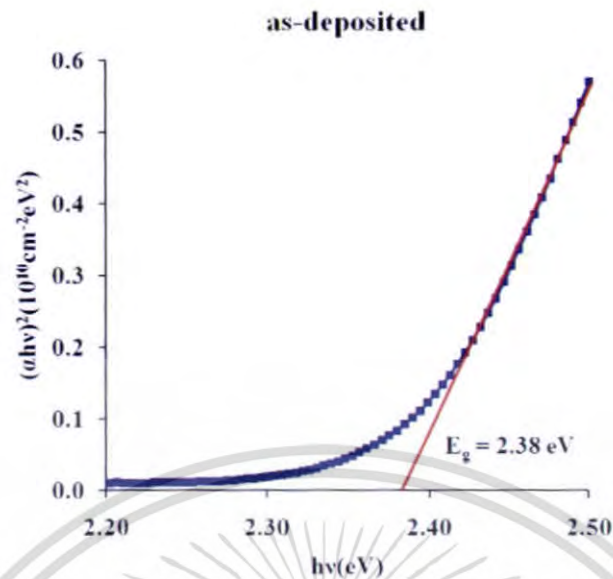
ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ผลปรากฏว่ามีการส่งผ่านแสงประมาณ 60 – 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ พลังงานโฟตอนแล้วค่าส่วนต่อของเส้นตรงให้ตัดกับแกนพลังงานของโฟตอนโดยที่จุดตัดแกนนอนคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงในรูปที่ 4.30-4.35

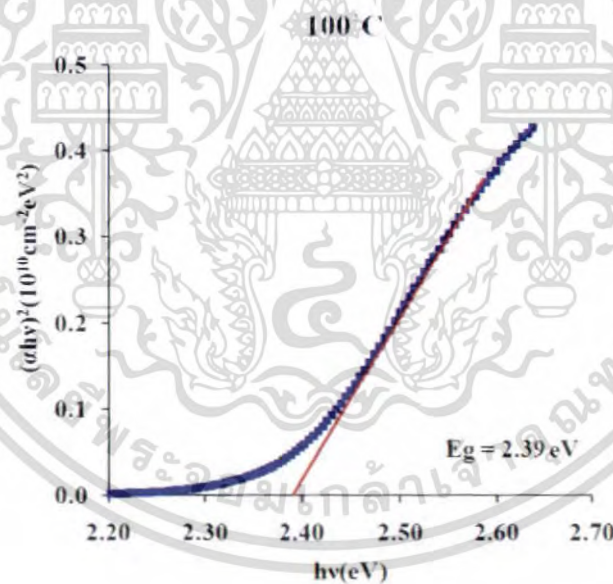


รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

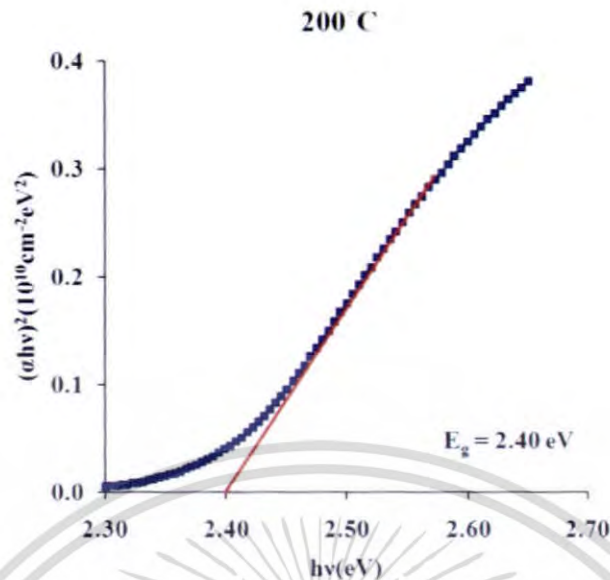


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล

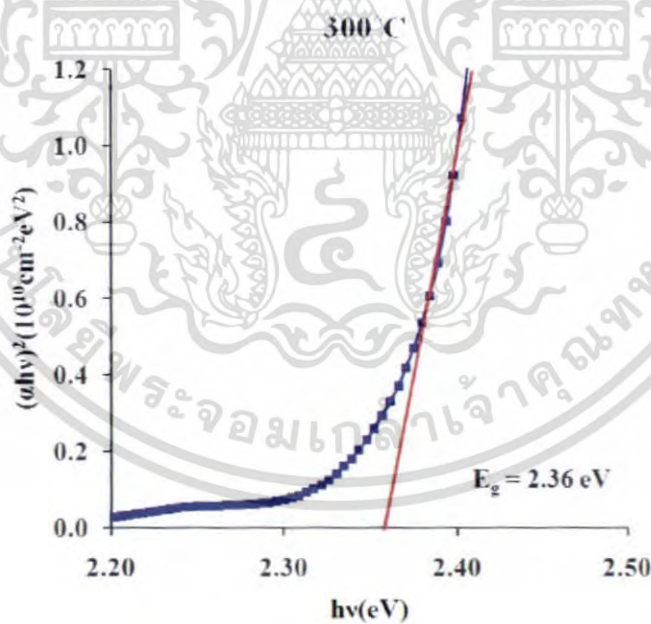


รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

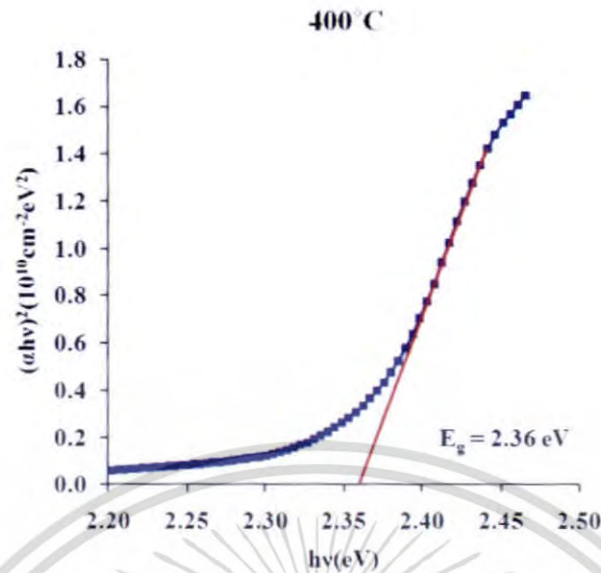


รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

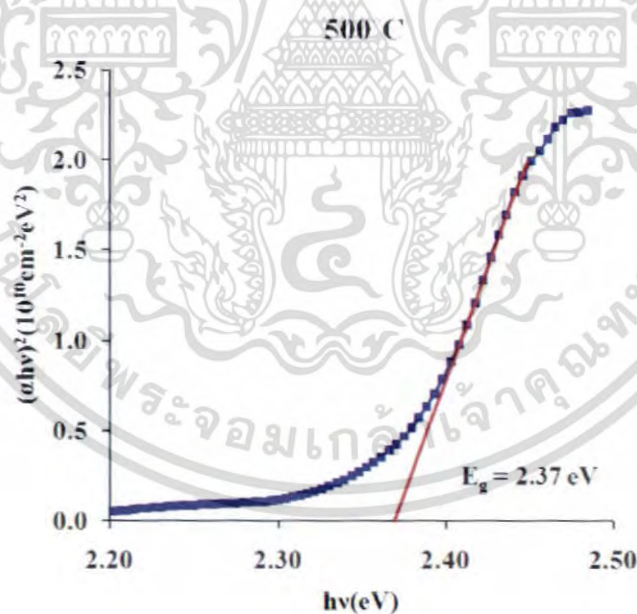


รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



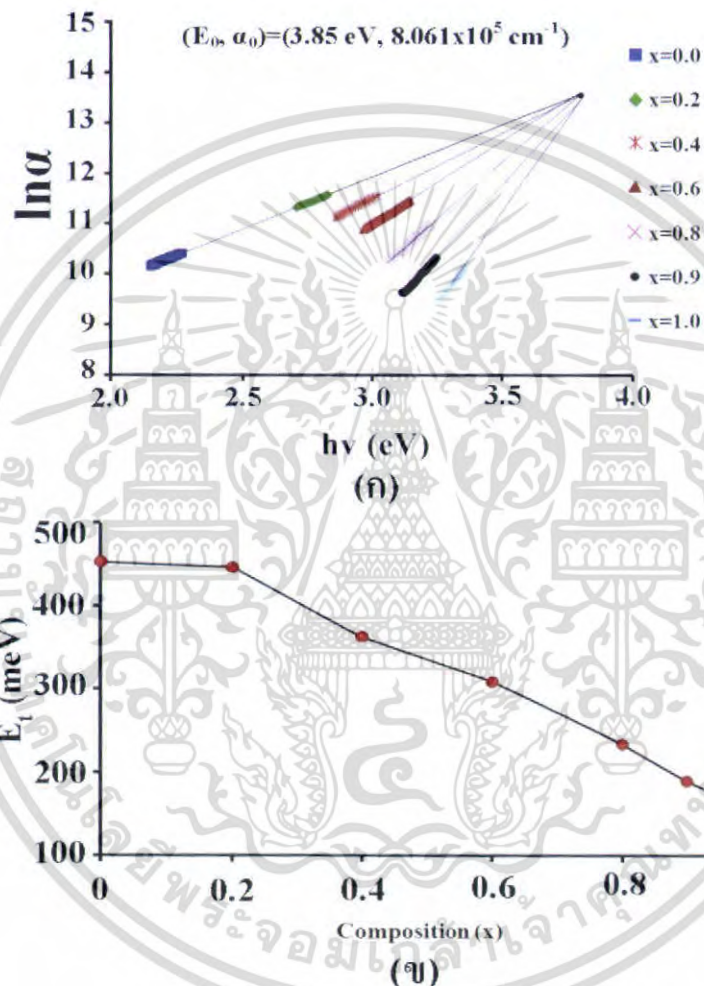
**รูปที่ 4.34** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.35** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

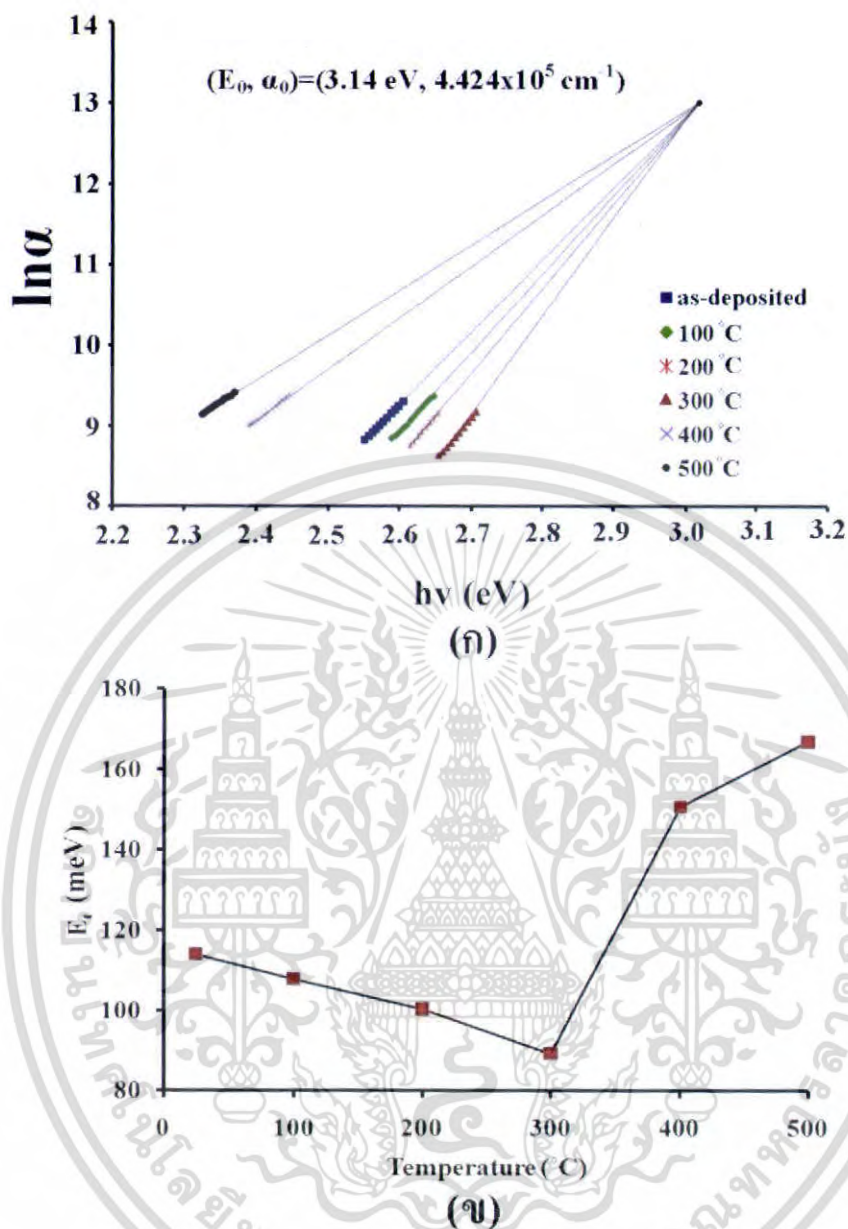
4.4.4 ผลการศึกษาส่วนหางของพลังงานที่มีอิทธิพลต่อช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.36 ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตรา  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

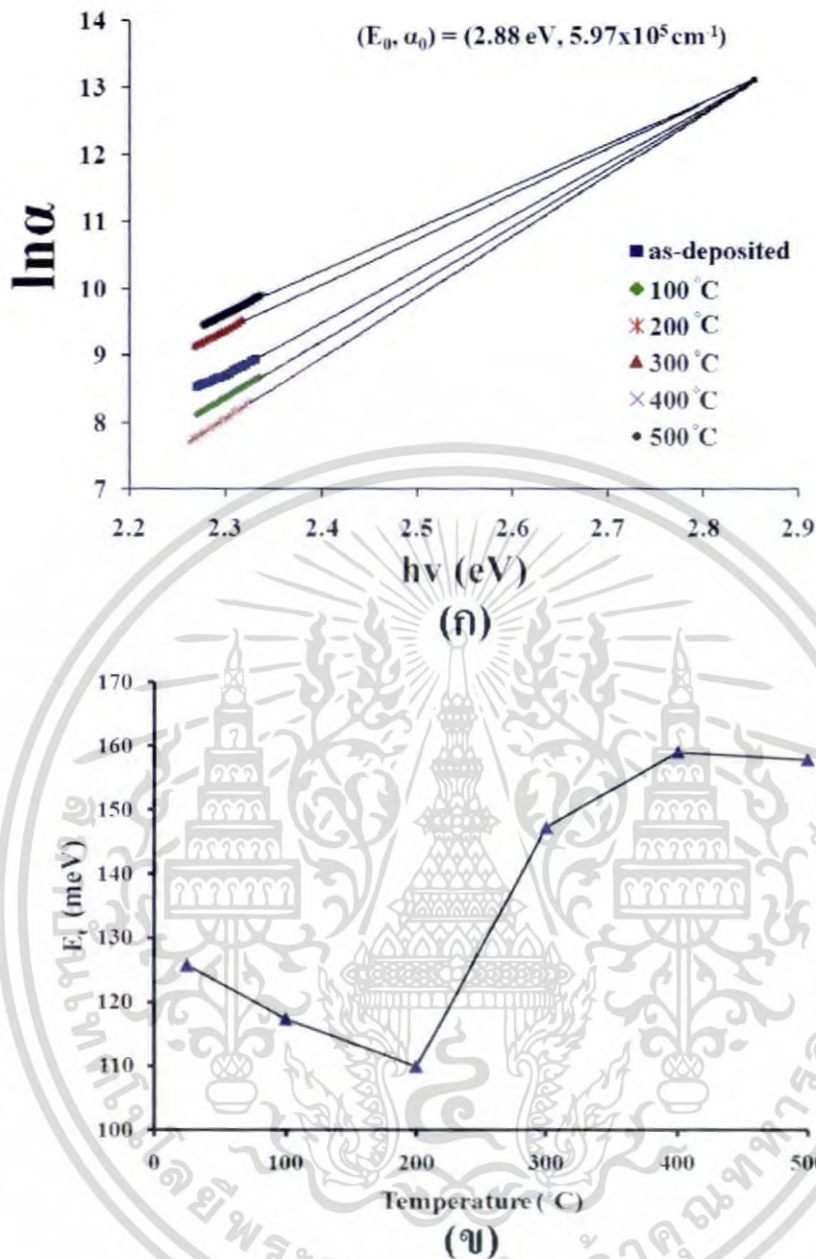
ข. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_1$  กับ อัตราส่วนผสม ( $x$ ) ของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\alpha$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที  
 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_a$  กับ อุณหภูมิแอนนีส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 4.38 ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \alpha$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
- ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_a$  กับ อุณหภูมิแอนนีส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีส 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหางของพลังงานจะส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้นั้นน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในการศึกษานี้สนใจการเปลี่ยนแปลงของปริมาณส่วนหางของพลังงานจากเงื่อนไข 2 ประการคือ การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบโครงสร้างของผลึกเนื่องจากการเพิ่มระดับปริมาณอะตอมของธาตุโคธาตุหนึ่งลงไป และ การเปลี่ยนแปลงในส่วนของการเรียงตัวของผลึกที่เป็นระเบียบขึ้นจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ

จากข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงก็สามารถคำนวณค่าส่วนหางของแถบพลังงานได้จาก สมการ(4.6) ดังนี้คือ

$$\ln\alpha = \frac{1}{E_t} + \ln\alpha_0 \quad (4.6)$$

โดย  $E_t$  คือส่วนหางของแถบพลังงาน ในการศึกษาของตัวอย่างฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำทั้งหมดสามารถวิเคราะห์ได้ 2 อย่าง ประการแรก หากพิจารณาในกรณีที่มีการเพิ่มปริมาณอะตอมของสารอื่นเพื่อให้ฟิล์มบางมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการเช่น การเพิ่มปริมาณของอะตอมธาตุสังกะสีในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์เพื่อเพิ่มขนาดช่องว่างแถบพลังงานจุดนี้ส่งผลให้ค่าของส่วนหางของพลังงานดังปรากฏในรูปที่ 4.36 (ข) แนวโน้มของภาพแสดงให้เห็นว่าปริมาณของอะตอมธาตุสังกะสีมีปริมาณเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าของส่วนหางพลังงานลดลง ประการที่สอง การนำฟิล์มบางเข้าสู่กระบวนการแอนนัลเพื่อจัดความเป็นระเบียบการเรียงตัวโครงสร้างผลึกส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนหางแถบพลังงานได้เช่นกัน ข้อมูลจากรูปที่ 4.7 (ข) ค่าส่วนหางของแถบช่องว่างพลังงานมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิแอนนัลประมาณ 300 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นกรณีของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสแล้วส่วนหางของแถบพลังงานจะมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิแอนนัลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  พลังงานความร้อนช่วยให้อะตอมต่างๆจัดเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมของโครงสร้างผลึก แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส อาจส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอะตอมต่างๆ ในโครงสร้างผลึกเกิดความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มบาง CdS ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกล่าวคืออุณหภูมิแอนนัลที่เหมาะสมจะเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.8 (ข) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในกรณีอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  อาจเป็นเพราะว่าฟิล์มของบางสารกึ่งตัวนำ CdS มีอะตอมอยู่ 2 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมของ โครงสร้างผลึกกระทำได้ง่ายกว่าและใช้ อุณหภูมิแอนนัลที่ต่ำกว่า

4.5 การหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ค่าดัชนีหักเหเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางแสงของตัวกลาง ค่าดัชนีหักเหนิยามได้จากอัตราส่วนของความเร็วของแสงในสุญญากาศต่อความเร็วในตัวกลาง แสงเคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยความเร็ว  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ส่วนในตัวกลางใดๆ อัตราเร็วของแสงจะเปลี่ยนไป ถ้าให้  $n$  แทนดัชนีหักเห (refractive index) ของตัวกลางใดๆ จะได้  $n = c/v$  โดย  $c$  แทนอัตราเร็วแสงในสุญญากาศหรืออากาศ และ  $v$  แทนอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใดๆ และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรูปแบบคำสั่งการของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ได้ทำการศึกษาคือฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีการเพิ่มปริมาณของค่าอัตราส่วนผสม  $x$  เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9 และ 1.0 และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิล 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

ตัวอย่างคำสั่งในการจำลองค่าดัชนีหักเหด้วยโปรแกรม PUMA ได้กำหนดข้อมูลและค่าต่างๆดังนี้

```
4 10 T 100 0400 0800 0010 0200 01 0400 0800 010 3000 1e+100 0 3 5 1
3 5 1 0.10 0.10 0.05
```

NOTE :

4 : จำนวนชั้น (มี 4 ชั้น คือ อากาศชั้นแรก + ฟิล์ม + กระจกสไลด์ + อากาศชั้นสุดท้าย)

10 : ฐานรอง (กระจกเบอร์ 7059)

T : ชนิดของข้อมูล (เป็นการส่งผ่าน)

100 : NOBS (เป็นค่าที่ยอมรับ)

0400 : ความยาวคลื่นของจุดเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0800 : ความยาวคลื่นของจุดสุกท้าย (Note : ความยาวคลื่นน้อยสุดคือ 1 และความยาวคลื่นที่มากที่สุดคือ 5000)

0010 : ความหนาต่ำสุด

0200 : ความหนาสูงสุด

01 : วัดความหนาไปครั้งละ 1 นาโนเมตร

0400 : INFLE ต่ำสุด

0800 : INFLE สูงสุด

10 : วัด INFLE ไปครั้งละ 10 นาโนเมตร

3000 : MAXIT

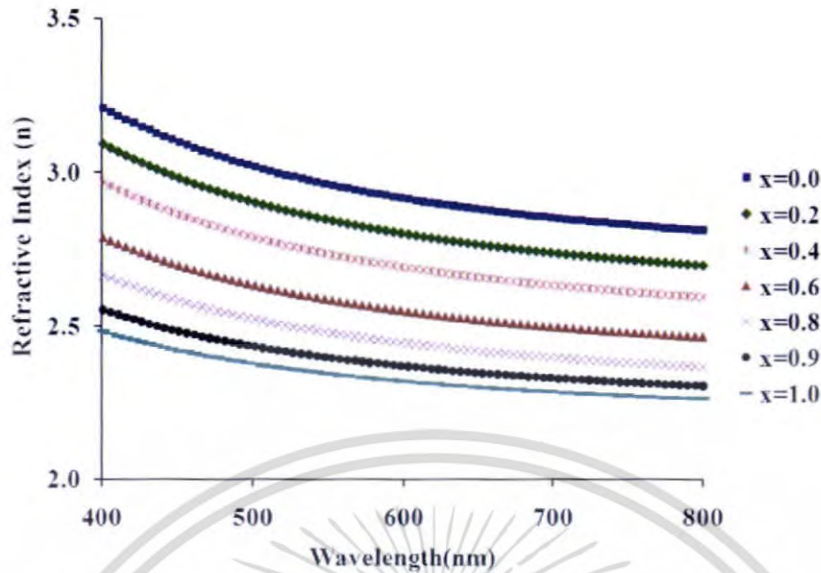
1e+100 : QUAD

0 : INIT หมายถึงค่าตอนแรกที่คาดคะเนไว้

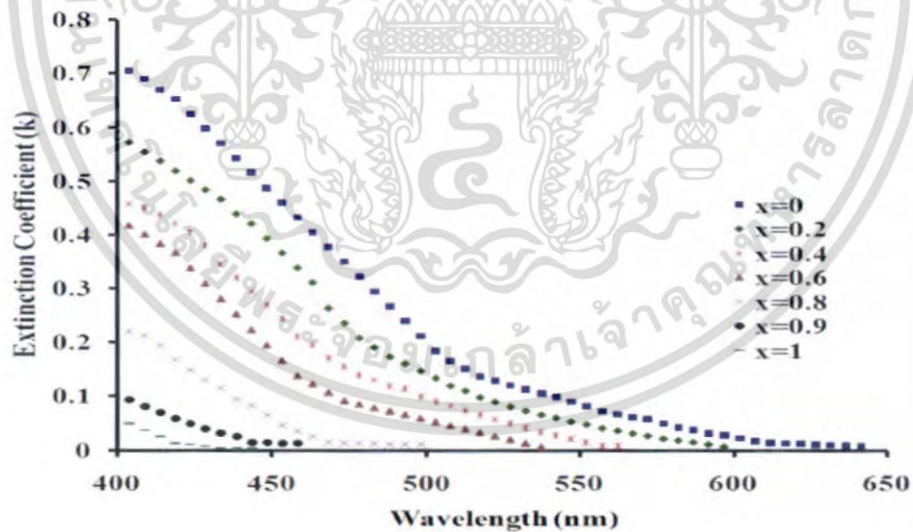
3 : NOini , 5 : NOfin , 1 : NOstep , 3 : NFin , 5 : NFfin , 1 : NFstep

โปรแกรม PUMA จะทำการคำนวณค่าดัชนีหักเห โดยอาศัยข้อมูลสเปกตรัมการส่งผ่านแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยข้อมูลความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงที่ใช้ อยู่ในช่วง 300 – 800 นาโนเมตร โปรแกรม PUMA จะต้องอาศัยดึงเอาข้อมูลดังกล่าวจากไฟล์ Notepad ในไฟล์มีข้อมูลการส่งผ่านแสง ข้อมูลความยาวคลื่น ตัวเลขระบุจำนวนของข้อมูล ในการบันทึกนามสกุลของไฟล์ที่ป้อนข้อมูลให้โปรแกรม PUMA ทำการคำนวณจะบันทึกเป็น.DAT จึงทำการสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณตามคำสั่งที่ได้กล่าวมาข้างต้น ระยะเวลาในการคำนวณของโปรแกรมขึ้นอยู่กับคุณภาพของฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์เช่น ขนาดหน่วยความเร็วของแรม หรือจำนวนข้อมูลที่ใช้มาคำนวณ หลังจากที่โปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์จะบันทึกผลการคำนวณเป็นไฟล์ Notepad ถูกบันทึกนามสกุล.inf ภายไฟล์ประกอบด้วยข้อมูลของ ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ข้อมูลของค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ได้หลังจากโปรแกรมคำนวณเสร็จเมื่อมาทำเขียนความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.39 - 4.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

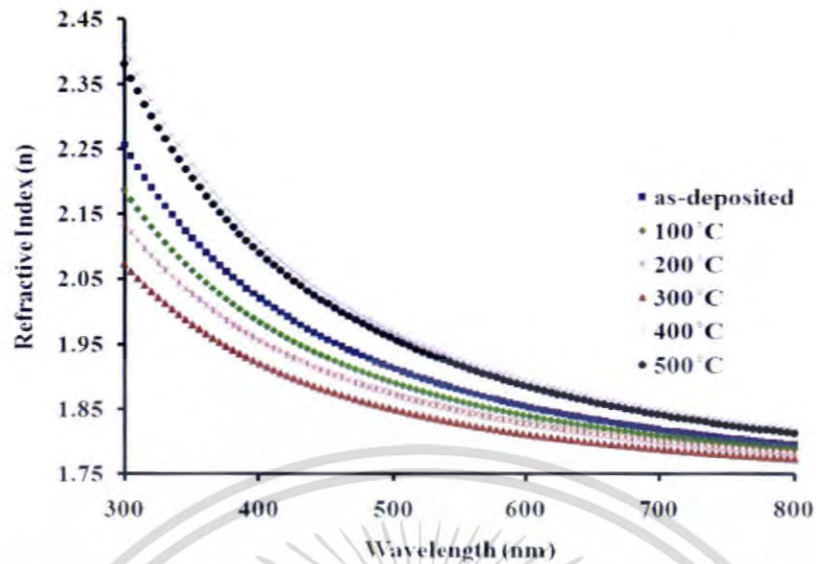


รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xZn_{1-x}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนیل

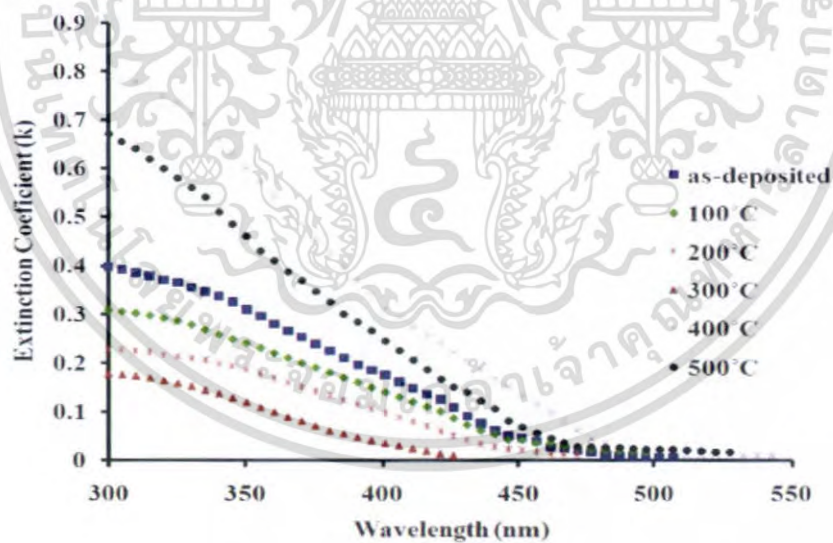


รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xZn_{1-x}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่อัตราส่วนผสม  $x$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

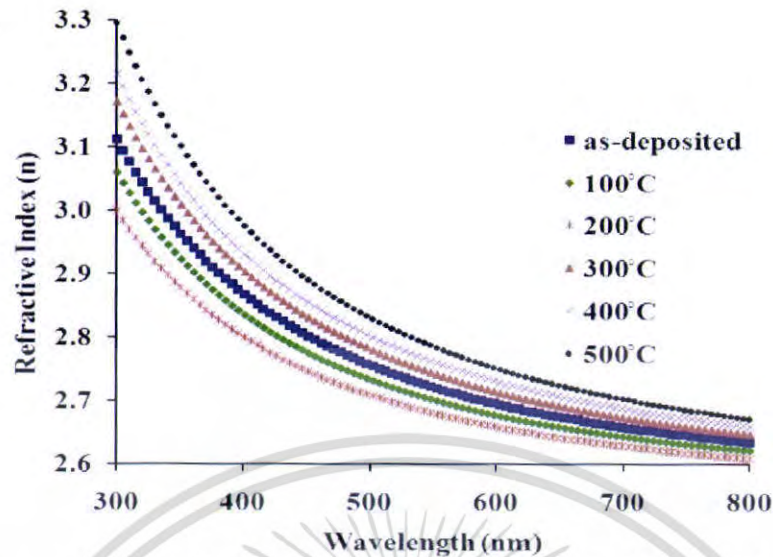


**รูปที่ 4.41** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

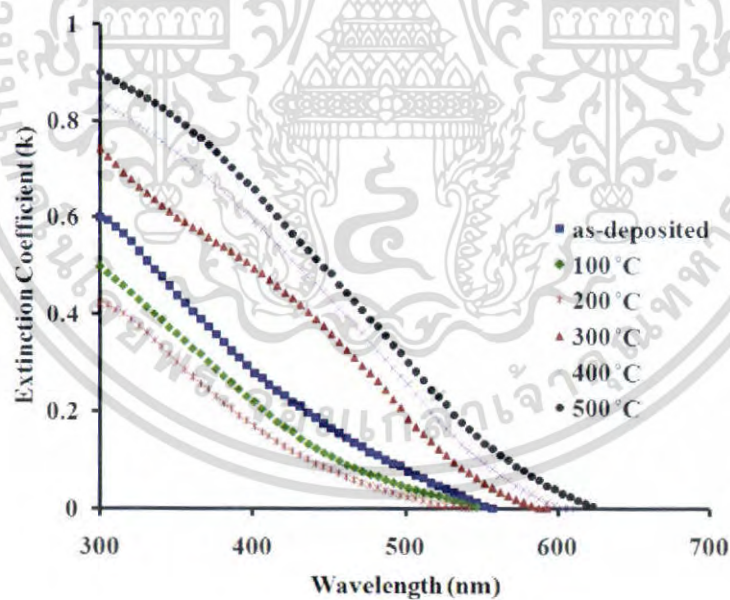


**รูปที่ 4.42** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.43** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



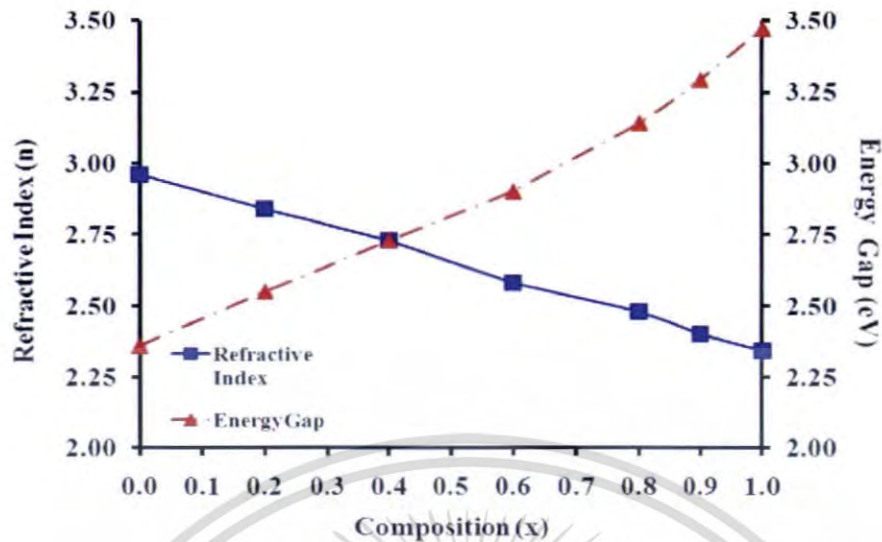
**รูปที่ 4.44** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

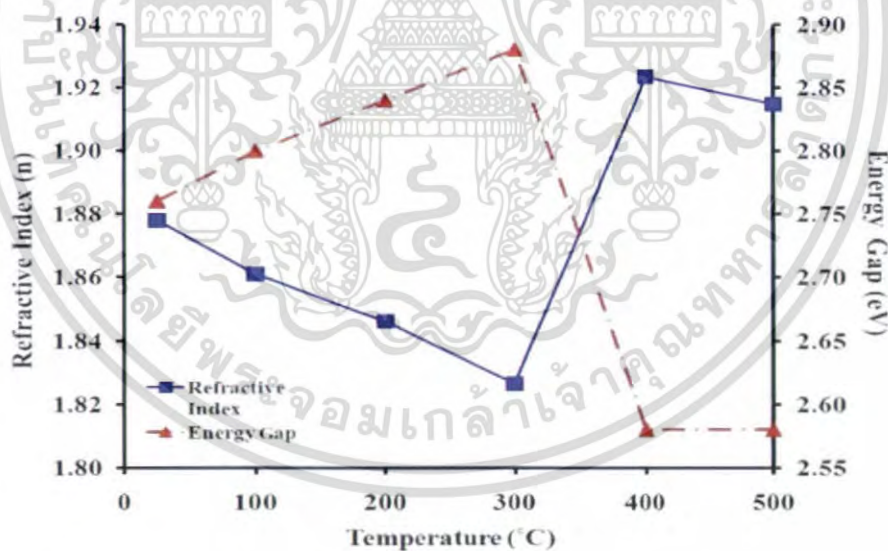
หากพิจารณาความยาวคลื่นแสงในช่วง 300-800 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$ ,  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  จะแสดงดังรูปที่ 4.39, 4.41 และ 4.43 ซึ่งพบว่าเมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าดัชนีหักเหจะมีแนวโน้มลดลง โดยในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 500 นาโนเมตร) ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น (ความยาวคลื่นสูงกว่า 500 นาโนเมตร) แล้วค่าดัชนีหักเหจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหตามความยาวคลื่นแสงสอดคล้องดีกับสมการคอดี  $n = a + (b/\lambda^2)$  [11, 36]

จากรูปที่ 4.40, 4.42 และ 4.44 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสง โดยรูปทั้งสามมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงาน ( $\lambda_g$ ) แต่เมื่อความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีค่าลดลงช้าๆ เข้าสู่ศูนย์นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีบทบาทมากที่ช่วงพลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดังกล่าว และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีบทบาทลดลงจนน้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงที่ความยาวคลื่นมีค่าสูง หรือในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสงความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ดังความสัมพันธ์  $k = \alpha\lambda/4\pi$  [3] ทั้งนี้การสูญเสียทางแสงในช่วงพลังงานสูงเป็นเพราะเกิดการดูดกลืนโฟตอนเพื่อใช้ในการทรานซิชันอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำในสารกึ่งตัวนำ

จากรูปด้านล่างที่ 4.45, 4.46, 4.47 แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห โดยพิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  จากรูปสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานกับค่าดัชนีหักเหมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน กล่าวคือฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำจะมีค่าดัชนีหักเหสูง

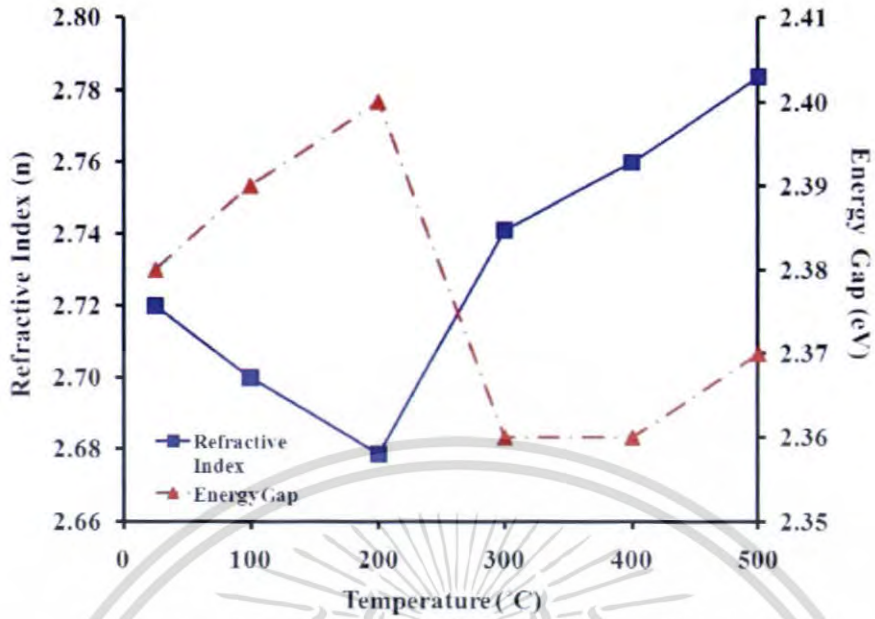


รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหพิกจาร์ณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าช่องว่างแถบพลังงานในแต่ละอัตราส่วนผสม  $x$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xZn_{1-x}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆในกรณีนี้ที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหพิกจาร์ณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



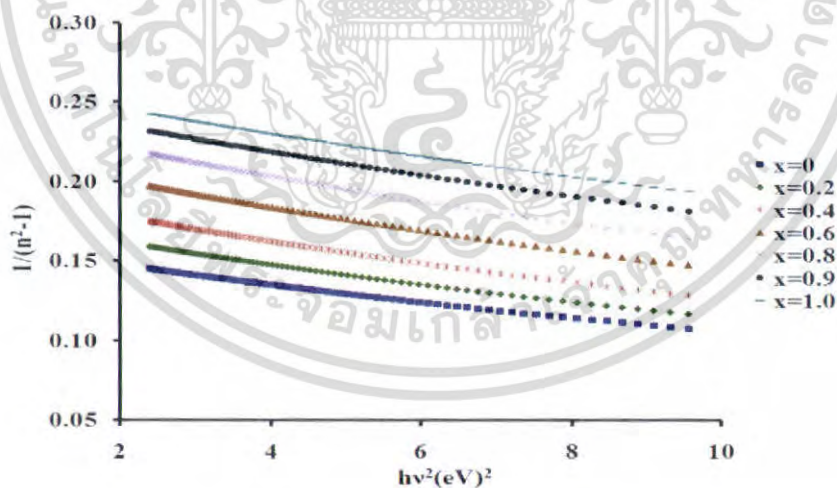
รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สใน โตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว

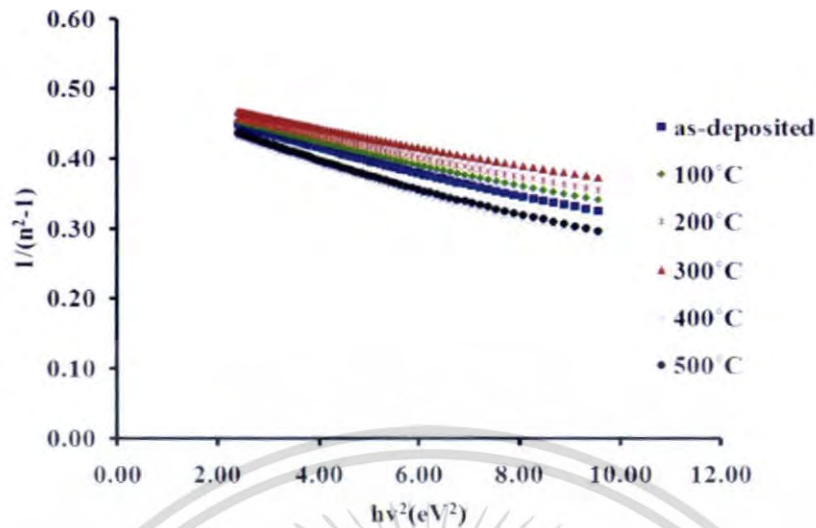
เวมเพิม-ไค โดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวขึ้นโดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ ไอออนคอร์ในเนื้อสารของวัสดุ โดยถือว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

4.6.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวในย่านพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัลและของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

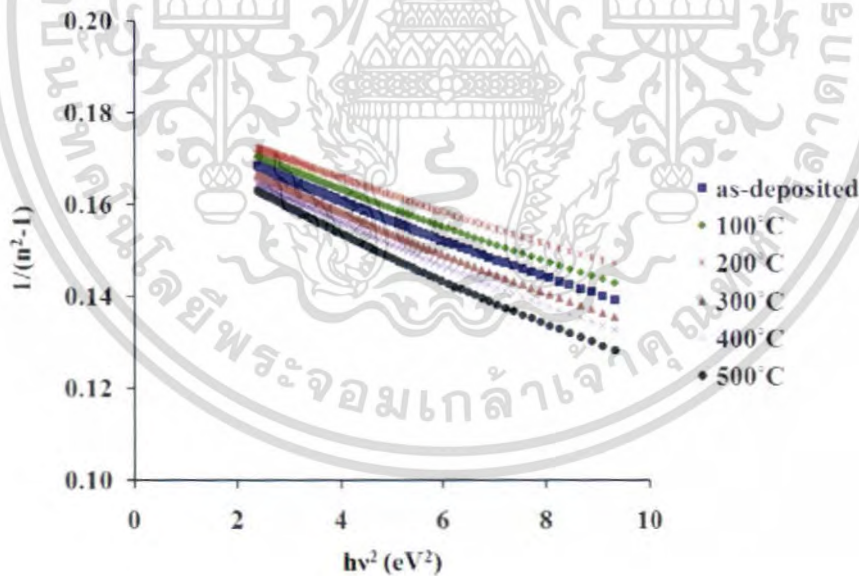


รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้จากวิเคราะห์แบบจำลอง ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.45-4.47 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรง ในย่านพลังงานต่ำกว่าช่องแถบพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหจะแสดงได้ดังสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{E_o E_d}{E_o^2 - (h\nu)^2}$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_o}{E_d} - \frac{1}{E_o E_d} (h\nu)^2 \quad (4.7)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.7) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่า ช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_o E_d} \quad (4.8)$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_o}{E_d} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.8) และ (4.9) สามารถที่จะหาค่า  $E_o$  และ  $E_d$  ได้ โดยที่  $E_o$  คือพลังงานของ ออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของ ช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ส่วน  $E_d$  คือพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแข็งแรงของการย้าย สถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่งสามารถเขียนในสัมพันธ์ได้อีก รูปแบบหนึ่งดังสมการที่ (4.10)

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (4.10)$$

เมื่อ

$$\beta = 0.26 \pm 0.03 \text{eV}$$

$N_c$  = เลขโคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน (number of the cation nearest neighbor to anion)

$Z_a$  = วาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

$N_e$  = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อหนึ่งแอนไอออน (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $f = E_0 E_d$  คือความแข็งแกร่งของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่  $r$  ของสเปกตรัมทางแสง ( $r^{\text{th}}$  moments of the optical spectra) จะสัมพันธ์กับ  $E_0 E_d$  ดังนี้ คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (4.11)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (4.12)$$

เมื่อ  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  คือโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 ของสเปกตรัมเชิงแสงตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเห ( $n^*$ ) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (4.13)$$

เมื่อ

$$n^* = n - ik \quad (4.14)$$

เมื่อ  $n$  = ค่าดัชนีหักเห

$k$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (4.15)$$

โดยที่

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (4.16)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (4.17)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของสภาพนำแสง (optical conductivity,  $\sigma$ ) ไว้ดังนี้ คือ

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

เมื่อ

$$\sigma_1 = \omega\epsilon_2\epsilon_0 \quad (4.18)$$

และ

$$\sigma_2 = \omega\epsilon_1\epsilon_0 \quad (4.19)$$

ตารางที่ 4.5-4.7 เป็นตารางผลของการคำนวณพารามิเตอร์ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณต่างๆ และแนวโน้มของค่าตัวแปรทางแสง ค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์และพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ -1 และ -3 จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อนันต์ซึ่งคำนวณได้จากสมการคือ  $n = a + (b/\lambda^2)$  เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงอยู่ในระดับอนันต์แล้วพจน์ของ  $b/\lambda^2$  มีค่าเทียบเคียงเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหที่ลำดับอนันต์จึงมีค่าเทียบเท่ากับตัวแปร a และจากสมการที่ (4.13) ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสงลำดับอนันต์ได้

**ตารางที่ 4.5** แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_xZn_{1-x}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนัล

Composition (x)	$n=a+(b/\lambda^2)$		Wemple-DiDomenico Analysis							n @400 nm	n @800 nm	$E_g$ (eV)	$E_t$ (meV)
	a	b (nm <sup>2</sup> )	$n_\infty$	$\epsilon_\infty$	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$M_{-1}$	$M_{-3}$ (eV <sup>2</sup> )	f (eV <sup>2</sup> )				
0	2.68	85,581	2.68	7.54	5.43	34.74	6.40	0.22	188.71	3.21	2.81	2.25	153.90
0.2	2.57	84,190	2.57	6.95	5.47	32.05	5.85	0.18	175.44	3.09	2.70	2.50	188.85
0.4	2.47	80,143	2.47	6.42	5.57	29.92	5.37	0.17	166.66	2.97	2.59	2.65	233.00
0.6	2.36	81,238	2.36	5.88	5.61	27.39	4.84	0.15	158.73	2.86	2.48	2.80	308.65
0.8	2.27	73,333	2.27	5.42	5.68	25.12	4.41	0.14	142.85	2.73	2.38	3.05	362.66
0.9	2.22	66,000	2.22	5.18	5.84	24.43	4.18	0.12	142.86	2.64	2.33	3.25	445.95
1.0	2.19	60,095	2.19	5.00	5.97	23.90	4.00	0.11	142.86	2.57	2.28	3.45	452.77

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Temperature (°C)	$n=a+(b/\lambda^2)$		Wemple-DiDomenico Analysis							n @300 nm	n @800 nm	$E_g$ (eV)	$E_t$ (meV)
	a	b (nm <sup>2</sup> )	$n_\infty$	$\epsilon_\infty$	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$M_{-1}$	$M_{-3}$ (eV <sup>2</sup> )	f (eV <sup>2</sup> )				
as-deposited	1.72	48,256	1.72	2.96	5.33	10.43	1.96	0.07	55.55	2.26	1.80	2.76	113.96
100	1.73	41,550	1.73	2.98	5.59	11.04	1.98	0.06	61.73	2.19	1.79	2.80	107.77
200	1.73	36,960	1.73	2.98	5.83	11.51	1.98	0.06	67.11	2.14	1.78	2.84	100.31
300	1.73	31,556	1.73	2.99	6.12	12.19	1.99	0.05	74.60	2.07	1.77	2.88	89.31
400	1.72	62,103	1.72	2.96	4.97	9.73	1.96	0.08	48.31	2.41	1.82	2.58	150.66
500	1.72	59,503	1.72	2.96	5.03	9.85	1.96	0.08	49.50	2.38	1.81	2.58	166.94

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Temperature (°C)	n=a+(b/λ <sup>2</sup> )		Wemple-DiDomenico Analysis							n @300 nm	n @800 nm	E <sub>g</sub> (eV)	E <sub>i</sub> (meV)
	a	b (nm <sup>2</sup> )	n <sub>∞</sub>	ε <sub>∞</sub>	E <sub>0</sub> (eV)	E <sub>d</sub> (eV)	M <sub>-1</sub>	M <sub>-3</sub> (eV <sup>2</sup> )	f (eV <sup>2</sup> )				
as-deposited	2.56	49,985	2.56	6.58	6.48	35.87	5.53	0.13	232.56	3.11	2.63	2.38	125.79
100	2.55	45,938	2.55	6.48	6.74	37.08	5.47	0.12	249.99	3.06	2.62	2.39	117.41
200	2.54	40,952	2.54	6.47	7.03	38.46	5.47	0.11	270.27	3.00	2.61	2.40	109.96
300	2.56	54,885	2.56	6.56	6.32	35.15	5.56	0.14	222.14	3.17	2.65	2.36	147.23
400	2.57	58,125	2.57	6.60	6.16	34.52	5.60	0.15	212.73	3.22	2.66	2.36	159.09
500	2.57	65,242	2.57	6.60	5.91	33.15	5.61	0.16	196.08	3.29	2.67	2.37	157.87

ในรูปที่ 4.45-4.47 และจากข้อมูลในตารางที่ 4.5-4.7 แสดงถึงแนวโน้มค่าดัชนีหักเหที่ได้จากการศึกษาซึ่งมีความสัมพันธ์ในรูปแบบที่แปรผกผันกันกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ที่กล่าวมานั้นสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของมอส (Moss relation) [31] ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างค่าดัชนีหักเหกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ดังที่จะได้แสดงต่อไปนี้

$$\frac{n^4}{\lambda_c} = 77 (\mu\text{m})^{-1} \quad (4.20)$$

เมื่อ n คือค่าดัชนีหักเหและ λ<sub>c</sub> คือความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กับขอบการดูดกลืน จากสมการที่(4.20) สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กับช่องว่างแถบพลังงาน ได้ดังนี้

$$n^4 E_g = 95 \text{ eV} \quad (4.21)$$

หากเขียนความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกันของค่าดัชนีหักเหและช่องว่างแถบพลังงานจะได้

$$n^4 = \frac{95 \text{ eV}}{E_g} \quad (4.22)$$

นอกจากนี้ผลแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหและช่องว่างพลังงานที่ได้จากการวิจัยนั้นได้สอดคล้องกับแนวคิดและผลงานวิจัยของท่านอื่นๆ[32-37] ที่ว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถสัมพันธ์กันกับค่าดัชนีหักเหของวัสดุได้เช่นกัน

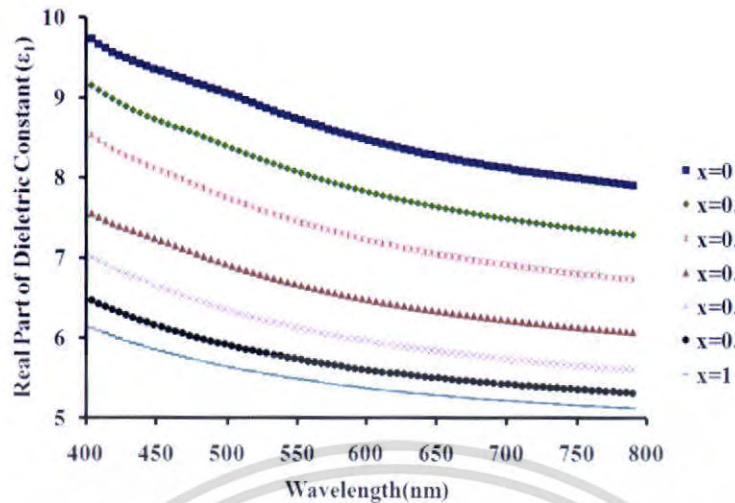
4.6.2 ผลการหาค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS$  และ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สื่อถึงความมีขั้วของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ วัสดุใดที่มีความเป็นขั้วสูงและจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้ได้ ค่าที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนประกอบไปด้วยส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ รูปที่ 4.51 และ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ พบว่าที่ความถี่ค่าใดค่าหนึ่ง เมื่ออัตราส่วนผสม  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าใดค่าหนึ่งแล้ว ทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ค่าศูนย์เมื่อความยาวคลื่นที่ค่าสูงขึ้น

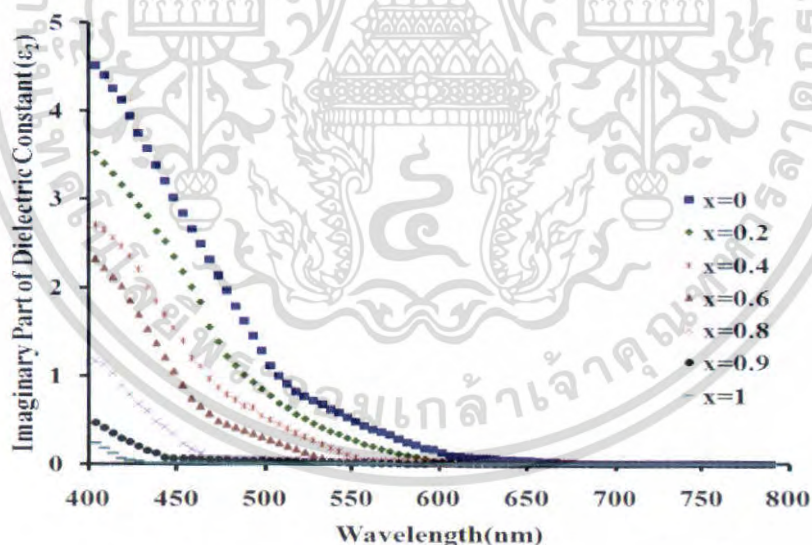
สำหรับรูปที่ 4.53 และ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่อัตราส่วนผสมค่าต่างๆ พิจารณาที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งเมื่ออัตราส่วนผสม  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสม  $x$  ค่าใดค่าหนึ่งแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้น

เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งเป็นการยาวคลื่นที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  แสดงว่าฟิล์มบางมีการดูดกลืนแสงแล้วส่งผลให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ดี ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงความถี่ 400-800 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

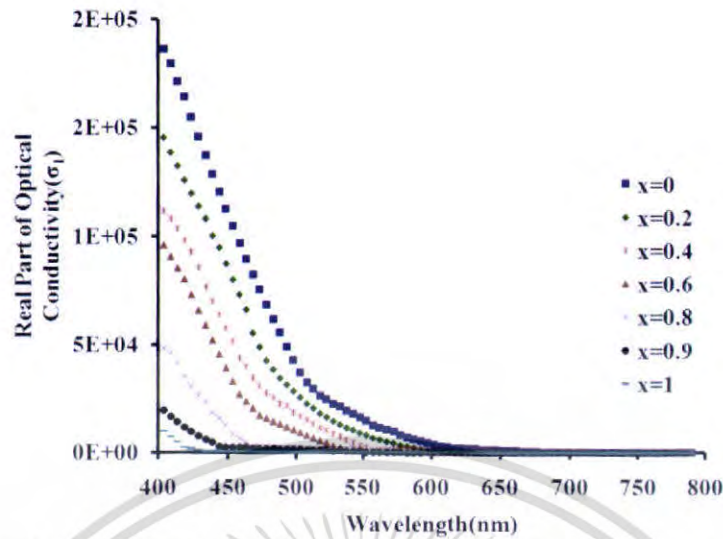


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CdS}$  และ  $\text{ZnS}$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

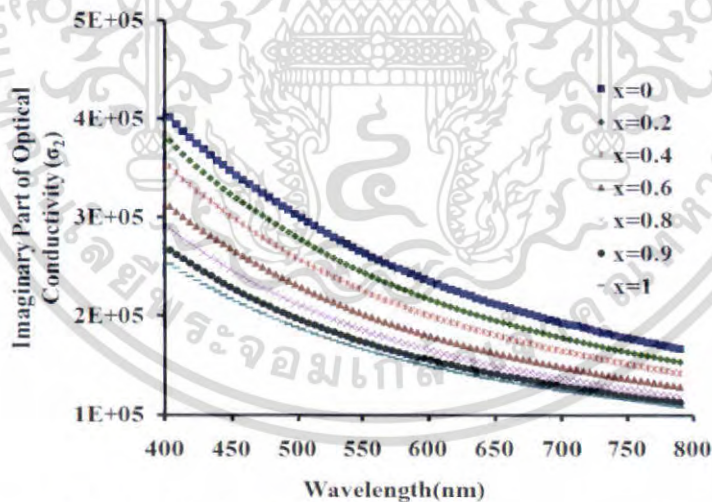


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{CdS}$  และ  $\text{ZnS}$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

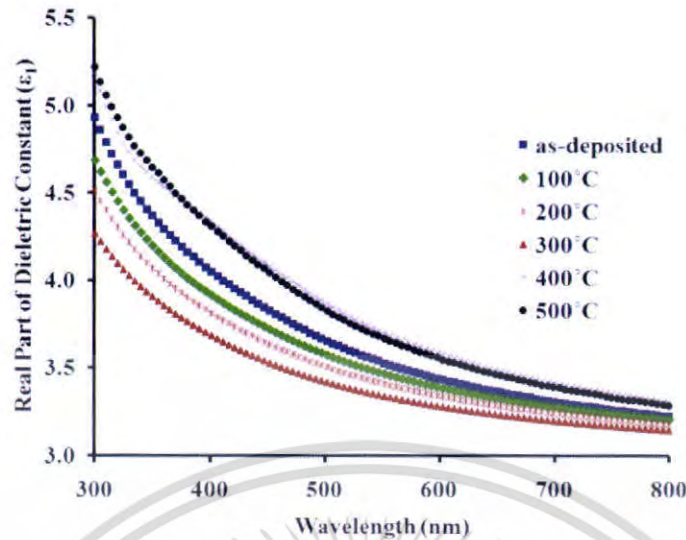


รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก

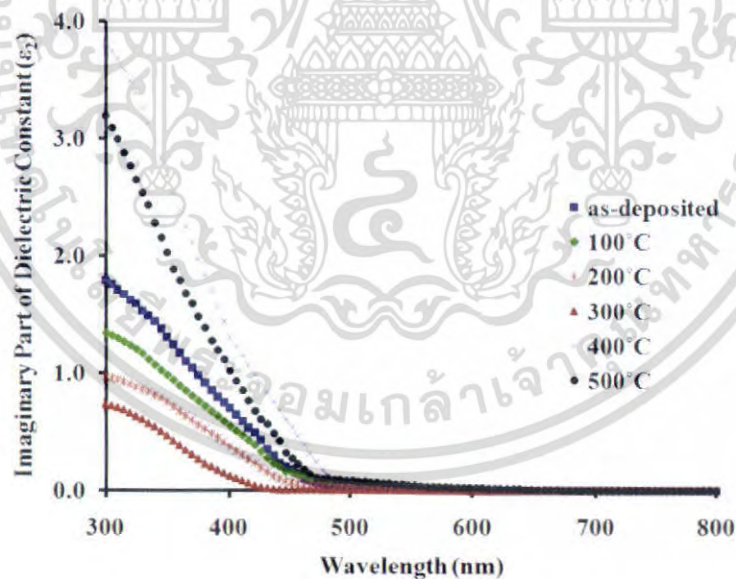


รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งมีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

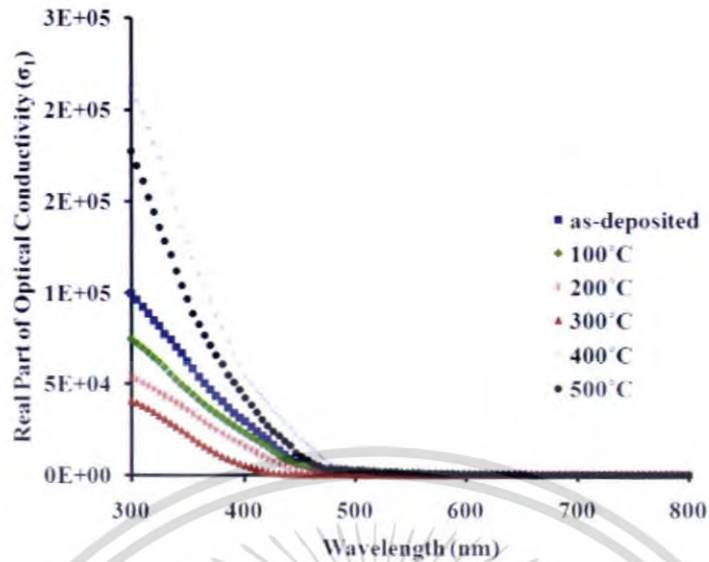


รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

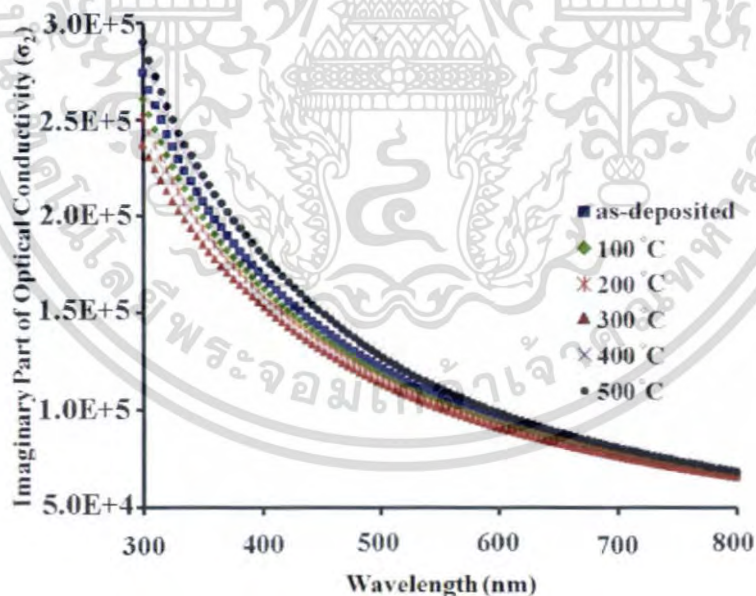


รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

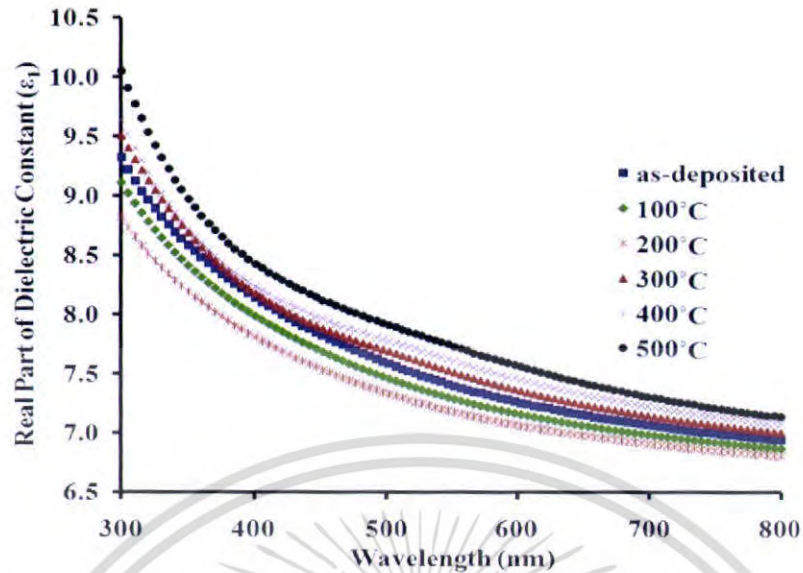


รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

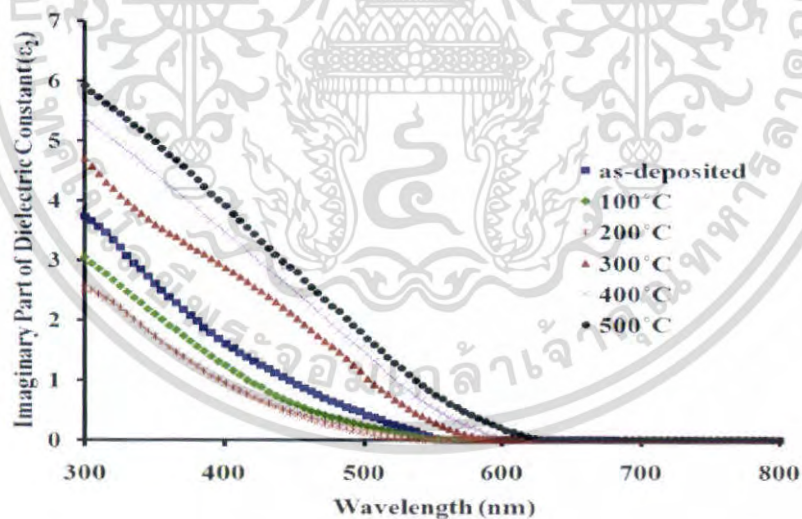


รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

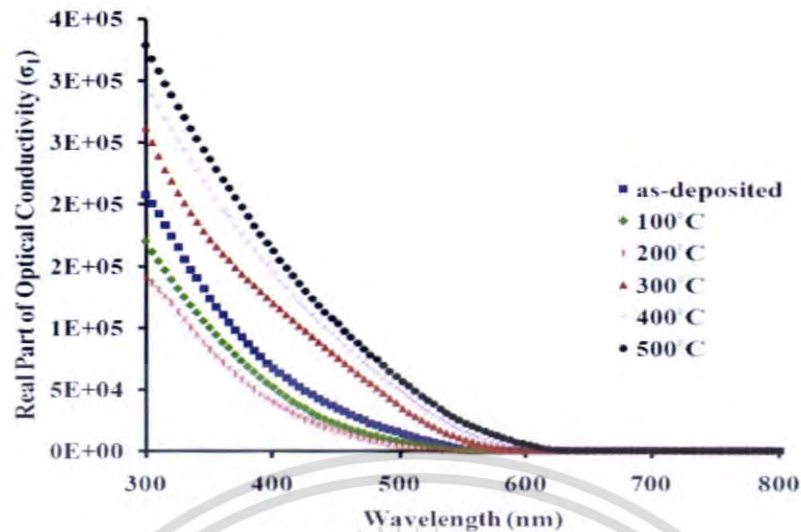


รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสโกลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

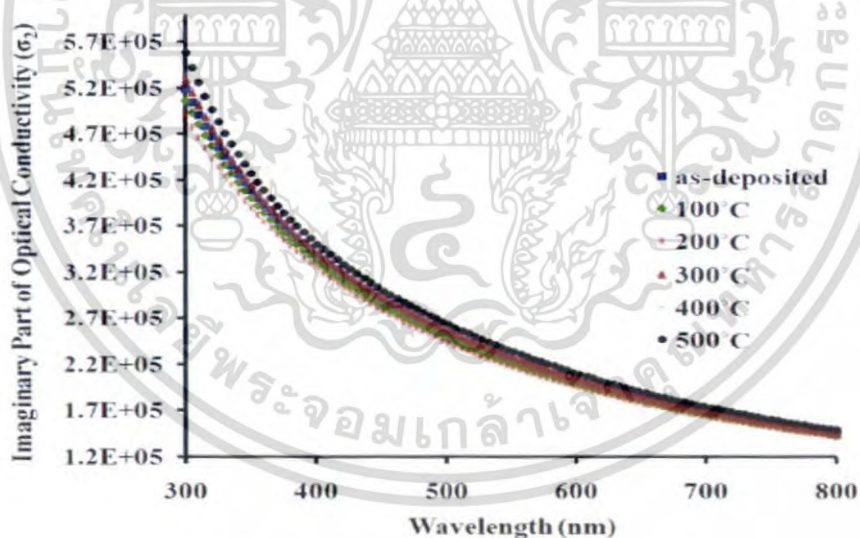


รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสโกลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของของสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.55 และ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ทั้งที่โมโนเลเยอร์และที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสเมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่ง จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงจากการที่ฟิล์มบางที่โมโนเลเยอร์และมีค่าลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีส 300 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นเป็น 400 และ 500 องศาเซลเซียสตามลำดับ ค่าจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มบางทั้งที่โมโนเลเยอร์และที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเดียวกันเมื่อความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่ง จำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิแอนนีสที่เพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีส 300 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแอนนีส 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เปลี่ยนไปตามความยาวคลื่นแสงพบว่าฟิล์มบางทั้งที่โมโนเลเยอร์และที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นแสงต่ำกว่า 475 นาโนเมตร แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมากกว่า 475 นาโนเมตรแล้วจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์

สำหรับรูปที่ 4.57 และ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ทั้งที่โมโนเลเยอร์และที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงจากการที่ฟิล์มบางโมโนเลเยอร์และมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีส 300 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นค่าจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแอนนีส 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่เปลี่ยนไปตามความยาวคลื่นแสงจะสังเกตเห็นได้ว่าจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นกว่า 475 นาโนเมตร แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงสูงกว่า 475 นาโนเมตร จำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนที่เปลี่ยนไปตามความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ทั้งที่โมโนเลเยอร์และที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าลดลงไม่มากนักตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.59 และ 5.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ทั้งที่ไม่ได้แอนนีกและที่แอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่ง จำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงจากกรณีฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนีกและมีค่าลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีก 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีกเพิ่มขึ้นจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแอนนีก 500 องศาเซลเซียส สำหรับจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ทั้งที่ไม่ได้แอนนีกและที่แอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มที่ลดลงในลักษณะแบบเดียวกันเมื่อความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่งจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิแอนนีกที่เพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีก 200 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแอนนีก 500 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เปลี่ยนไปตามความยาวคลื่นแสงพบว่า ฟิล์มบางทั้งที่ไม่ได้แอนนีกและที่แอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นแสงที่ต่ำกว่า 520 นาโนเมตร แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมากกว่า 520 นาโนเมตรแล้วจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนมีค่าเข้าสู่ศูนย์

สำหรับรูปที่ 4.61 และ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ทั้งที่ไม่ได้แอนนีกและที่แอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่ามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับที่ปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  มีสิ่งที่แตกต่างกันเล็กน้อยคือค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ปรากฏที่อุณหภูมิแอนนีก 200 และ 500 องศาเซลเซียสตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ในภาพรวม เช่น ลักษณะพื้นผิวและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและแนวโน้มของพารามิเตอร์ทางแสงที่มีผลพวงมาจากการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกทั้งจากการเพิ่มปริมาณธาตุชนิดอื่นลงไป ปริมาณที่แตกต่างกัน ผลจากกระบวนการแอนนیلเพื่อให้อะตอมในโครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัว ที่เป็นระเบียบมากขึ้น

**5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการเพิ่มปริมาณของ สังกะสีตามสัดส่วน  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0$  กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที**

สารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำทั้งหมดมาจากผงสารเคมี  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ให้เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศความดันต่ำกว่า  $5.5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์และมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามสัดส่วนค่าของ  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  และ  $1.0$  ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับของฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลือง โดยพบว่าฟิล์มบางที่ได้เตรียมขึ้นมาแต่ละเงื่อนไขในของการเพิ่มปริมาณของธาตุสังกะสีสังเกตุ ความเข้มของสีเหลืองจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสังกะสีเพิ่มขึ้น ( $ZnS$  บริสุทธิ์จะใส) จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณของธาตุสังกะสีนั้นจะทำให้ฟิล์มบางมีความใสมากยิ่งขึ้นส่งผลให้แสงส่งผ่านฟิล์มได้ดี

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  ที่ได้หลังจากเตรียมขึ้นด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีสมบัติในการยึดติดกับฐานรองรับได้ดี มีสีของฟิล์มที่เป็นสีเหลืองซึ่งเป็นลักษณะที่เด่นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นจากสารตั้งต้นที่มีส่วนประกอบของสารเคมีแคดเมียมซัลไฟด์ แต่ฟิล์มบางจะมีสีเหลืองค่อนข้างอ่อนและโปร่งเนื่องจากการเติมธาตุสังกะสี เมื่อนำฟิล์มที่ได้เข้ารับการอบแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และไม่มีการแอนนิลเป็นเวลา 30 นาที จากข้างต้นสภาพฟิล์มที่ได้ทั้งหมดสรุปลักษณะภายนอกไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงและมีความแตกต่างกันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ จะมีสีเหลืองเข้มที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางตัวอื่นๆ จากการที่ฟิล์มบางมีสีเหลืองเข้มมากจึงส่งผลให้มีการส่งผ่านแสงได้น้อยที่สุดในบรรดาฟิล์มบางที่ได้เตรียมขึ้น

ผลการตรวจสอบโครงสร้างของผลึกในเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าในกรณีของฟิล์มของบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามอัตราส่วนผสม  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  และ  $1.0$  ผลจากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางความเข้มสูงสุดของพีกที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  มีการเปลี่ยนแปลงโดยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของอะตอมของธาตุสังกะสีทำให้ตำแหน่งของพีกเลื่อนไปทางด้านขวามือโดยเริ่มต้นที่เงื่อนไขการเดิม  $x = 0$  ที่พีคระบุบอกระดับระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะโกนัลตำแหน่งมุมที่เกิด  $2\theta$  ประมาณ 26.52 องศา ตำแหน่งของพีกสูงสุดมีการเลื่อนไปทางขวาตามปริมาณการเติมธาตุสังกะสีที่เพิ่มขึ้นจนถึง  $x = 1$  เกิดพีกของระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกตำแหน่งมุมที่เกิด  $2\theta$  ประมาณ 27.70 องศา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล(เวิร์ทไซท์) แต่สำหรับ  $ZnS$  จะมีโครงสร้างแบบคิวบิก (ซิงค์เบลนด์)

ส่วนกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ พบว่าการแอนนัลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์น้อยมาก แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับค่าความเข้มของพีก แสดงว่าผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ และไม่มีการแอนนัล จะมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกน้อยมาก แต่มีผลต่อการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในผลึกภายในเนื้อของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสรุปได้ว่า ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามอัตราส่วนผสม  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  และ  $1.0$  พบว่าขนาดของเกรนจะมีการ

เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นธาตุสังกะสีของฟิล์มบาง โดยขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กลง ส่วนกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ พบว่าภาพของเกรนมีขนาดโตขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนิล

สรุปโดยภาพรวมแล้วข้อมูลที่ได้อาจการศึกษาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำใน 2 กรณีใหญ่ๆ คือ จากการศึกษาผลของความร้อนเนื่องจากกระบวนการแอนนิลจะส่งผลให้อะตอมของผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากระดับความเข้มของพีคที่มีความแตกต่างกันชัดเจนจากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแต่ลักษณะและรูปลักษณะภายนอกเกิดเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากการสังเกตด้วยตาเปล่าในกรณีการศึกษาผลของการเติมปริมาณสังกะสีลงในฟิล์มบางจะมีความแตกต่างกันมากในรูปลักษณะภายนอก โดยเมื่อปริมาณของสังกะสีที่มากขึ้นจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีสีที่อ่อนลง จากข้อมูลของการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดสนับสนุนข้อสันนิษฐานที่ว่า การเพิ่มธาตุสังกะสีมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้บอกลักษณะโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงจากเฮกซะโกนัลเป็นคิวบิก ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุสังกะสีที่ส่งผลต่อการลดลงของขนาดของเกรน โดยขนาดของเกรนนั้นมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าได้เช่นกัน ทั้งนี้การฟิล์มบางมีความโปร่งใสขึ้นก็หมายความว่า จะมีการส่องผ่านแสงได้ดีเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่หน้าสนใจในอันดับต้นๆ ได้แก่ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x = 0.4 - 0.8$  ซึ่งฟิล์มบางจะมีลักษณะของเกรนที่ไม่เล็กมากนักและมีความโปร่งแสงและสภาพนำไฟฟ้าที่ดีพอสมควร ส่งผลให้สามารถรับแสงได้ดี

## 5.2 สมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามอัตราส่วนผสม $x$ โดย $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0$ กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ และ $CdS$ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

ผลการศึกษาสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ พบว่าเกิดรีเวอร์การแทรกสอดของสเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทุกอัตราส่วนผสม  $x$  ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณหาค่าดัชนีหักเหในฟิล์มบางได้ สเปกตรัมการส่องผ่านแสงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก ผง  $CdS$  และ  $ZnS$  ที่ช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร ผลปรากฏว่ามีการส่งผ่านแสง ประมาณ 60 – 90 เปอร์เซ็นต์และขอบของการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นกว่า เมื่อ สัดส่วนการเจือ  $Zn$  เพิ่มมากขึ้น หมายความว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อเจือ  $Zn$  เพิ่มมากขึ้นหลังเขียนกราฟระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มีอัตราส่วนผสม  $x$  ค่าต่างๆ ผลของค่าช่องว่างที่ได้สอดคล้องกับแนวคิดที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในส่วนฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนیلที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ พบว่ามีการส่งผ่านแสงประมาณ 60 – 90 เปอร์เซ็นต์คล้ายคลึงกับกรณีแรกแต่ตำแหน่งขอบการดูดกลืนมีลำดับการเรียงตัวมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน จากการพิจารณาน่าจะมีปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงนอกเหนือจากอุณหภูมิ แอนนิลแต่ข้อมูลสเปกตรัมการส่งผ่านแสงที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกันกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากการเขียนกราฟระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ในการศึกษาส่วนหางของพลังงานจากฟิล์มบาง พบว่ามีแนวโน้มที่ส่วนหางของช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่อค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น

การหาค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทำได้โดยนำข้อมูลของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงที่ปรากฏไว้การแทรกสอดป้อนสู่คอมพิวเตอร์เพื่อให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นคำนวณค่า ข้อมูลที่ได้จากคำนวณคอมพิวเตอร์จะได้ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงในช่วงของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ในช่วงความยาวคลื่นสั้นค่าดัชนีหักเหจะมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนเลยช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับระดับช่องว่างแถบพลังงาน แนวโน้มค่าดัชนีหักเหจะเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง จุดนี้แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนีจะมีบทบาทสำคัญในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าแถบช่องว่างพลังงานและค่าดัชนีหักเหจะมีความสัมพันธ์กับช่องว่างแถบพลังงานแบบแปรผกผันกล่าวคือ เมื่อช่องว่างแถบพลังงานลดลงแล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสนับสนุนแนวคิดหนึ่งที่ว่าวัสดุที่มีความโปร่งแสงสูงจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูง และค่าดัชนีหักเหต่ำทำให้เกิดการหักเหได้น้อยลงแสงผ่านไปได้ดีเช่นกัน การที่มีค่าดัชนีหักเหมากจะทำให้ทิศทางของแสงในฟิล์มบางเปลี่ยนไปมากโอกาสที่แสงจะสูญเสียภายในฟิล์มจะมีสูงขึ้นเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของแสงในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น ด้านค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีอิทธิพลคนละย่านกับค่าดัชนีหักเห กล่าวคือจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของวัสดุใดๆที่มีค่าน้อยสุดเมื่อวัสดุนั้นมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะแปรผกผันกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ตรงนี้จึงสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มากแล้วการสูญเสียทางแสงในเนื้อฟิล์มบางจะน้อยเมื่อเทียบกับกรณีของฟิล์มบางที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่น้อยกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่มากกว่า ในการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในแต่ละเงื่อนไขไม่ว่า

จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพราะการเพิ่มปริมาณของธาตุอื่นเพื่อเปลี่ยนสมบัติบางประการของฟิล์มบางหรือผลที่เกิดจากความร้อนเนื่องด้วยการแอนนัลเพื่อให้อะตอมในโครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าดัชนีหักเห

แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวเป็นแนวคิดที่สนใจรูปแบบการสั่นของอิเล็กตรอนเนื่องจากมีสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปในผลึก อิเล็กตรอนจะสั่นไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบๆ ไอออนคอร์ในรูปแบบเดียว ในการพิจารณาอาศัยจากการทราบค่าดัชนีหักเหที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงเพื่อหาค่าตัวแปรพลังงานที่บ่งบอกถึงรูปแบบการทรานซิชันของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพื้น (ground state) กับระดับกระตุ้น (excited state) การหาค่าดังกล่าวทำได้โดยเขียนความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_o}{E_d} - \frac{1}{E_o E_d} (hv)^2 \quad (5.1)$$

จากการทดลองสามารถหาค่าพารามิเตอร์  $E_o$  และ  $E_d$  ได้ ค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_o$ ) และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) จะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ  $-1(M_{-1})$  และ  $-3(M_{-3})$  จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของอิเล็กตรอนในอะตอมที่จะโพลาไรซ์ตามสนามสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้ามาในผลึก โดยบทบาทของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแบ่งเป็นสองช่วงความยาวคลื่นซึ่งอธิบายด้วยส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้นๆ จากผลการทดลองจึงทำให้ทราบว่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ยาวและมีพลังงานที่ต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน และจำนวนจินตภาพมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงที่สั้นและมีพลังงานที่สูงกว่าแถบกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการเพิ่มปริมาณของสังกะสีตามอัตราส่วนผสม  $x$  โดย  $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$  และ  $1.0$  กับกรณีฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$  และ  $CdS$  เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงด้วยการเติมธาตุสังกะสีในปริมาณที่แตกต่างกันและผลของการแอนนัลจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้

ในการศึกษาถึงสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำพบว่า สภาพการนำแสงเชิงซ้อนจะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสภาพการนำแสง ส่วนจริง

ของสภาพการนำเชิงแสงจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงที่สั้นและมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานและส่วนจริงของสภาพการนำเชิงแสงจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ยาวและมีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

### ประโยชน์ที่จะได้รับ

ในการสร้างอุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำขึ้นมาใช้งานนั้น ต้องอาศัยหลักการความรู้ที่ใช้ในการประดิษฐ์ บางครั้งผลการประดิษฐ์ที่ได้อาจไม่ตรงตามเป้าหมาย เช่น ผลิตฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติบางอย่างที่ต่ำกว่าที่วางแผนเอาไว้ทั้งที่จากข้อมูลในทฤษฎีได้ยืนยันในความเป็นไปได้แล้วก็ตาม ดังนั้นการศึกษาหาตัวแปรอย่างอื่นเพื่อระบุให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจัดว่าเป็นสิ่งที่ดี ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาทางด้านสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบางอย่างอาจไม่สามารถอธิบายถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในการศึกษาสารกึ่งตัวนำดังกล่าวแต่สามารถทำให้เข้าใจและหาคำตอบของปัญหาได้ในรูปแบบการศึกษาทางด้านแสง สรุปแล้วประโยชน์ของการทราบข้อมูลและสมบัติของสารกึ่งตัวนำหลากหลายด้านที่เกี่ยวข้องก็จะเป็นข้อได้เปรียบในการประหยัด ทรัพยากร ความคิด และ เวลา เพื่อใช้ในการสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ ที่เป็นประโยชน์

จากการศึกษาถึงเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทำให้ทราบว่า แรงดัน การควบคุมกระแสไฟฟ้า และเวลาจัดเป็นหัวใจที่สำคัญ จากการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีอื่นที่แตกต่างจากวิธีนี้เป็นไปได้ที่จะได้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีรูปแบบโครงสร้างของผลึกที่มีความแตกต่างได้เช่นกัน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของฟิล์มบางอาจทำได้โดยการเติมอะตอมสารอย่างอื่นลงไปแทนที่ หรืออาจใช้กระบวนการแอนนिलในการเปลี่ยนความเป็นระเบียบของอะตอมภายในโครงสร้างผลึก ซึ่งผลการทดลองในบทที่ 4 เป็นสิ่งที่สามารถยืนยันได้เป็นอย่างดี

ในการนำข้อมูลไปใช้พิจารณาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ในกรณีนำไปใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ยังไม่ได้รับการแอนนिल จัดเป็นตัวเลือกอันดับแรกเนื่องจากมีขนาดเกรนที่โตและมีช่องว่างแถบพลังงานที่น้อยที่สุด ซึ่งสิ่งที่บ่งบอกถึงลักษณะการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด กล่าวคือการที่เกรน โตจะช่วยลดการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรน และช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าต่ำหมายถึงระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำมีค่าน้อยทำให้การทรานซิชันของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำได้ดี แต่ถ้าใช้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ทำให้แสงผ่านไปได้ดี ฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ ZnS ก็เป็นตัวที่นำไปใช้งานได้ดีกว่าฟิล์มบางตัวอื่นๆ เพราะมีความใสกว่าฟิล์มเงื่อนไขอื่นๆและมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านที่มากที่สุดมีค่าดัชนีหักเหที่น้อยที่สุด จึงมีความสามารถในการส่งผ่านแสงได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้นำมาศึกษาทั้งหมดได้เกิดมีปัญหามากมายที่พบซึ่งส่งผลทำระยะเวลาการทำวิจัยนั้นเพิ่มขึ้นไป และได้รับรู้ถึงวิธีรับมือและแก้ไข ปัญหาเพื่อให้งานสำเร็จ ปัญหาที่พบเจอและแนวทางที่ชี้แก้ไขมีดังต่อไปนี้

1. ปัญหาเกิดจากการรั่วของระบบสุญญากาศดังนั้นต้องคอยหมั่นดูแลและเอาใจใส่ระบบสุญญากาศให้สมบูรณ์และสะอาดอยู่เสมอ
2. ขณะทำการระเหยสารในระบบสุญญากาศ ควรเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้ภาชนะระเหยสาร (boat) อย่างช้าๆ เพื่อให้ความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จะช่วยให้ข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ (defects) ในฟิล์มบางมีค่าน้อยที่สุด
3. ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต้องกระทำอย่างละเอียดรอบคอบ ควรศึกษาการทำงานของโปรแกรมให้ดี เนื่องจากในการจำลองแต่ละครั้งใช้เวลานาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

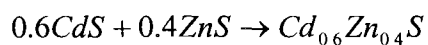


ภาคผนวก ก

การกำหนดสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณสารตั้งต้น



ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} 0.6\text{CdS} &= 0.6(112.5+32) \\ &= 86.7 \text{ กรัมต่อโมล} \\ &= 0.5[2(26.9815)+3(15.994)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.4\text{ZnS} &= 0.4(65+32) \\ &= 38.8 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S} &= 112.5(0.6)+65(0.4)+32 \\ &= 125.5 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ CdS หนัก 86.7 กรัมต่อโมล รวมกับ ZnS หนัก 38.8 กรัมต่อโมล จะได้  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  หนัก 125.5 กรัมต่อโมล ดังนั้นถ้าเราต้องการ  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  ที่มีน้ำหนัก 1 กรัม จะต้องใช้ CdS และ ZnS ดังนี้

$$\text{CdS} = \frac{86.7}{125.5} \text{ กรัม} = 0.690 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะ CdS เท่ากับ 0.690 กรัม

$$\text{ZnS} = \frac{38.8}{125.5} \text{ กรัม} = 0.309 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นจะใช้ ZnS เท่ากับ 0.309 กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS  
(The Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

Pattern : 49-1302		Radiation = 1.540598		Quality : High		
$(Cd_{0.8}Zn_{0.2})S$		2 $\theta$	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		24.836	69	1	0	0
		26.527	48	0	0	2
		28.204	100	1	0	1
		36.649	27	1	0	2
		43.738	45	1	1	0
		47.870	39	1	0	3
		50.926	6	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
		66.839	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] = 99.55 Dx = 4.505				
SAMPLE PREPARATION : Cd Cl <sub>2</sub> , Zn Cl <sub>2</sub> and thiourea were mixed in an alkaline solution, which was heated to 85 C and stirred for 30 minutes. The precipitate was filtered, dried, ground and heated at 300 C for 2 hours under nitrogen, then 800 C for 2 hours under nitrogen. UNIT CELL DATA : Reference reports: a=4.14, c=6.716. GENERAL COMMENTS : Cell parameters generated by least squares refinement.						

Pattern : 40-836		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
$Cd_{7/23}Zn_{2/27}S_{10}$		2 $\theta$	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
		48.602	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] = 93.21 Dx = 4.683				
COLOR : Yellow GENERAL COMMENTS : Pigment. SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C. GENERAL COMMENTS : 27.7 mole % ZnS. GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: a=4.131-0.00134 P; s=0.003, c=6.713-0.00458 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 24-1137		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
$Zn_{0.9}Cd_{0.1}S$		2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Sphalerite, cadmian, syn / Zinc Cadmium Sulfide		28.466	100	1	1	1
		32.952	10	2	0	0
		47.280	50	2	2	0
		56.103	30	3	1	1
		58.806	2	2	2	2
		69.115	5	4	0	0
		76.372	10	3	3	1
		78.690	2	4	2	0
		87.989	10	4	2	2
		94.855	6	5	1	1
		106.559	3	4	4	0
		113.900	5	5	3	1
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 102.14				
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 160.46				
a = 5.43400		Dx = 4.228				
Z = 4		V <sub>cor</sub> = 6.40				

Pattern : 40-835		Radiation = 1.540598		Quality : Not Indexed		
$Cd_{0.05}Zn_{1.95}S_{10}$		2 $\theta$	<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	36	1	0	3
		51.847	10	2	0	0
		55.404	3	0	0	4
		118.784	3	3	1	3
		146.514	3	3	0	6
		147.575	2	3	2	1
		156.350	3	3	1	5
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 1352.99				
S.G. : P63mc (185)		Volume [CD] = 94.94				
a = 4.06900		Dx = 4.733				
c = 6.62100		Z = 0				
<p>COLOR : Yellow  GENERAL COMMENTS : Pigment.  SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C.  GENERAL COMMENTS : 19.5 mole % ZnS.  GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: <math>a=4.131-0.001314 P</math>; <math>s=0.003</math>, <math>c=6.173-0.00458 P</math>; <math>s=0.004</math>, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.</p>						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 24-1136		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Zn <sub>0.9</sub> Cd <sub>0.1</sub> S		2th	l	h	k	l
Wurtzite, cadmian, 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
		56.066	45	1	1	2
		57.246	15	2	0	1
		58.683	1	0	0	4
		63.204	8	2	0	2
		65.651	1	1	0	4
		72.481	20	2	0	3
		75.586	8	2	1	0
		77.326	10	2	1	1
		78.613	2	1	1	4
		81.757	14	1	0	5
		82.524	6	2	1	2
		87.989	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 Dx = 4.223 I/lor = 2.90		GENERAL COMMENTS : (002) may be observed as the strongest reflection due to preferred orientation.		

Pattern : 3-1093		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Zn S		2th	l	h	k	l
Wurtzite / Zinc Sulfide		27.165	50	1	0	0
		28.587	70	0	0	2
		30.699	30	1	0	1
		47.835	100	1	1	0
		50.976	30			
		56.783	100	1	1	2
		72.675	10			
		76.809	30	2	1	0
		79.079	30			
		83.219	30			
		88.898	70			
		92.094	30			
		95.578	100	0	0	6
		99.401	30			
Lattice : Hexagonal S.G. : (0) a = 3.80000 c = 6.23000 Z = 2		Mol. weight = 97.44 Volume [CD] = 77.91 Dx = 4.154		DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS. SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Pribram.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 2-563		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Cd S		2 $\theta$	I	h	k	l
Greenockite / Cadmium Sulfide		25.064	80	1	0	0
		26.832	60	0	0	2
		28.587	100	1	0	1
		37.121	60	1	0	2
		43.917	90	1	1	0
		48.104	90	1	0	3
		52.230	80	1	1	2
		58.765	30	2	0	2
		66.763	60	2	0	3
		71.403	60	2	1	1
		72.675	30	1	1	4
		75.374	60	1	0	5
		80.678	40	3	0	0
		83.219	60	2	1	3
		86.907	40	0	0	6
		92.094	40	1	0	6
		96.811	30	2	2	0
		103.334	30	3	1	1
		108.024	30	2	0	6
		116.471	30	3	1	3
		141.872	20	3	2	1
Lattice : Hexagonal	Mol. weight = 144.47					
S.G. : P63mc (186)	Volume [CD] = 99.90					
a = 4.14200	Dx = 4.803					
c = 6.72400	Dm = 4.820					
Z = 2						
DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS 6-314. COLOR : Yellow, orange MELTING POINT : 780 OPTICAL DATA : B=2.506, Q=2.529, Sign=+ SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Bishoptown, Scotland, UK.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Lee, J.H.; Song, W.C., Yi, J.S., Yang, K.J., Han, W.D. and Hwang, J. Growth and Properties of The  $Cd_{1-x}Zn_xS$  thin films for solar cells applications. **Thin Solid Films**. 431-432:349-353. 2003.
- [2] Adachi S. **Properties of Semiconductor Alloys Group-IV, III-V and II-VI Semiconductor**. John Wiley & Son, Inc. 2009.
- [3] Swanepoel, R. Determination on the Thickness and Optical Properties of Amorphous Silicon, **J. Phys. E:Sci. Instrum.**, 16: 1214-1222. 1983.
- [4] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [5] นัฐกร แดงสุวรรณ. การศึกษาสมบัติบางประการของฟิล์มบาง  $CdS : Bi$ , โครงการพิเศษภาควิทยาศาสตร์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [6] เมธิรา ร่วมสุข. สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  ที่เจือด้วย  $Na$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์ประยุกต์บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [7] Wemple, S.H. and DiDomenico, M. Behavior of the Electronic Dielectric Constant in Covalent and Ionic Materials, **Phys. Rev. B**. 3(4): 1338-1351. 1971.
- [8] Wemple, S.H. Refractive Index Behavior of Amorphous Semiconductors and Glasses, **Phys. Rev. B**. 7(8):3767-3777. 1973.
- [9] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**, 8<sup>th</sup> ed. United States of America: John Wiley & Son, Inc. 2005.
- [10] Jackson, J.D. **Classical Electrodynamics**, John Wiley & Son, Inc. 1999.
- [11] David J. Griffiths. **Introduction to Electrodynamics**, 3<sup>rd</sup> ed. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 1999.
- [12] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CdO$  ที่เจือด้วยอะตอม  $Al$  สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ศันสนีย์ เหลืองอ่อน. อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, โครงการพิเศษภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2552.
- [14] Cullity, B.D. *Elements of X-rays Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company Inc.pp.9-14. 1956.
- [15] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2546.
- [16] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประยุกต์เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2551.
- [17] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2547.
- [18] งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ, “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  โดยวิธีซีลีโนเซชันเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2555.
- [19] Ates A., Yildirim M. and Gunrbulak. “Absorption Measurement and Urbach’s rule in InSe and InSe:Ho<sub>0.0025</sub> single crystals” *Optical Materials*. vol. 28. pp. 225-242. 2006.
- [20] Bilgin V.,Kose S., Atay F. and Akyuz I. “The Effect of Substrate Temperature on The Structural and some Physical Properties of Ultrasonically Sprayed CdS films” *Materials Chemistry and Physics*. vol. 94. pp. 103-108.2005.
- [21] Iribarren A., Castro-Rodriguez R., Caballero-Briones F. and Pena J.L. “Optical and Structural Evidence of The Grain-boundary Influence on The Disorder of Polycrystalline CdTe films” *Applied Physics Letters*. vol. 74.No20. pp. 2957-2959. 1999.
- [22] อุดลย์ หาญวังม่วง. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยในระยะประชิด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2550.

- [23] Ohring, M. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure**. 2<sup>nd</sup> ed. Sandiego,CA:Academic Press:pp.58-69,71,97-101,106-109,118-121.2002.
- [24] McGuire,G.E. **Semiconductor Materials and Process Technology Handbook**. Park Ridge,NJ:Noyes:pp.340-343,349. 1988.
- [25] Harris,N.S. **Modern Vacuum Practice**. London:McGraw-Hill.:pp.71-73, 76-77, 114, 118-120. 1989.
- [26] ชัยวิทย์ ศิวาวัชชาไนย. **ฟิสิกส์และเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น):หน้า 9-15, 25-26. 2526.
- [27] นันธิดา เหลืองศิริ, ประภาพิมพ์ เพชรน้อย และณัฐพล แสงส่งไพศาล. **การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยการอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟ**, โครงการพิเศษภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2550.
- [28] อัญฐพร อริยฤทธิ. **การศึกษาสมบัติรอยต่ออิมพัลชัน  $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/ CuAlO_2$** , โครงการพิเศษภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2552.
- [29] H.Mahfoz Kotb, M.A. Dabban, A.Y. Abdel-latif, M.M. Hafiz. **Annealing Temperature Dependence of The Optical and Structural Properties of Selenium-rich CdSe Thin Films**, *J. Alloys Compd.* 512:115-120.2012.
- [30] Lee, J.H., Yi, J.S., Yang, K. J, Park, J.H. and Oh, R.D. **Electrical and Optical Properties of Boron Doped CdS Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition**, *Thin Solid Films*, 451-452:170-174.2003.
- [31] T.S. Moss, **Photoconductivity in the Elements**, Academic Press Inc., New York, 1952.
- [32] N.M. Ravindra\*, Preethi Ganapathy, Jinsoo Choi. **Energy gap-refractive Index relations in Semiconductors-An overview**, *Infrared. Phys. Technol.* 50:21-29.2007.
- [33] R.R. Raddy, Y. Nazeer Ahammed. **A study on The Moss Relation**. *Infrared. Phys. Technol.* 36:825-830.1995.
- [34] Chen, P., Nicholls, J.E., O'Neill, M., Hogg, J.H.C., Lunn, B., Ashenford, D.E., Fay, M. and Cullis, A.G. **The Refractive Indices of  $Zn_{1-x}Cd_xS$  Alloys**, *Semicond. Sci. Technol.* 13: 1439-1441.1998.
- [35] Salem, A.M. **Structure, Refractive Index Dispersion and the Optical Absorption Edge of Chemically Deposited  $Zn_xCd_{1-x}S$  Thin Films**, *Appl. Phys. A.* 74: 205-211.2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] Rafea, M.A., Farag, A.A.M. and Roushdy, N. Structural and Optical Characteristics of Nano-Sized Structure of  $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$  Thin Films, **J.Alloys Compd.** 485:660-666. 2009.
- [37] Kumar, P., Kumar, A., Dixit, P.N. and Sharma, T.P. Study of Optical Constants in  $Cd_xZn_{1-x}S$  Vacuum Evaporated Thin Films, **Indian J. Eng. Mater.Sci.** 14:313-316. 2007.
- [38] Idican, S., Caglar, Y., Carlar, M. and Yakuphanoglu, F. The Effects of Substrate Temperature on Refractive Index Dispersion and Optical Constants of  $CdZn(S_{0.8}Se_{0.2})_2$  Alloy Thin Films, **J. Alloys Compd.** 480: 234-237.2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายวุฒิ สารรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	27 พฤศจิกายน 2528
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลมหาสารคาม
ที่อยู่ปัจจุบัน	283 หมู่ 24 ต.หัวขวาง อ.โกสุมพิสัย จ.มหาสารคาม 44140
การศึกษา	2546 โรงเรียน โกสุมวิทยาสรรค์ 2552 ปริญญาตรี ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้