

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน

COMPARATIVE STUDIES OF PROPERTIES OF $Cd_{1-x}Zn_xS$ THIN FILMS
PREPARED BY DIFFERENT TECHNIQUES

ฐิติกร จรรยาธรรม
THITIKORN CHANYATHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน

COMPARATIVE STUDIES OF PROPERTIES OF $Cd_{1-x}Zn_xS$ THIN FILMS
PREPARED BY DIFFERENT TECHNIQUES



ฐิติกร จรรยาธรรม

THITIKORN CHANYATHAM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 69061
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.พ. 2550

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**COMPARATIVE STUDIES OF PROPERTIES OF $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ THIN FILMS
PREPARED BY DIFFERENT TECHNIQUES**

THITIKORN CHANYATHAM

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

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน
Comparative Studies of Properties of $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films Prepared by
Different Techniques

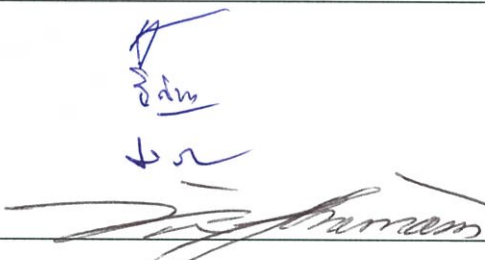
ชื่อนักศึกษา นายฐิติกร จรรยาธรรม

รหัสประจำตัว 45061306

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ปรีชา	ยุพาพิน	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 26 ธันวาคม 2549 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒๒.....เดือน.....ธันวาคม.....พ.ศ. ๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน
นักศึกษา	นายฐิติกร จรรยาธรรม
รหัสประจำตัว	45061306
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสองกลุ่มโดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน กลุ่มแรกเป็นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี กลุ่มที่สองเป็นฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% ที่เจือด้วยโบรอน และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ากรณีของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อสัดส่วนโมลของ ZnS ต่ำกว่า 0.9 โครงสร้างผลึกที่ได้จะเป็นแบบเฮกซะโกนัลเวิร์ทไซท์ แต่เมื่อ $x > 0.9$ โครงสร้างผลึกที่ได้จะเป็นแบบคิวบิกซิงค์เบลนด์ ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นทั้งสองกรณี จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของโครงสร้างผลึกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนัล และพบว่าขนาดของเกรน โตขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสง ความหนาของฟิล์มบาง ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงของฟิล์มบางคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วน Zn ที่เพิ่มขึ้น ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนัล $300^\circ C$ ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัล ทำการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีเกิดแถบการเปล่งแสงสีเขียวและสีแดงซึ่งแถบสีเขียวและสีแดงนี้อาจจะเกิดจากข้อบกพร่องชนิด V_S และสถานะผิวของเกรน ตามลำดับ

Thesis	Comparative Studies of Properties of $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films Prepared by Different Techniques
Student	Mr. Thitikorn Chanyatham
Student ID	45061306
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Thitinai Gaewdang

ABSTRACT

In this thesis, $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films were deposited on glass substrates by different techniques. The first group, $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films were prepared by thermal evaporation from CdS and ZnS compounds purity of 99.999% and from colloid of chemical bath process. The other group is the $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ thin films which prepared by chemical bath deposition and deposited by thermal evaporation from CdS and ZnS compounds purity of 99.999% with boron dopant and from colloid of chemical bath process. When the ZnS mole ratio was less than 0.9, the crystal structure $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films was hexagonal wurtzite. However, for $x > 0.9$ the $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films were grown with cubic zincblende structure. Conversely, any change of crystal structure in thermal evaporated $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ thin films by using different precursors was not observed. Optical band gap values, thin films thickness, refractive index and extinction coefficient have been evaluated from transmission spectra. Electrical sheet resistance at room temperature of $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films increased as a function of Zn concentration. The sheet resistance of $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ thin films prepared by thermal evaporation using different precursors showed the minimum value at annealing temperature $300^{\circ}C$ while the films prepared by chemical bath deposition increased with increasing annealing temperature. The photoluminescence spectra of $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ thin films prepared by chemical bath deposition showed green and red band emission bands when excited by UV 365 nm at low temperature. Green and red emission bands probably originate from V_s and surface state of the grains respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและ อุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดี ตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยुทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ภาควิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง ยูวี วิซิเบิลแบบดับเบิล บีมสเปกโตรมิเตอร์ ในย่านความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต-ตามองเห็น-อินฟราเรด (UV-VIS-NIR spectrometer Shimadzu 3101PC) ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุมารใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ จัดสรรงบประมาณของภาควิชา เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยูพาพิน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง อิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์ และเครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ คุณอภิรัตน์ มีมุขอ วิศวกร บริษัทไมโครชิพเทคโนโลยี ประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง FESEM

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิริทธิเชตรกรณ์ คุณประธาน ประจวบโชค นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณวีรชัย ลิภา คุณสุกฤษฎี เกิดแสง คุณอุปลัมภ์ นาครักษ์ อาจารย์รัฐพร พรหมรส คุณน้ำทิพย์ พนมไทย ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติทุกท่าน ที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์เสมอมา

จิตติกร จรรยาธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก.....	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ.....	5
2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก.....	8
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ.....	9
2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	10
2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์.....	11
2.1.4 ซ็อกพร่องผลึก.....	13
2.1.4.1 ซ็อกพร่องผลึกแบบจุด.....	13
2.1.4.2 ซ็อกพร่องผลึกเชิงเส้น.....	14
2.1.4.3 ซ็อกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ.....	15
2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	16
2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	20
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	20
2.2.2 การเกิดสีของผลึก.....	22
2.2.3 การส่งผ่านแสง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 การดูคลื่นแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	24
2.2.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	25
2.2.6 การหาความหนาของฟิล์มบาง โดยสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	27
2.2.6.1 ช่วงโปร่งแสง.....	30
2.2.6.2 ช่วงการดูดกลืนแสงต่ำ-ปานกลาง.....	31
2.2.6.3 ช่วงการดูดกลืนแสงสูง.....	32
2.2.6.4 การหาความหนาของฟิล์มบางจากรีฟlection.....	32
2.3 โฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	33
2.3.1 ปรัชญาการณโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	33
2.3.2 กลไกการเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์.....	37
2.3.3 หลักการติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	42
2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	43
2.4.1 สภาพนำไฟฟ้า.....	43
2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	44
2.4.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง.....	44
2.4.2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....	45
2.4.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น.....	47
2.4.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ.....	48
2.5 การเตรียมฟิล์มบาง.....	50
2.5.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	50
2.5.1.1 อัตราการระเหยสาร.....	50
2.5.1.2 ความดันไอของธาตุ.....	51
2.5.1.3 การระเหยสารประกอบ.....	52
2.5.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธี การระเหยสาร.....	53
2.5.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_xZn_{1-x}S$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี.....	55
2.5.2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา.....	55
2.5.2.1.1 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ CdS	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ ZnS	57
2.5.2.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์	58
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	59
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	59
3.1.1 การทำความสะอาดกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ	59
3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี	60
3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	60
3.1.4 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	61
3.1.5 การวัดการส่องผ่านทางแสง	61
3.1.6 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์	61
3.1.6 การวัดความต้านทานแผ่น	61
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ	62
3.2.1 การเตรียมกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ	62
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ด้วยวิธีการระเหยสาร ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	62
3.2.2.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	62
3.2.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$	64
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี	65
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง	67
3.4 การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ	68
3.5 การวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	70
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	71
4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมได้	71
4.1.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2	ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี	71
4.1.3	ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%.....	72
4.1.4	ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี.....	72
4.1.5	ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี.....	73
4.2	ผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าของรังสีเอกซ์.....	74
4.3	ผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	81
4.4	ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง	83
4.5	ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง	104
4.6	ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาพลังงานกระตุ้น	110
4.7	ผลการวิเคราะห์โฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มบาง	113
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ		117
เอกสารอ้างอิง		122
ภาคผนวก ก.		126
ภาคผนวก ข.		131
ภาคผนวก ค.		137
ประวัติผู้เขียน		140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงเลตทิซพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ.....	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของคชนิมิตเลอร์และจุดตัดแกนผลึก.....	9
2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ.....	53
3.1 แสดงอัตราส่วนผสมปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1g) กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%.....	63
4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM, ขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนیل.....	75
4.2 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM และขนาดของเกรนที่คำนวณมาจากกราฟ XRD ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	78
4.3 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM และขนาดของเกรนที่คำนวณมาจากกราฟ XRD ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	80
4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในที่กรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิล.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیل.....90
4.6	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیلและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที97
4.7	แสดงค่าความหนาที่ได้จากการคำนวณจากรีฟการแทรกสอดของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....99
4.8	แสดงค่าความหนาที่ได้จากการคำนวณจากรีฟการแทรกสอดของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%99
4.9	แสดงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที..... 100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10	
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH	104
4.11	
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH.....	107
4.12	
แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH.....	107
4.13	
แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล	110
4.14	
แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จากการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล.....	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15	
แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดย	
วิธีการอบสารละลายเคมี และเตรียม โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน	
ในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์	
99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้จาก	
การอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیلและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C	
ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	
	112

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ 5
2.2	การบอกระนาบต่างๆของผลึก 8
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์..... 10
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ 11
2.5	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์ 12
2.6	แสดงข้อบกพร่องผลึก 14
2.7	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโลเชชันแบบขอบ 14
2.8	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโลเชชันแบบสกรู..... 15
2.9	แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน 15
2.10	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ 16
2.11	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD 17
2.12	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ 18
2.13	แสดงค่าคงที่ของ โครงผลึก(a_{SS}) เทียบกับอัตราส่วนผสมทางเคมี(x) ที่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ตาม Vegard's Law..... 19
2.14	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรีนซิก..... 20
2.15	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$) 21
2.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$) 22
2.17	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง..... 23
2.18	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน แสงกับพลังงาน โฟตอน 26
2.19	แสดงภาพจำลองการตกกระทบบนของแสงลงบนฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นรองรับ โปร่งแสง.. 27
2.20	แสดงรีวิวกการแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบ บนแผ่นรองรับ โปร่งแสง 28
2.21	แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์.. 33
2.22	แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงและไม่เปล่งแสง 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน 36
2.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เปล่งออกมากับความยาวคลื่น 36
2.25	แผนภาพแสดงการเปล่งแสงในระดับพลังงานของสารเจือที่มีระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า 37
2.26	แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเปล่งแสงของพาหะอิสระระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์ 37
2.27	การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ และการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้และโฮลอิสระ 38
2.28	แผนภาพแสดงเอ็กซิตรอนชนิดที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ 40
2.29	แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเอ็กซิตรอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคู่ออมบ์ของ GaP:S 40
2.30	แผนภาพแสดงการเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคู่ของอะตอมผู้ให้และผู้รับ 41
2.31	การติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์พื้นฐาน 42
2.32	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง 44
2.33	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น 45
2.34	แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น 46
2.35	แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d 47
2.36	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น 48
2.37	กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว 51
2.38	กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว 52
2.39	แสดงรูปแบบการระเหยของสาร 54
2.40	แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง 56
2.41	แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส 56
2.42	แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส 56
2.43	แสดงการเกิดฟิล์ม ZnS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส 57
2.44	แสดงการเกิดฟิล์ม ZnS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงระบบเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	65
3.2 แสดงการเตรียมฟิล์มบางในอ่างอาบสารละลายเคมีที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ ..	66
3.3 แสดงระบบเตาแอนนีสในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์	67
3.4 แสดงวิธีติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ	68
3.5 แสดงสเปกตรัมของหลอดไอปรอทความดันสูงที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นการเกิด โฟโตลูมิเนสเซนซ์	69
3.6 แสดงสเปกตรัมของหลอดไอปรอทความดันสูงที่ผ่านฟิลเตอร์ 365 นาโนเมตร	69
3.7 การจับคู่กราฟวัดความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ	70
3.8 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการ อาบสารละลายเคมี เมื่อไม่ผ่านการแอนนีส	70
4.1 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็น ผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส	71
4.2 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็น ผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส	72
4.3 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(30\%) B$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผลึกผง ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศ ของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	72
4.4 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(30\%) B$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ได้จากการตกผลึก ในสารละลายโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน บริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	73
4.5 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:(30\%) B$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่ อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.6	<p>แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل</p> <p>ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%.....</p>	74
4.7	<p>กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ กับ $a_0, c_0(\text{\AA})$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิล</p>	76
4.8	<p>แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ</p> <p>ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนิล.....</p>	76
4.9	<p>กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ กับ $a_0, c_0(\text{\AA})$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนิล</p>	77
4.10	<p>แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....</p>	78
4.11	<p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับอุณหภูมิแอนนิลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ</p> <p>ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....</p>	79
4.12	<p>แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....</p>	79

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....	80
4.14 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมีทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	81
4.15 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ $x = 0.2$ ถึง $x=0.8$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนัล ที่ถ่ายโดย FESEM กำลังขยาย 100,000 เท่า	82
4.16 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล.....	83
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	84
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล	85
4.19 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนัล	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	กราฟระหว่าง α กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อแสดงว่า มี E_g มากกว่า 1 ค่า.....87
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อการหาค่า E_g88
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อการหาค่า E_g89
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ กับอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส.....90
4.24	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....91
4.25	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา30 นาที.....92
4.26	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ100-500°Cภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนیلและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....94
- 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....95
- 4.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที.....96
- 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนิลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที97
- 4.31 แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อแอนนิลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	แสดงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที 100
4.33	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร 101
4.34	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร 102
4.35	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความยาวคลื่นต่างๆ 102
4.36	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความยาวคลื่นต่างๆ..... 103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล ฟิล์มไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH... 105	
4.38 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล ฟิล์มไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH... 105	
4.39 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสลและเมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH..... 108	
4.40 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสลและเมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH..... 108	
4.41 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสลและเมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH..... 109	
4.42 แผนภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ซึ่งเป็นกึ่งตัวนำออสโตรอน โดยที่ ϕ_b คือความสูงของกำแพงศักย์ และ x คือระยะทาง 111	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ค่าต่างๆของ Zn ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%.....	113
4.44 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ค่าต่างๆของ Zn ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี	113
4.45 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	114
4.46 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	115
4.47 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 10 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	116
4.48 แสดงแผนภาพการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นสเปกตรัมสีเขียว (G) สีเหลือง (Y) และ สีแดง (R).....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

จากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันในปัจจุบัน พลังงานทดแทนเป็นสิ่งจำเป็นเร่งด่วนที่ทั้งภาครัฐและเอกชนกำลังค้นคว้าและวิจัย เช่น รถยนต์ไฮบริดจ์ การใช้ก๊าซธรรมชาติในภาคการขนส่งต่างๆ เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ก็เป็นแหล่งพลังงานทดแทนอีกชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect)

หลักการง่ายๆของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ เมื่อมีแสงตกกระทบบนรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกก้อนหรือเป็นแท่งหรือเป็นแผ่นบาง จะมีการดูดกลืนพลังงานเพื่อทำให้เกิดพาหะอิสระคือ อิเล็กตรอนและโฮล เนื่องจากพาหะที่เกิดขึ้นมีประจุตรงข้ามกันจึงต้องแยกพาหะดังกล่าวด้วยสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและสะสมประจุดังกล่าวไว้ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง ซึ่งขั้วทั้งสองนี้สามารถนำไปต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าใช้งานได้ เซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ในการทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ การดูดกลืนแสงของชั้นต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณพาหะที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำและลักษณะของรอยต่อโอห์มิก เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว(single crystal solar cells) ซึ่งกระบวนการในการผลิตซับซ้อน ต้องใช้อุณหภูมิในการผลิตสูง ต้นทุนการผลิตจึงสูง ประสิทธิภาพอยู่ที่ 15-24% ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่งคือเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางผลึกพหุพันธ์(polycrystalline thin films solar cells) ที่มีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า แต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังด้อยกว่าแบบผลึกเดี่ยว แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางผลึกพหุพันธ์ให้สูงขึ้นใกล้เคียงกับแบบผลึกเดี่ยวโดยการสร้างเป็นรอยต่อวิวิธพันธ์(heterojunction) นอกจากนี้ข้อเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางผลึกพหุพันธ์อีกประการหนึ่งก็คือ มีวิธีการเตรียมได้หลายวิธี สามารถเตรียมฟิล์มบนฐานรองรับได้หลากหลายกว่า (เช่น โพลีเมอร์ สเตนเลส หรือกระจก)

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะเป็นรอยต่อได้ทั้งแบบรอยต่อเอกพันธ์(homojunction) และรอยต่อวิวิธพันธ์(heterojunction) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น แต่ที่น่าสนใจคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์(heterojunction) ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรต์(chalcopyrite structure) เช่น $Cu(In,Ga)Se_2$ จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง(absorber) และมี CdS ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น จะทำหน้าที่เป็นชั้น

บัพเฟอร์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีส่วนประกอบเป็นชั้นๆ ดังนี้คือ $MgF_2/ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se_2/Mo/Sodalime\ glass$ ซึ่งประสิทธิภาพสูงถึง 19.3 % [1] และเนื่องจากในชั้นบัพเฟอร์คือ CdS ซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงานเทียบเท่าความยาวคลื่น 516 nm ส่วน ZnS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.6 eV ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่น 345 nm ดังนั้นถ้าเลือกใช้สารประกอบ $Cd_{1-x}Zn_xS$ แทน CdS จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ดีขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีการระเหยสารในสุญญากาศ วิธีสปัตเตอร์ วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส และวิธีการอบสารละลายเคมี เป็นต้น

ฟิล์มบาง CdZnS สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ดีและมีปริมาณ Cd น้อยลง เป็นสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมจะมาทดแทน CdS ในชั้นบัพเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สัดส่วน $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ มีการดูดกลืนแสงได้ดีเพราะมีเกรนขนาดใหญ่ ผิวหน้ามีลักษณะคล้ายปริมาตรฐานสี่เหลี่ยม ความสูงจากฐานถึงยอดมีค่าสูงสุด[2] และมีรายงานว่า CdS เมื่อเจือด้วยโบรอนทำให้ความต้านทานของฟิล์มบางลดลง[3] ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะเจือโบรอนในฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ ซึ่งยังไม่มีการรายงานมาก่อน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และวิธีการอบสารละลายเคมี เพื่อนำไปพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางผลึกพหุพันธ์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% ที่เจือด้วยโบรอนและจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางโดยเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM 6400
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.4 ศึกษาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยเทคนิคต่างกัน

- 1.2.5 ศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยเทคนิคต่างกันการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 365 nm

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% ที่เจือด้วยโบรอน และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
- 1.3.2 นำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางโดยเครื่อง SEM
- 1.3.3 นำฟิล์มที่ได้ไปวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 1.3.4 นำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาค่าความต้านทานแผ่นโดยอาศัยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์
- 1.3.5 นำฟิล์มที่ได้ไปวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์อุณหภูมิต่ำที่กระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร โดยอาศัยการประยุกต์ใช้เครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5301PC ยี่ห้อ Shimadzu

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และวิธีการอบสารละลายเคมี จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดี
- 1.4.2 ทำให้ทราบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของ Zn และ อุณหภูมิแอนนัลที่มีต่อค่าช่องว่างแถบพลังงาน ลักษณะเกรนผลึกและค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$

- 1.4.4 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิแอนนیلที่มีต่อสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ เมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตความเข้มสูง
- 1.4.5 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของ Zn ที่มีต่อสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และอิทธิพลของโบรอนที่มีต่อฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ เมื่อกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตความเข้มสูง
- 1.4.6 ทำให้ได้ความรู้ทางด้านการเตรียมและสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานบางประการของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2

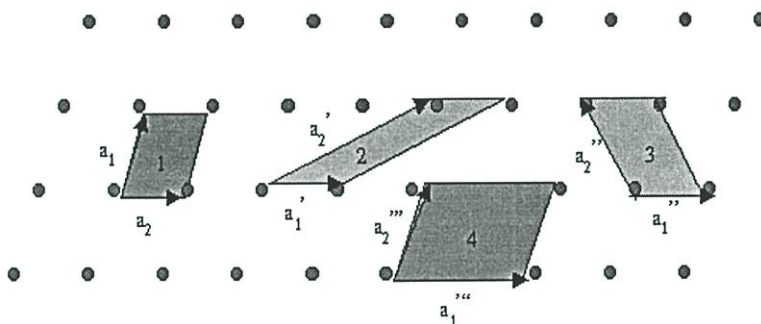
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ สสารที่เป็นผลึก (crystalline materials) และสสารที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงสสารที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [4-10]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูงตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของ โครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



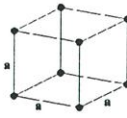
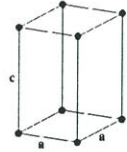
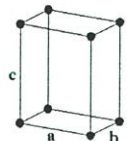
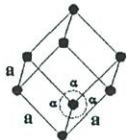
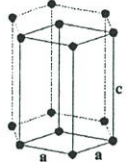
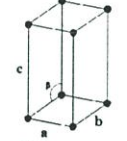
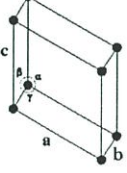
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่โครงผลึก	มุม
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60° (60° rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มี ข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a}, \vec{b} และ \vec{c} และ มุม α, β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบโครงผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก(triclinic) โมโนคลินิก(monoclinic) ออร์โธโรมบิก(orthorhombic) เตตระโกนอล(tetragonal) คิวบิก(cubic) รอมโบฮีดรอล(rhombohedral) และเฮกซะโกนัล(hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก(system)	ค่าคงที่โครงผลึกและมุมที่อยู่ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรอล (rhombohedral)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของผลึก [4-10]

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

1. การระบุตำแหน่ง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น x,y,z (ให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นแต่ละค่า) ตัวอย่าง จุด 1,2,3 หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง

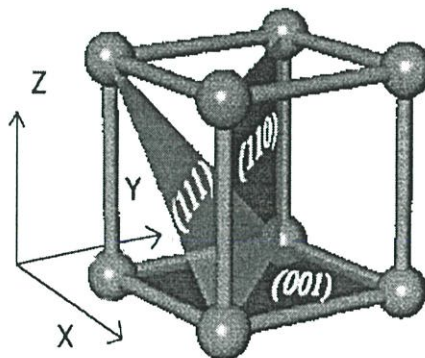
2. การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u\ v\ w]$ (ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า) ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{2}\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

3. การระบุระนาบ

จะใช้อักษร $(h\ k\ l)$ (ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่น)

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน $x\ y\ z$ ที่จุด $\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$ หรือ จุด $\infty, 1, \infty$ นั้นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงไม่ตัดกับแกนนั้น) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

- สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hkil) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ระนาบ(110) จะเรียกว่า ($11\bar{2}0$) ในระบบเฮกซะโกนัล

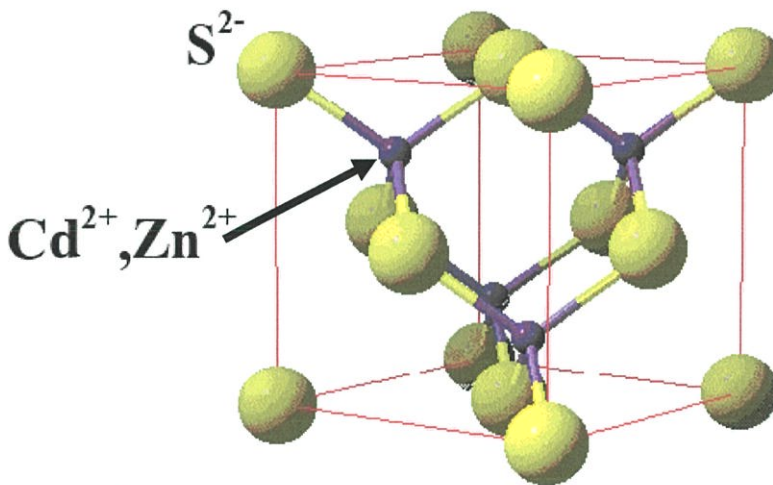
- เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีเหมือนกัน นั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ [4-10]

โครงสร้างแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆเรียกว่า โครงสร้างผลึก(crystal structure) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้คุณสมบัติต่างๆ ไม่เหมือนกัน เช่น สมบัติทางแสง ช่องว่างแถบพลังงาน สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure)

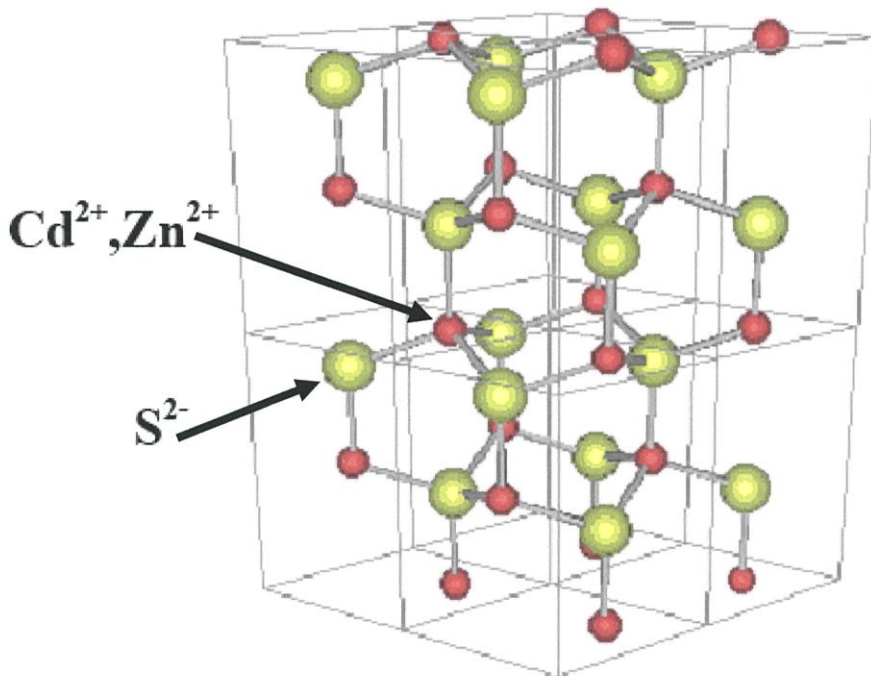
โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด หรือเรียกว่า เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเพชเชนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงผลึกหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิด แต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นใน ZnS อะตอมของ Zn จะอยู่ที่ตำแหน่ง $0\ 0\ 0$, $0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}$ และ $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$ ส่วนตำแหน่งของอะตอม S จะอยู่ที่ $\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}$, $\frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}$ และ $\frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}$ จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่า และมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรดังแสดงในรูปที่ 2.3 สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$

2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ท์(wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ท์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ อยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์จะมีแปดอะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ที่อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ท์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$

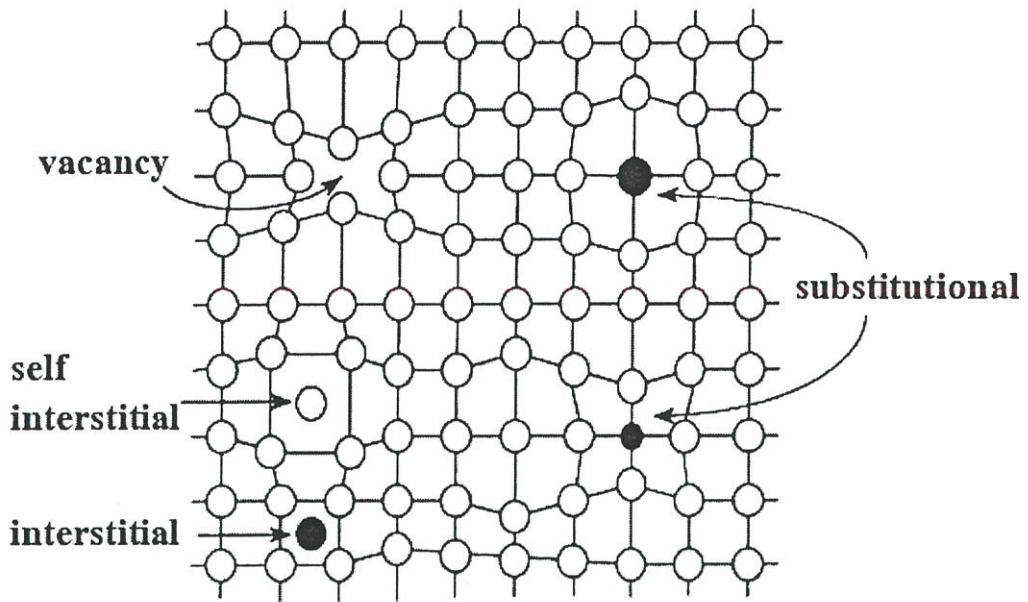
2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก [4-5,10]

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด โดยเฉพาะ โครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชัน (dislocation) และขอบเขตของเกรน (grain boundaries)

2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.6 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมใน โครงสร้างผลึก

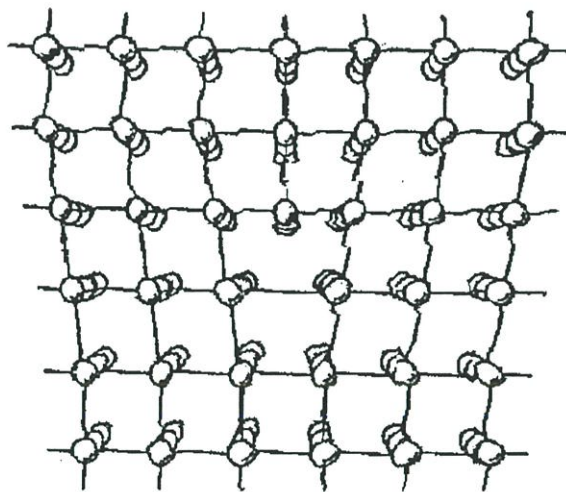
- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (Interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไป จากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ



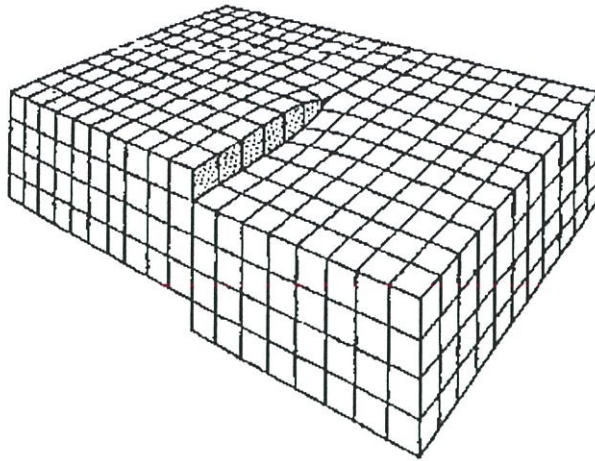
รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน(dislocations) เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบจุดของโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) ดังรูปที่ 2.7 และดิสโลเคชันแบบสกรู(screw dislocations) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ

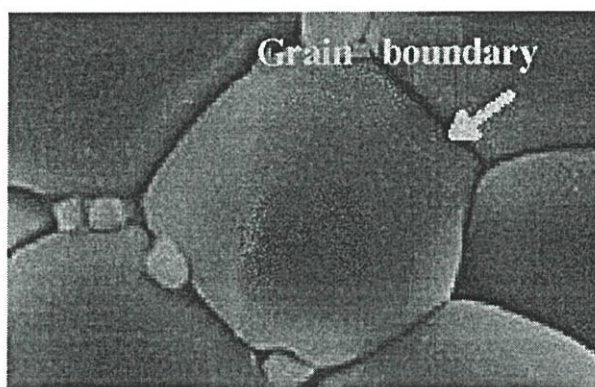


รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงระนาบผิวดำดับ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), และเกรนและขอบเขตของเกรน (grain and grain boundaries)

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนดังรูปที่ 2.9 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.9 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน

2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [4-10]

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

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

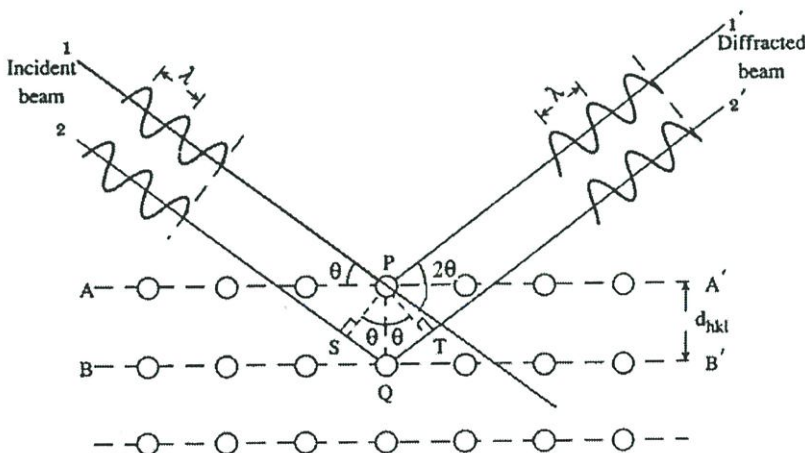
เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

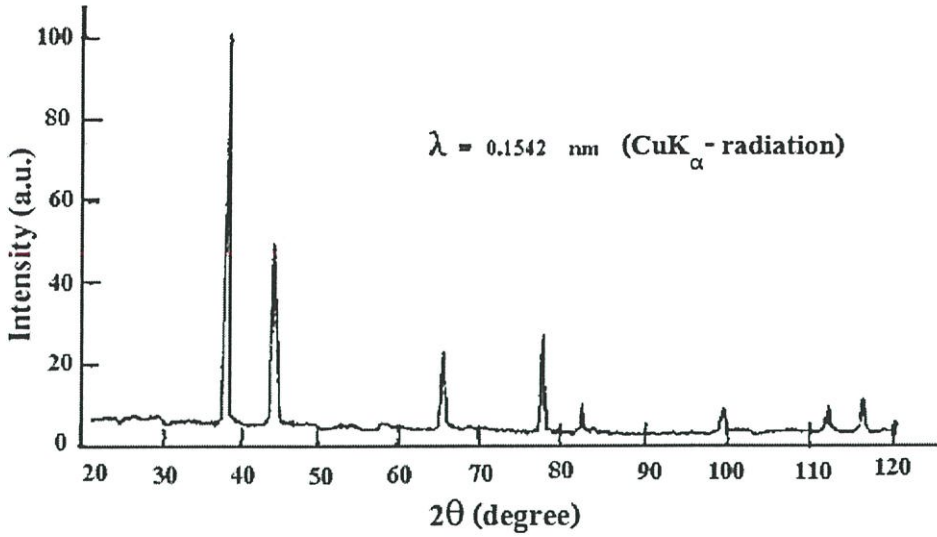
n คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนเท่ากับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

จากรูปที่ 2.11 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของ โครงผลึก(lattice constant) สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการที่ (2.3)

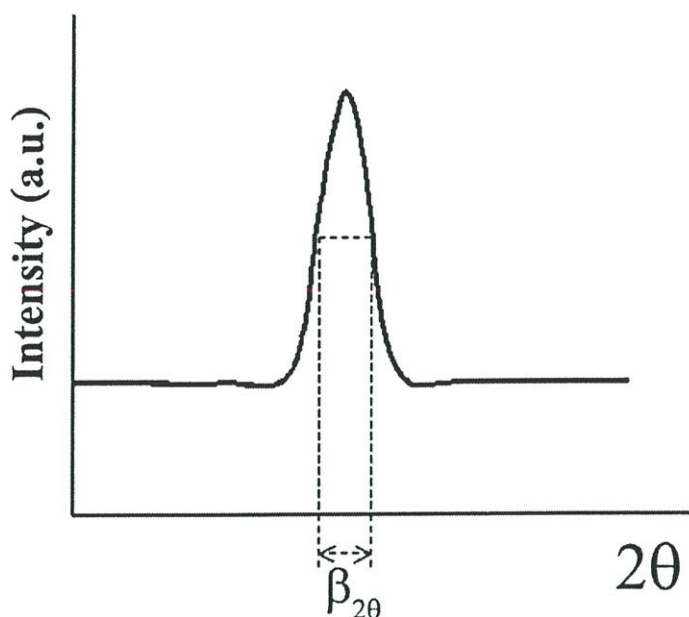
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \tag{2.3}$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \tag{2.4}$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ระนาบของผลึก



รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิจารณารูปที่ 2.12 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ

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

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

$\beta_{2\theta}$ คือ ระยะเวลาความกว้างของพีคที่ความเข้มมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

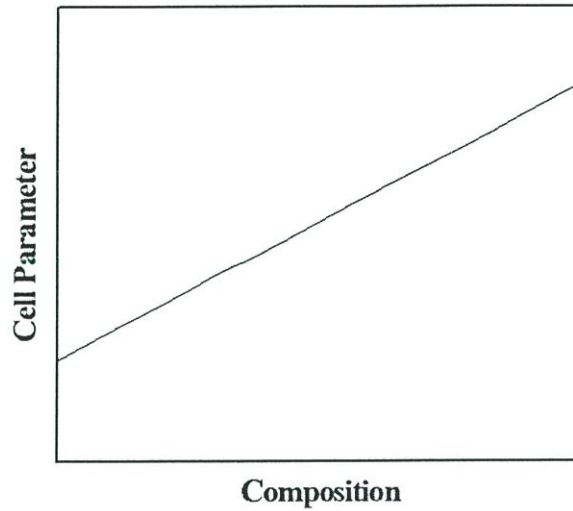
โดยทั่วไปค่าคงที่ของโครงสร้างของวัสดุที่มีอัตราส่วนผสม (x) คงที่จะมีค่าคงที่ แต่ถ้าวัสดุมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนผสมทางเคมี เช่น อัลลอยด์หรือสารละลายของแข็ง (solid solution) ค่าคงที่ของโครงสร้างจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งพบโดยเวการ์ด ในปี 1921 เรียกว่า “Vegard’s Law” กล่าวไว้ว่า ค่าคงที่ของโครงสร้างของสารละลายของแข็งสองเฟสที่มีโครงสร้างแบบเดียวกันจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าคงที่ของโครงสร้างของของแข็งที่อัตราส่วนผสมเริ่มต้นและสุดท้ายของสารละลายของแข็งนั้น ดังสมการ

$$x = \frac{a_{ss} - a_1}{a_2 - a_1} \quad (2.6)$$

เมื่อ a_1 และ a_2 คือ ค่าคงที่ของ โครงผลึกของเฟสเริ่มต้นและเฟสสุดท้าย

a_{ss} คือ ค่าคงที่ของ โครงผลึกของสารละลายของแข็ง

x คือ อัตราส่วนผสมของเฟสเริ่มต้นที่มีค่าคงที่ของ โครงผลึกเป็น a_2

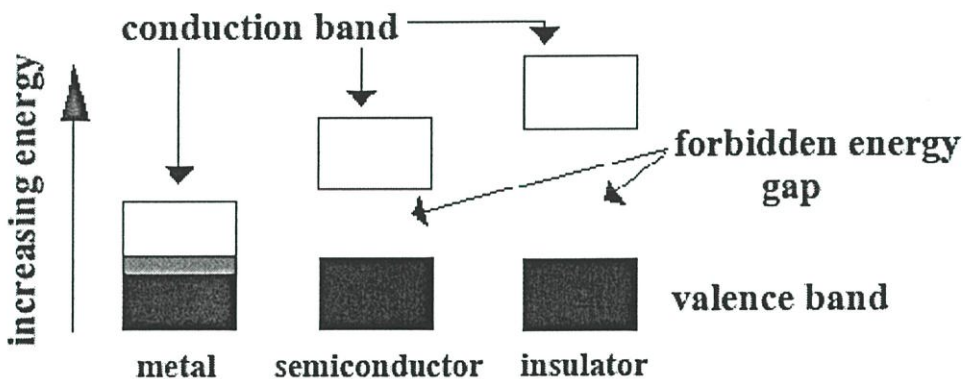


รูปที่ 2.13 แสดงค่าคงที่ของ โครงผลึก(a_{ss}) เทียบกับอัตราส่วนผสมทางเคมี(x) ที่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ตาม Vegard's Law

2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [4-5]

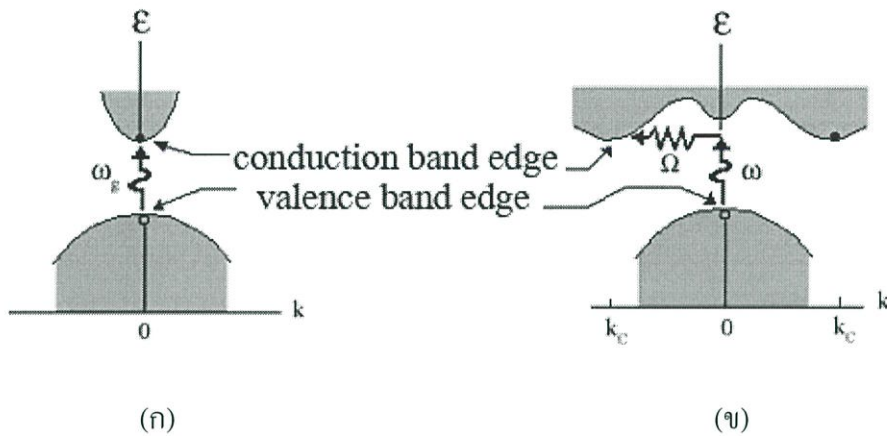
โดยทั่วไปการแบ่งกลุ่มของของแข็งจะใช้โครงสร้างแถบพลังงาน ในการแบ่งแยกชนิดของสารต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินสิก (intrinsic) ว่าเป็นฉนวน ตัวนำ หรือกึ่งตัวนำ ลักษณะของโครงสร้างพลังงานแบบง่ายแสดงดังรูปที่ 2.13 ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำ (conduction band) ในแถบวาเลนซ์สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาเคลวิน จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและมีแรงทางไฟฟ้าสถิตยึดเหนี่ยวอะตอมเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย ในส่วนของแถบนำซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำจะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลยและเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณต้องห้าม หรือแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) ซึ่งจะเรียกความกว้างของช่องว่างนั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g จะถูกนำมาใช้แบ่งแยกชนิดสารต่าง ๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3\text{eV}$ สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3\text{eV}$ และตัวนำไม่มีค่า E_g เพราะมีค่าแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการคุกคามมูลฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินสิก

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะคุกคามพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า

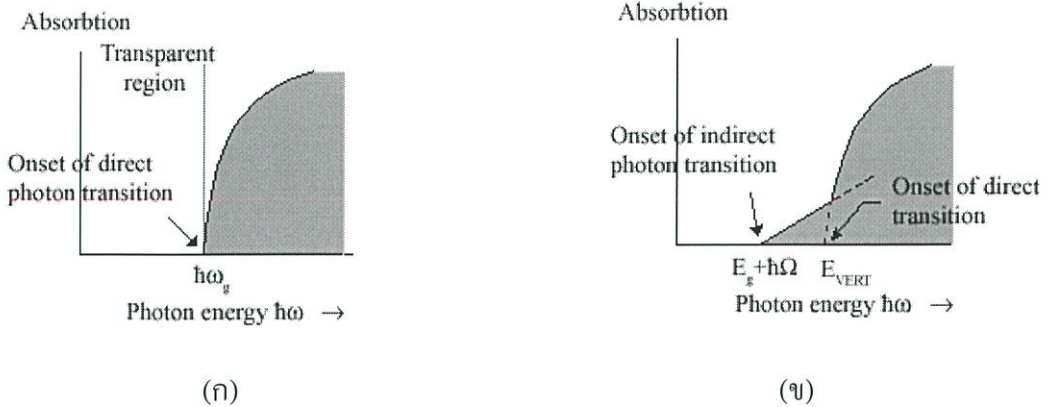
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.16(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังรูปที่ 2.16 (ข)



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)

(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

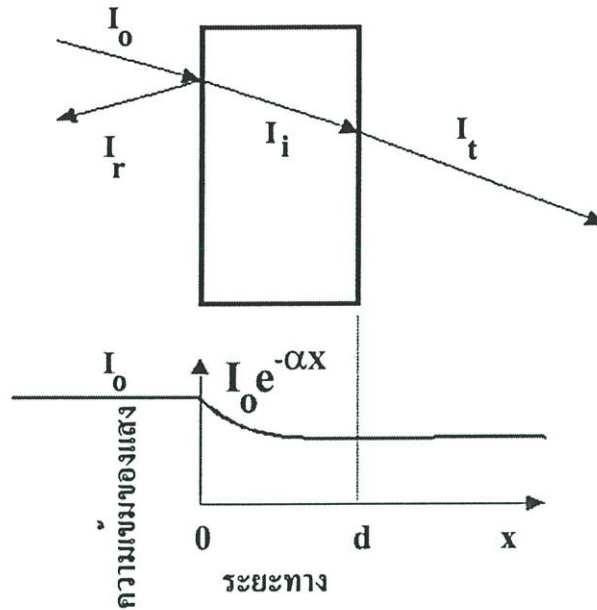
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.2.2 การเกิดสีของผลึก [4-5]

นอกจากนี้ค่าช่องว่างแถบพลังงานยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ของสารตลอดจนการเกิดสีของผลึกอีกด้วย การเกิดสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่พลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน ($h\omega \leq E_g$) ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmitted) ออกจากผลึกเราจึงเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdZnS จะมีสีเหลืองส้ม เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.7 eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงสีน้ำเงินหรือเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาหมดและเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับสีเหลืองส้ม จึงสังเกตเห็นผลึก CdZnS มีสีเหลืองส้มเป็นต้น

2.2.3 การส่งผ่านแสง [11-14]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบาง และถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.7)$$

หรือ
$$I_r = RI_0 \quad (2.8)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง

I_r คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง

I_t คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง

I_i คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง(transmittance)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(absorption coefficient)

d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.9)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.11)$$

2.2.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [11-14]

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมามีค่าดังรูปที่ 2.17 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.12)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.13)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - ik \quad (2.14)$$

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (2.15)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง

k คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

โดยที่ n และ k เป็นฟังก์ชันของ λ

2.2.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [5,11]

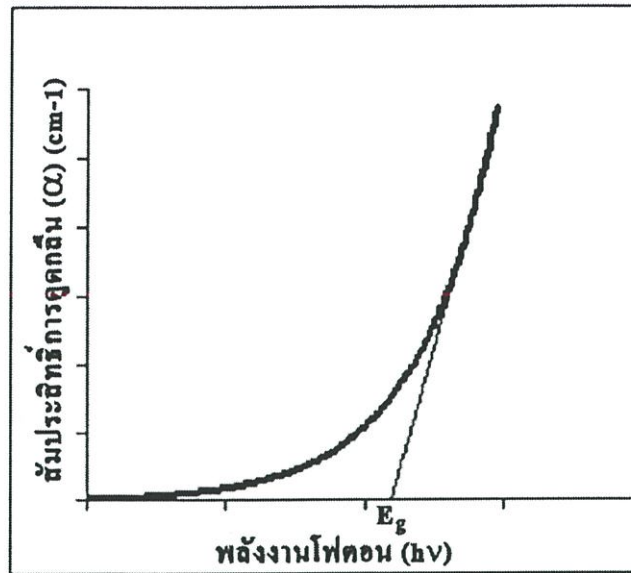
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.16 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.16)$$

ดังนั้น

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

กรณีสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง :

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.18)$$

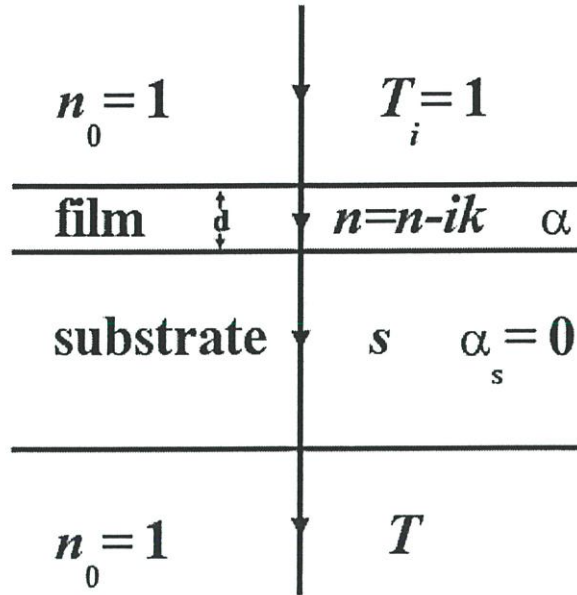
กรณีสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง :

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.19)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่

2.2.6 การหาความหนาของฟิล์มบางโดยสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [11,14-19]

นอกจากการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยการใช้อุปกรณ์ที่ใช้กันทั่วไปแล้ว การหาความหนาของฟิล์มบางโดยใช้วิธีการแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถบอกความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับที่โปร่งแสงได้โดยไม่ต้องมีการสัมผัสกับผิวหน้าฟิล์ม

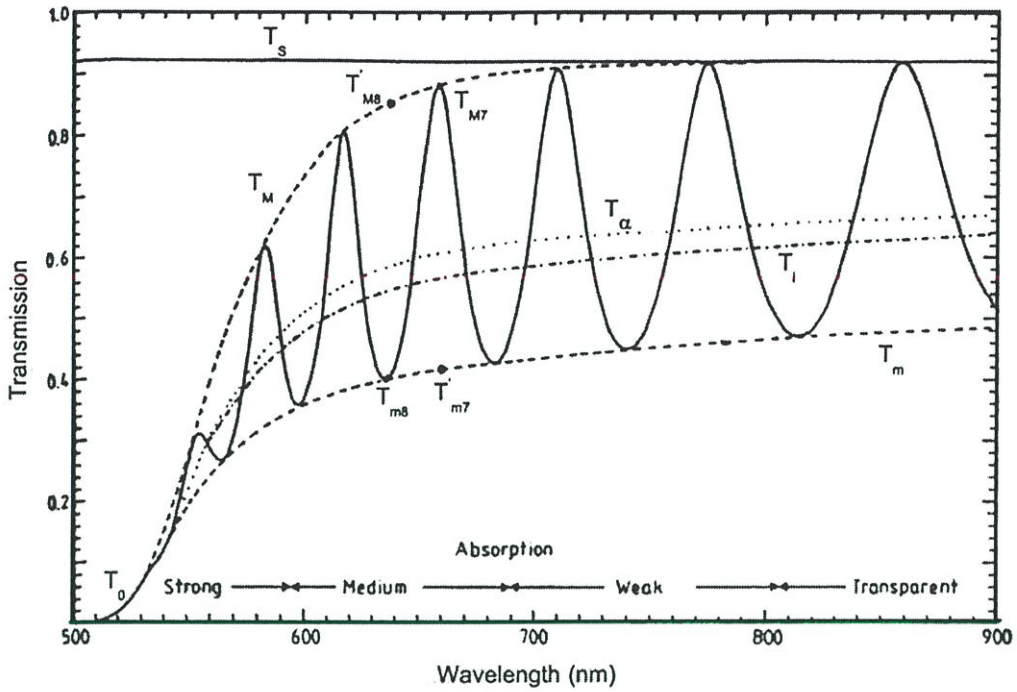


รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพจำลองเมื่อฉายแสงตกกระทบบนฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองรับโปร่งแสง

จากรูปที่ 2.19 เมื่อแสงตกกระทบบนฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับโปร่งแสง ฟิล์มบางมีความหนา d และมีค่าดัชนีหักเห $n = n - ik$ โดยที่ฐานรองรับโปร่งแสงหนามากกว่าฟิล์มบางมากๆ มีค่าดัชนีหักเห s สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $\alpha_s = 0$ และดัชนีหักเหของอากาศคือ $n_0 = 1$

ถ้าความหนาของฟิล์มบางไม่สม่ำเสมอจะไม่ปรากฏวิธีการแทรกสอดและการส่งผ่านแสงจะปรากฏเป็นเส้น T_α ในรูปที่ 2.20 เมื่อ T_α คือ การส่งผ่านแสงเมื่อฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอ

ในบทนี้ได้แบ่งช่วงของการส่งผ่านแสงเป็นออกเป็น 4 ช่วงดังแสดงในรูปที่ 2.20 จากขบวนการช่าย คือ ช่วงโปร่งแสง ช่วงการดูดกลืนแสงต่ำ ช่วงการดูดกลืนแสงปานกลาง และช่วงการดูดกลืนแสงสูง



รูปที่ 2.20 แสดงรีวิการแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นรองรับโปร่งแสง [14]

ถ้าพิจารณาเฉพาะแผ่นรองรับโปร่งแสงโดยไม่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่ การส่งผ่านแสงโดยไม่มี การแทรกสอดจะเขียนได้ดังสมการ

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

เมื่อ T_s คือ การส่งผ่านแสงในช่วงโปร่งแสง

และ

$$R = \left[\frac{(s-1)}{(s+1)} \right]^2$$

หรือ

$$T_s = \frac{2s}{s^2+1} \quad (2.20)$$

และ

$$s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

สมการพื้นฐานของรีวิการแทรกสอดแบบเสริมที่ให้แถบสว่างคือ

$$2nd = m\lambda ; m=0, 1, 2, \dots \quad (2.22)$$

เมื่อ m คือ จำนวนเต็มของค่าความยาวคลื่น $0, 1, 2, \dots$ สำหรับจุดสูงสุดที่มีการแทรกสอดแบบเสริมทำให้เกิดเป็นแถบสว่างและจำนวนครึ่งของค่าความยาวคลื่น $(m + \frac{1}{2})$ เมื่อ $m=0, 1, 2, \dots$

สำหรับจุดต่ำสุดที่มีการแทรกสอดแบบหักล้างทำให้เกิดเป็นแถบมืด

ซึ่งสมการนี้จะใช้หาค่า n และ d พร้อมๆ กัน ไม่สามารถแยกหาแต่ละค่าได้

พิจารณาที่รอยต่อทั้งสามเมื่อแสงเดินทางผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางต่างชนิดกัน การส่งผ่านแสงเป็นฟังก์ชันของ λ, s, n, d และ α

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

ถ้าทราบค่า s จะเขียนสมการข้างบนในรูปของ $n(\lambda)$ และค่าการดูดกลืน $x(\lambda)$ เมื่อ $\alpha = 4\pi s / \lambda$ คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางได้เป็น

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

ถ้าให้ $k=0$ สมการของการส่งผ่านแสงในรูปที่ 2.20 คือ

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \varphi + Dx^2} \quad (2.23)$$

$$\text{เมื่อ } A = 16n^2s \quad (2.24a)$$

$$B = (n+1)^3(n+s^2) \quad (2.24b)$$

$$C = 2(n^2-1)^3(n^2-s^2) \quad (2.24c)$$

$$D = (n-1)^3(n-s^2) \quad (2.24d)$$

$$\varphi = 4\pi nd / \lambda \quad (2.24e)$$

$$x = \exp(-\alpha d) \quad (2.24f)$$

ค่าสูงสุดและต่ำสุดของรีวิการแทรกสอดที่ความยาวคลื่นต่างๆ เขียนได้เป็น

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (2.25)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (2.26)$$

เมื่อ T_M คือ ค่าสูงสุดของการส่งผ่านแสง

T_m คือ ค่าต่ำสุดของการส่งผ่านแสง

ทั้งสองสมการนี้ T_M และ T_m จะเป็นฟังก์ชันของ λ และที่ λ ใดก็ตาม T_M จะมีค่า T_m ที่สอดคล้องกันเป็นคู่ๆ จากการลากเส้นเชื่อมจุดสูงสุดและจุดต่ำสุด เช่นจากรูปที่ 2.20 T_{M7} จะมีค่า T'_{m7} เป็นคู่

2.2.6.1 ช่วงโปร่งแสง (The transparent region)

ในช่วงโปร่งแสง $\alpha = 0$ หรือ $x = 1$ แทนค่าสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ (2.24) จะได้

$$T_M = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (2.27)$$

สมการที่ (2.27) เหมือนกับสมการที่ (2.20) และค่าสูงสุดของรีฟlection แทรกสอดขึ้นอยู่กับค่า s เพียงอย่างเดียวเหมือนเส้น T_r ถ้าค่าสูงสุดของรีฟlection แทรกสอดเริ่มต่ำกว่าเส้น T_r แสดงว่าเริ่มมีการดูดกลืนแสง ซึ่งสมการนี้ใช้หาค่า s ในช่วงโปร่งแสงได้โดยจัดให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.21)

จากนั้นแทนสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.26) เมื่อ $x = 1$ จะได้

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

หรือ

$$n = [M + (M^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.28)$$

เมื่อ

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

ดังนั้น T_m จึงเป็นฟังก์ชันของ n และ s ซึ่งค่า n สามารถคำนวณได้จาก T_m ในสมการนี้

2.2.6.2 ช่วงการดูดกลืนแสงต่ำ-ปานกลาง (The region of weak and medium absorption)

ในช่วงนี้ $\alpha \neq 0$ และ $x < 1$ ถ้านำส่วนกลับของสมการที่ (2.25) ลบออกจากส่วนกลับของสมการที่ (2.26) จะได้สมการที่ไม่ขึ้นกับค่า x

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (2.29)$$

แทนสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.29) เพื่อหาค่า n จะได้

$$n = [N + (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.30)$$

เมื่อ

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

สมการที่ (2.30) ใช้หาค่าดัชนีหักเห ($n(\lambda)$) จากค่า T_M และ T_m (ตรงกับสมการที่ใช้หาความหนาของฟิล์มบางของ Manifacier et al [13])

เมื่อทราบค่า $n(\lambda)$ จะหาค่าคงที่อื่นๆในสมการที่ (2.24) ได้ และสามารถหาค่า x ได้จากสมการที่ (2.25) และสมการที่ (2.26) เมื่อแก้สมการที่ (2.25) จะได้

$$x = \frac{E_M - [E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n - 1)^3 (n - s^2)} \quad (2.31)$$

เมื่อ

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

เมื่อแก้สมการที่ (2.26) จะได้

$$x = \frac{E_m - [E_m^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n - 1)^3 (n - s^2)} \quad (2.32)$$

เมื่อ

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

2.2.6.3 ช่วงการดูดกลืนแสงสูง (The region of strong absorption)

ในช่วงการดูดกลืนสูงจะไม่ปรากฏการแทรกสอด จึงไม่สามารถที่จะคำนวณค่า n และ x จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงได้เพียงอย่างเดียว โดยจะต้องหาค่า n จากสเปกตรัมช่วงอื่นก่อน จากนั้นนำมาหาค่า x จากสูตรที่แสดงก่อนหน้านี้ ซึ่งยิ่งค่า α ยิ่งสูงมากเท่าใด เส้น T_M, T_α, T_i และ T_M จะเข้าใกล้กันมากจนรวมเป็นเส้น T_0 ถ้าไม่คิดถึงผลของการแทรกสอด เมื่อ $x \ll 1$ สมการที่ (2.23) จะเขียนได้ว่า

$$T_0 \sim Ax/B$$

หรือ

$$x \sim \frac{(n+1)^3(n+s^2)}{16n^2s} T_0 \quad (2.33)$$

2.2.6.4 การหาความหนาของฟิล์มบางจากรีฟการแทรกสอด

ถ้า n_1 และ n_2 เป็นดัชนีหักเหของรีฟการแทรกสอดสูงสุด(หรือต่ำสุด)ที่อยู่ติดกันที่ λ_1 และ λ_2 ตามลำดับ จากสมการที่ (2.22) จะได้ความหนาของฟิล์มบางเป็น

$$d = \frac{M\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1n_2 - \lambda_2n_1)} \quad (2.34)$$

เมื่อ M คือ จำนวนลูกคลื่นที่อยู่ระหว่างคลื่นสองลูกที่ทำการเลือก ($M = 1$ สำหรับสันคลื่น หรือ ท้องคลื่นที่อยู่ติดกัน),

λ_1, λ_2 คือ ความยาวคลื่นของสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ทำการเลือก

n_1, n_2 คือ ดัชนีหักเหของฟิล์ม ณ ความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ที่ทำการเลือกตามลำดับ

โดยทั่วไปการหาความหนาให้ได้ค่าถูกต้องมากที่สุดควรจะใช้ λ_1 และ λ_2 ในช่วงโปร่งแสง (transparent) ดังรูปที่ 2.20

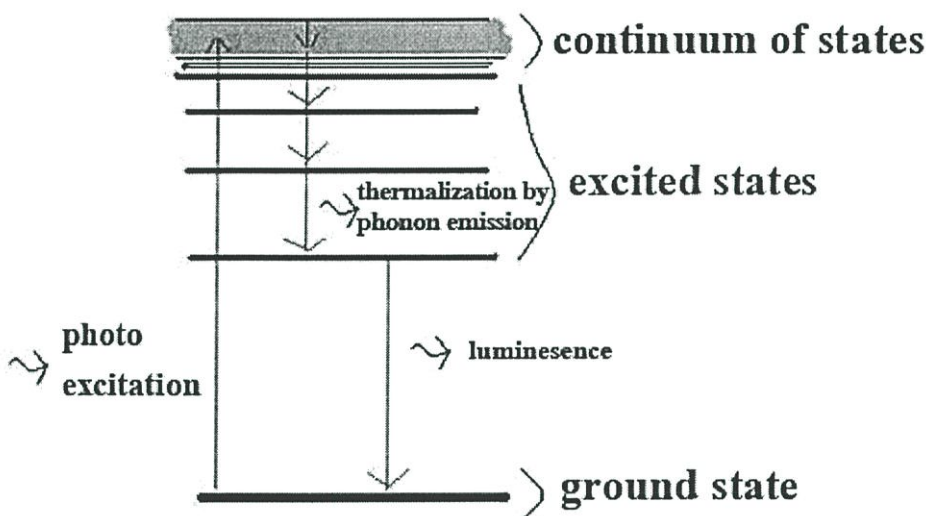
2.3 โฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.3.1 ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ [4-6,20-22]

เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ การเปล่งแสง (luminescence) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า วิธีการใส่พลังงานกระตุ้นให้แก่สารมีได้หลายวิธี เช่น การฉายแสง อัลตราไวโอเลต การระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น โฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ฟลูออเรสเซนซ์ จะเกิดการเปล่งแสงในขณะที่มีการกระตุ้น กลไกคือ จะมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) สั้นๆ ประมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-8} วินาที

2. ฟอสฟอริสเซนซ์ จะเกิดการเปล่งแสงภายหลังที่มีการกระตุ้นจึงมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) นานกว่าแบบฟลูออเรสเซนซ์ คืออาจมีค่าประมาณ 10^{-3} วินาที หรืออาจเป็นชั่วโมง



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากรูปที่ 2.21 เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือพลังงานโฟตอน (electromagnetic or photon radiation) ตกกระทบสาร ถ้ามีพลังงานมากพออิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานกระตุ้น (excited states) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบมีพลังงาน $\hbar\omega_{laser}$ เมื่ออิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นตกกลับมาสู่ระดับพลังงานเริ่มต้น (initial state) จะมีการปลดปล่อยโฟตอนที่มีพลังงาน $\hbar\omega_{PL}$ (และอาจมีการปล่อยโฟนอนที่มีพลังงาน $\hbar\Omega_{phonon(s)}$) ออกมาด้วย จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\hbar\omega_{laser} = \hbar\omega_{pL} + \hbar\Omega_{phonon(s)} \quad (2.35)$$

อย่างไรก็ตาม การดูดกลืนแสงของวัสดุก็ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่มากระตุ้นด้วย ดังสมการที่ (2.36) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน(absorption coefficient: α) ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

$$\alpha = A(\hbar\omega - E_g)p = A(hc/\lambda - E_g)p \quad (2.36)$$

เมื่อ A และ p เป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด

$\hbar\omega$ เป็นพลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบ

E_g เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงาน

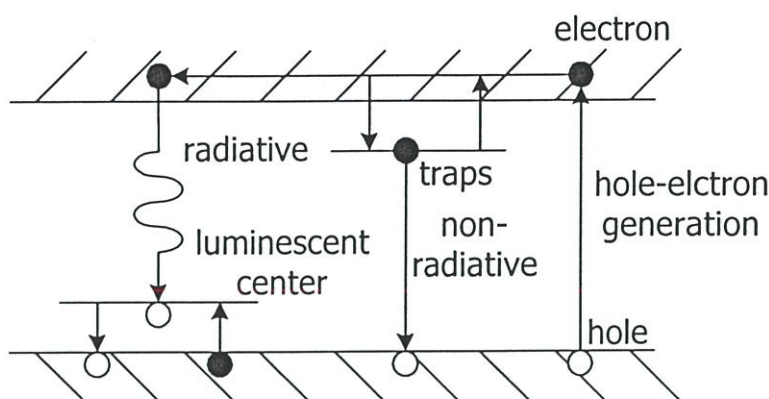
หรืออาจคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของสารได้จากสมการที่ (2.37) ซึ่งใช้ได้กับสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียง (กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง สมการที่ (2.36) และสมการที่ (2.37) จะมีค่าเท่ากัน)

$$\alpha = C n_i n_r P_{if} \quad (2.37)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่

n_i และ n_r เป็นค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานเริ่มต้นและสถานะพลังงานสุดท้าย ตามลำดับ

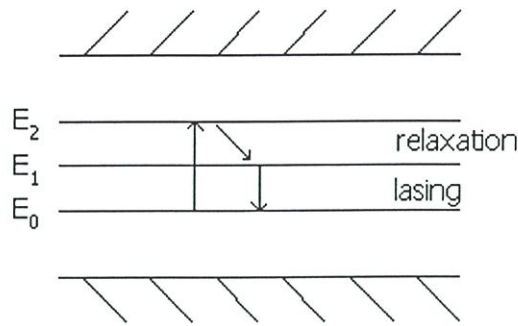
P_{if} เป็นค่าความน่าจะเป็นของการย้ายสถานะพลังงานจากสถานะเริ่มต้น ไปสู่สถานะสุดท้าย



รูปที่ 2.22 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงและไม่เปล่งแสง

จากรูปที่ 2.22 เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนย้ายไปจากตำแหน่งเดิม หากอิเล็กตรอนนี้ถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน(trap) และย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบวาเลนซ์จะเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการเปล่งแสง(non-radiative) แต่ถ้าอิเล็กตรอนนี้ย้ายสถานะพลังงานผ่านทางศูนย์กลางการเปล่งแสง(luminescent center) จะเกิดการเปล่งแสงออกมา แต่โดยทั่วไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน(trap) มากกว่า จึงทำให้สารกึ่งตัวนำไม่ค่อยเกิดการเปล่งแสง

จากปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบปกติ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในการเปล่งแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น แต่ในปรากฏการณ์แอนติ-สโตก พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีค่าสูงกว่าพลังงานกระตุ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุบางชนิดมีระดับพลังงานที่อยู่ตรงกึ่งกลางพอดี เมื่อเราใส่พลังงานกระตุ้นที่มีค่าเท่ากับระดับพลังงาน 1 ไป 2 นั้น จะเปรียบเสมือนว่าให้พลังงานกระตุ้นจากระดับพลังงาน 2 ไป 3 ด้วย ดังนั้นในที่สุดอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 1 ไป 3 เมื่อให้พลังงานกระตุ้นภายในครั้งเดียว และจากนั้นจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 3 มายังระดับพลังงาน 1 โดยปลดปล่อยพลังงานออกมา ดังนั้นพลังงานโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีค่ามากกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นที่ใส่เข้าไป ดังรูปที่ 2.23 (ก)



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงการเปล่งแสงในระดับพลังงานต่างๆ ของสารเจือที่อยู่ภายในช่องว่าง แถบพลังงาน

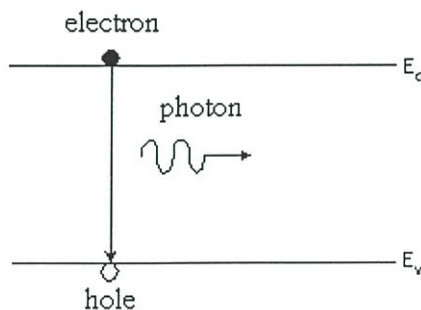
เมื่อไอออนถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานขึ้นไปสู่ระดับพลังงานสูงสุดของสารเจือ จากนั้นจะเกิดการผ่อนคลาย(relaxation) หลังจากนั้นจะเกิดการปล่อยแสง(lasing) ตกลงมาที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดของสารเจือ และจะปล่อยแสงในตัวของมันเองออกมา

2.3.2 กลไกการเปล่งแสงแบบลูมินิสเซนซ์ [4-6,20-22]

กลไกการเรืองแสงแบบลูมินิสเซนซ์ เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงลงสู่ระดับพลังงานต่ำ และสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

1. การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบวาเลนซ์

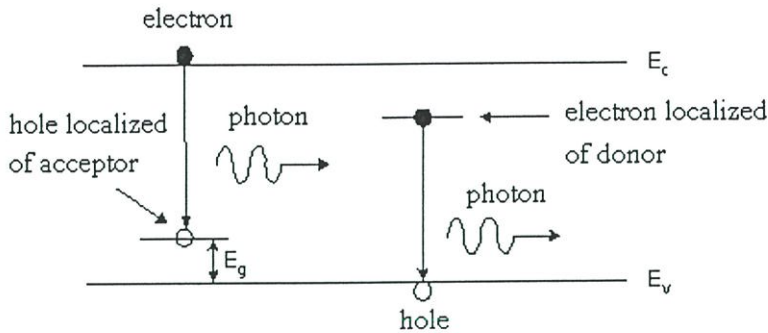
เป็นการเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) กล่าวคือเป็นการรวมตัวกันโดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำรวมกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ถ้าวัสดุสารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) แสงที่เปล่งออกมาจะมีพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.26 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเปล่งแสงของพาหะอิสระระหว่าง แถบนำและแถบวาเลนซ์

2. การเปล่งแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานย่อยรวมกัน

เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวกับโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ หรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับในระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้รวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (ซ้าย) และการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้และโฮลอิสระ (ขวา)

3. การเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนที่มีสถานะพลังงานแบบโลคอลลൈซ์

เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีสถานะพลังงานแบบโลคอลลाइซ์ (localized states-to-localized states) ตัวอย่างเช่น การเปล่งแสงจากศูนย์กลางชนิดเอฟ (F-centers) ในวัสดุชนิดอัลคาไลน์เฮไลด์ ซึ่งผลึกของวัสดุชนิดนี้เมื่อถูกอบให้ร้อนภายในบรรยากาศของโลหะตระกูลอัลคาไลน์ (เช่น Li, Na, K, Rb, Cs, Fr จะทำให้อะตอมของโลหะอัลคาไลน์แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อผลึกอัลคาไลน์เฮไลด์ และทำให้อะตอมเหล่านั้นมีจำนวนอะตอมชนิดเฮไลด์ (เช่น F, Cl, Br, I, At) ที่ไม่สมดุลกับอะตอมอัลคาไลน์ นั่นคือเปรียบเสมือนกับเกิดช่องว่างที่ขาดอะตอมเฮไลด์ จากนั้นเพื่อให้สภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง อิเล็กตรอนจะวิ่งไปจับอยู่ที่ช่องว่างของเฮไลด์นั้น เปรียบเสมือนว่าช่องว่างนั้นเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอนถูกแรงดึงดูดดึงดูดไว้คล้ายกับแบบจำลองอะตอมของไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนเหล่านั้นมีสถานะพลังงานอยู่ที่สถานะพื้น ต่อจากนั้นเมื่อฉายแสงเข้าสู่ผลึก แสงนั้นจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากสถานะพื้นให้ขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงขึ้น หลังจากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานกลับคืนสู่สถานะพื้นจะมีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นออกมาจึงทำให้ผลึกนั้นมีสีตามความยาวคลื่นของแสงที่ถูกเปล่งออกมา เราเรียกการเกิดข้อบกพร่องผลึกของโครงสร้างแบบนี้ว่า ศูนย์กลางสี (color center) หรือศูนย์กลางเอฟ (F-center)

4. การเปล่งแสงจากเอกซิตอน

เอกซิตอน คือคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลที่สถานะถูกกระตุ้น แต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนั้นยังมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้พาหะทั้งคู่แยกออกจากกันเป็นอิสระได้ กล่าวคือ แรงแลอมบ์ดึงดูดให้อิเล็กตรอนและโฮลจับอยู่กันเป็นคู่ ๆ และระดับพลังงานของทั้งอิเล็กตรอนและโฮลยังอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงาน

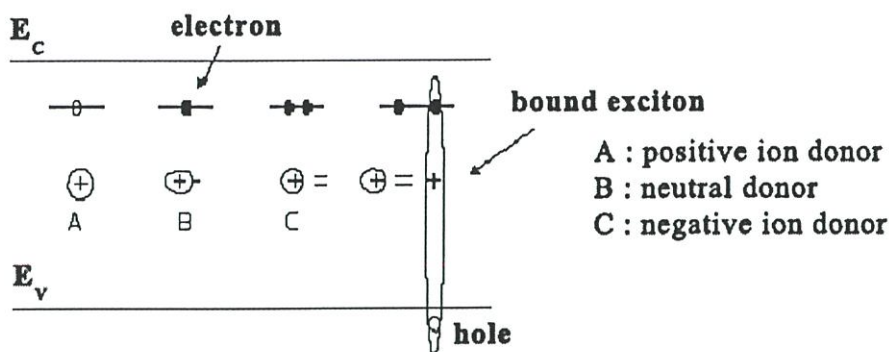
เอกซิตอน มีสองชนิดคือ

- เอกซิตอน ชนิดที่เป็นอิสระ (free exciton) การเปล่งแสงจากเอกซิตอนชนิดอิสระนี้มีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานเล็กน้อย
- เอกซิตอน ชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว (bound exciton) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในเอกซิตอนชนิดนี้อยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นพลังงานโฟตอนของแสงที่ถูกเปล่งออกมาจากการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานมาก

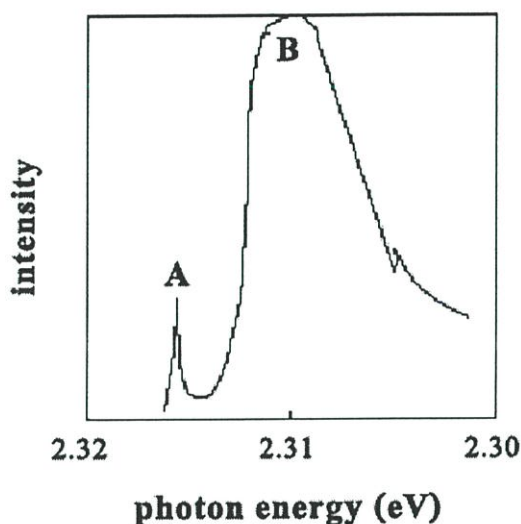
การเปล่งแสงจากเอกซิตอนมีลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

1) การเปล่งแสงจากเอกซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้

ตัวอย่างเช่น การเจือสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP (ตระกูลหมู่ III-หมู่ V) ด้วยอะตอม S (หมู่ VI) จะทำให้อะตอม S เข้าไปแทนที่อะตอม P และอะตอมของ S จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ ในสภาพที่อะตอม S จับอิเล็กตรอนไว้นั้น อะตอม S ยังมีสภาพเป็นกลาง แต่ถ้าอะตอม S ปลปล่อยให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปในแถบนำ อะตอม S จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอออนบวก ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ “ \oplus ” แทนไอออนบวก และสัญลักษณ์ “ \ominus ” แทนสภาพ S ที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งมาจับที่อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางนี้จะทำให้อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางเปลี่ยนสภาพเป็นลบ ซึ่งสามารถแทนไอออนลบด้วยสัญลักษณ์ “ \ominus ” รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะการเกิดเอกซิตอน ลักษณะดังกล่าว ในสภาพเช่นนี้ ถ้ายังมีโฮลวิ่งเข้ามาใกล้ไอออนลบนี้ โฮลจะถูกแรงดึงดูดจากไอออนลบดึงดูดไว้ และทำให้เกิดเป็นเอกซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ด้านริมขวา และถ้าคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้มีการรวมตัวกันก็จะเกิดการเปล่งแสงออกมา รูปที่ 2.29 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการเปล่งแสงจากเอกซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวใน GaP:S



รูปที่ 2.28 แผนภาพแสดงเอกซิตอนชนิดที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้



รูปที่ 2.29 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของเอกซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคูลอมบ์ของ GaP:S

2) การเปล่งแสงจากเอกซิตอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ (isoelectronic trap)

พิจารณาตัวอย่างการเติมอะตอม N (หมู่ V) เข้าสู่ GaP ในกรณีนี้อะตอม N จะเข้าไปแทนที่อะตอม P แต่เนื่องจากทั้งอะตอม N และ P เป็นธาตุหมู่ V เหมือนกัน เพราะฉะนั้นสภาพไฟฟ้าจึงเป็นกลางเหมือนเดิม กล่าวคืออะตอม N ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ หรืออะตอมผู้รับแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอะตอม N มีคุณสมบัติในการดึงดูดอิเล็กตรอนมากกว่า P (เรียกว่าอะตอม N มีค่า อิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง) ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนในผลึกวิ่งวนมาใกล้อะตอม N ก็จะทำให้อะตอม N จับอิเล็กตรอนไว้ได้ดี ในสภาพเช่นนี้เรากล่าวว่าอะตอมไนโตรเจนนั้นกำลังสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ กับดักชนิดนี้มีสภาพประจุไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถมีแรงดึงดูดโฮลซึ่งมีประจุบวกให้เข้ามาใกล้ได้จึงส่งผลให้เกิดเป็นเอกซิตอนเข้ามา และอิเล็กตรอนและโฮลในเอกซิตอนชนิดนี้สามารถรวมตัวกันได้ง่ายจึงทำให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสงมีค่าสูงมาก ตัวอย่างในกรณีผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ซึ่งตามปกติเดิมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มี

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง จึงมีประสิทธิภาพของการเปล่งแสงไม่ดึ้นัก แต่ถ้าเราเติมอะตอม N ไปในผลึก GaP นี้จะสามารถสร้างกับดักไอโซอิเล็กตรอนิกส์ ขึ้นในผลึกได้ และเกิดเอกซิตอน และทำให้การรวมตัวของพาหะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก เปรียบเสมือนว่าผลึก GaP กลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง จึงมีการนำ GaP ไปประดิษฐ์เป็นไดโอดเปล่งแสงอย่างแพร่หลายและสามารถเปล่งแสงสีแดงที่สว่างมากๆ ได้ดี

5. การเปล่งแสงจากคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ (DA pair)

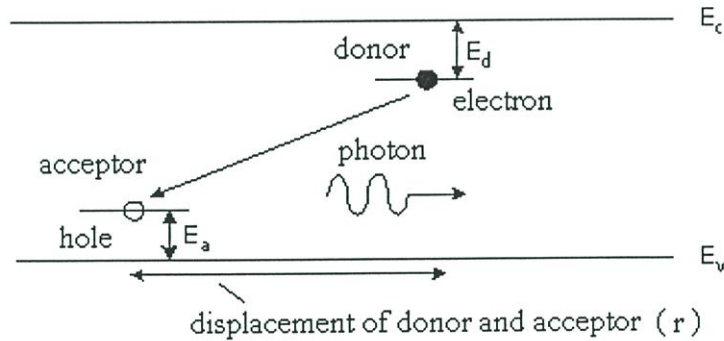
การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้ และโฮลที่จับอยู่ในระดับพลังงานผู้รับโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพดีมาก รูปที่ 2.30 ซึ่งแสดงกลไกการรวมตัวของพาหะชนิดนี้ ตัวอย่างได้แก่การโด๊ป GaP ด้วย S ที่เป็นอะตอมผู้ให้ และ C ที่เป็นอะตอมผู้รับพร้อมๆ กัน คุณสมบัติของการเปล่งแสงชนิดนี้มีลักษณะเด่นหลายข้อซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1) ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล $W(r)$ ขึ้นกับระยะห่าง (r) ของอะตอมผู้ให้ และอะตอมผู้รับ โดยที่ถ้า r มีค่าน้อยๆ การเปล่งแสงก็จะดีดังนี้

$$W(r) = W_{\max} e^{-r/R_d} \quad (2.38)$$

โดยที่ W_{\max} คือ ค่าคงตัว

R_d คือ ค่ารัศมีของวงจรรีโอมิเตอร์รอบอะตอมผู้ให้



รูปที่ 2.30 แผนภาพแสดงการเปล่งแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคู่ของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

2) พลังงานโฟตอนของการเปล่งแสง มีค่า

$$h\nu = E_g - (E_a + E_d) + \frac{q^2}{\epsilon r} \quad (2.39)$$

โดยที่ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

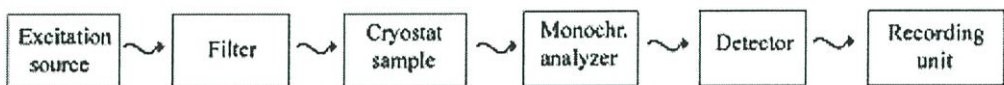
E_a, E_d คือ ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับและอะตอมผู้ให้ ตามลำดับ

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

2.3.3 หลักการติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์พื้นฐาน [5-6]

พื้นฐานการติดตั้งอุปกรณ์วัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะเป็นไปตามไคอะแกรมในรูปที่ 2.31 แหล่งกำเนิดโฟตอนที่ใช้กระตุ้นการเกิดลูมิเนสเซนซ์อาจเป็นเลเซอร์ หรือ หลอดไฟ โดยที่อาจจะ เป็นแบบสเปกตรัมต่อเนื่องหรือพัลส์ก็ได้ ก่อนที่จะใช้โฟตอนเหล่านี้ไปกระตุ้นสารตัวอย่างต้องใช้ ฟิลเตอร์กรองแสงเพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการก่อน ปกติชิ้นสารตัวอย่างมักจะเก็บในที่ที่มี อุณหภูมิต่ำๆ ขณะทำการวัดเพื่อลดปัญหาการเกิด โฟนอน



รูปที่ 2.31 การติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์พื้นฐาน

แสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นตัวอย่างจะถูกแยกสเปกตรัมโดย โมโนโครเมเตอร์ (monochrometer) ก่อนที่จะวัดโดยหัววัดสัญญาณแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งต่อไปยังภาคแสดงผล การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์แบ่งออกได้ 3 รูปแบบคือ

1. กำหนดความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นคงที่แล้วทำการสแกนช่วงความยาวคลื่น โฟตอนที่สารตัวอย่างเปล่งออกมา โดยปกติพลังงานโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมามักจะมีพลังงาน น้อยกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์ (Stoke's law)

2. กำหนดให้หัววัดเลือกวัดความยาวคลื่นโฟตอนคงที่ค่าหนึ่งแล้วทำการสแกนความยาว คลื่นโฟตอนที่ใช้กระตุ้น

3. กำหนดให้ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นและที่ปลดปล่อยออกมาคงที่ และทำการวัด สเปกตรัมการเกิดลูมิเนสเซนซ์ เทียบกับเวลาเมื่อโฟตอนที่ใช้กระตุ้นเป็นพัลส์เดียว

2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

จากทฤษฎีแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงมีปริมาณน้อย โดยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับ หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของสารกึ่งตัวนำ จึงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.4.1 สภาพนำไฟฟ้า[5,6,12]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity: σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field:E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.40)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.41)$$

ถ้ามีแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.42)$$

และ

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.43)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.40) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.44)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.45)$$

สมการที่ (2.45) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทาน หรือสภาพนำไฟฟ้าและขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

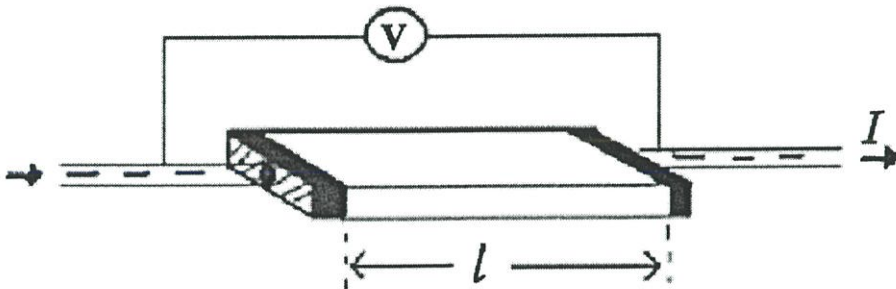
2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า[12]

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.4.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.32 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

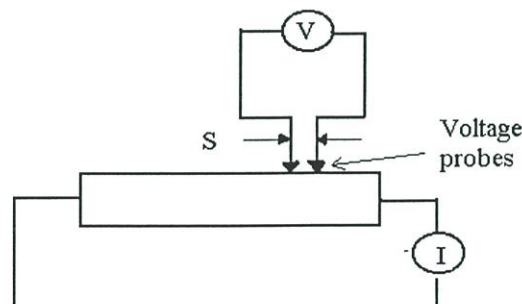
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.46)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.47)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

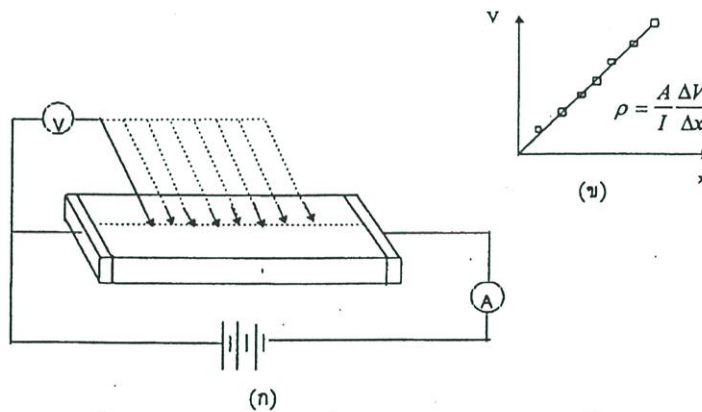
2.4.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัด ศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.33 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.33 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.34 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.34 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

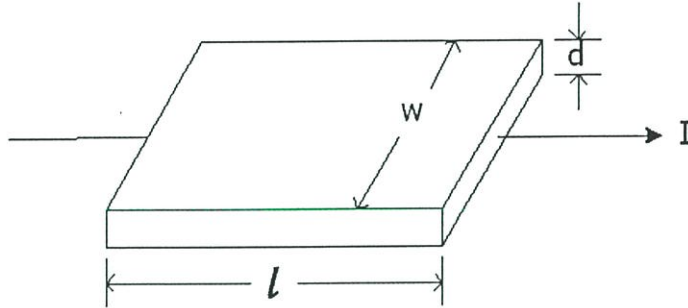
(ก) การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.4.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.36 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ โดยส่วนใหญ่ มักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น(sheet resistance) ซึ่งมีหน่วยเป็น Ω / \square



รูปที่ 2.35 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w และหนา d ตามรูปที่ 2.35 จากกฎของโอห์มและใช้สมการที่ (2.46) จะคำนวณหาความต้านทานของฟิล์มบางได้ดังนี้

$$R = V/I = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{wd} \quad (\Omega) \quad (2.48)$$

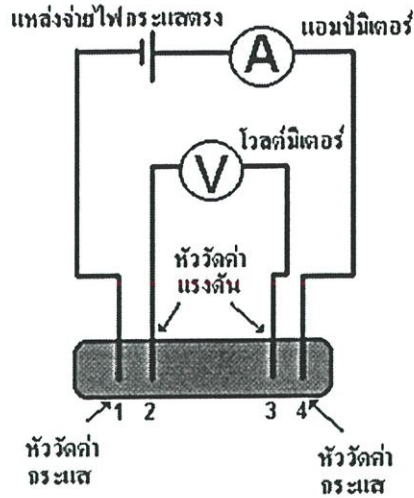
ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($l = w$) ดังนั้นสมการที่ (2.48) เขียนใหม่ได้เป็น

$$R = R_s = \frac{\rho}{d} \quad (\Omega / \square) \quad (2.49)$$

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

โดยหน่วยของความต้านทานแผ่นจะแทน Ω ด้วย Ω / \square เพื่อให้เกิดความแตกต่าง



รูปที่ 2.36 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.36 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใด ๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสี่จะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \left[\frac{1}{S_1 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right] \quad (2.50)$$

โดยที่ S คือช่องว่างระหว่างขั้วที่ติดกัน ในกรณีที่ $S_1 = S_2 = S_3$ สมการที่ (2.50) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.51)$$

2.4.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ [23-27]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกัปกประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.52)$$

เมื่อ Φ_b คือ ค่ากำแพงศักย์

A คือ ค่าคงที่

T คือ อุณหภูมิเป็นเคลวิน

k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์ (Boltzmann) = 1.38×10^{-23} J/K

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกส์อิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกับดักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{-1/4}\right] \quad (2.53)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิห้อง(300 เคลวิน)

2.5 การเตรียมฟิล์มบาง

2.5.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [7, 28-30]

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ(thermal evaporation) นั้นเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในระบบสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} torr วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปที่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.5.1.1 อัตราการระเหยสาร (the physics and chemistry of evaporation)

จากการทดลองของ Hertz และ Knudsen[24-27] พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน(heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 * 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.54)$$

เมื่อ Φ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

P_e คือ ความดันสมดุล(equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์

M คือ มวลโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 * 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.55)$$

เมื่อ Γ_e คือ มวลของอัตราการระเหยสาร

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.5.1.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.56)$$

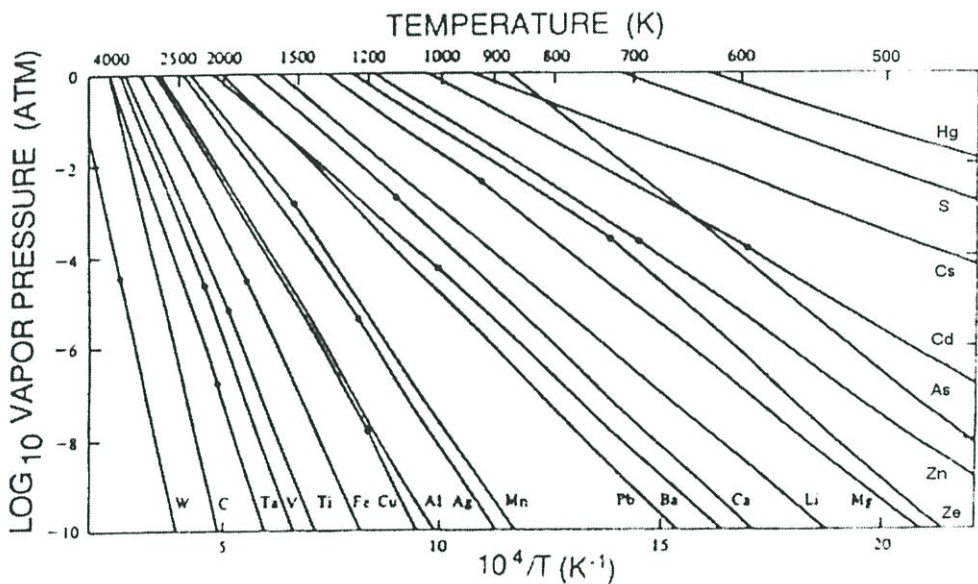
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อก๊าซนี้เป็นก๊าซในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.56) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.57)$$

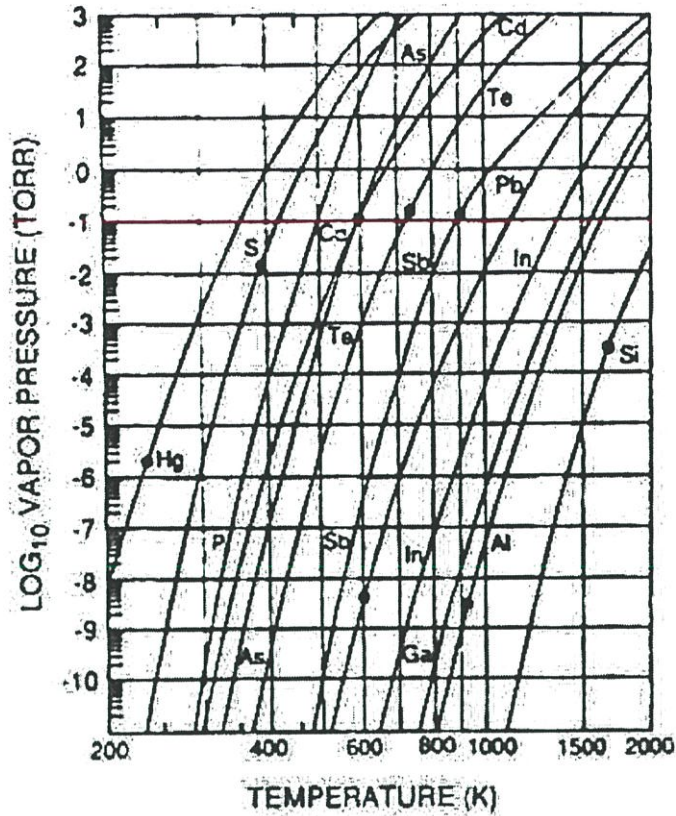
ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad (2.58)$$

เมื่อ I (หรือ $P_0 = \exp I$) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.5.1.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 เช่น สารประกอบของสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก(dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2} X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย

ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการระเหยสารประกอบ

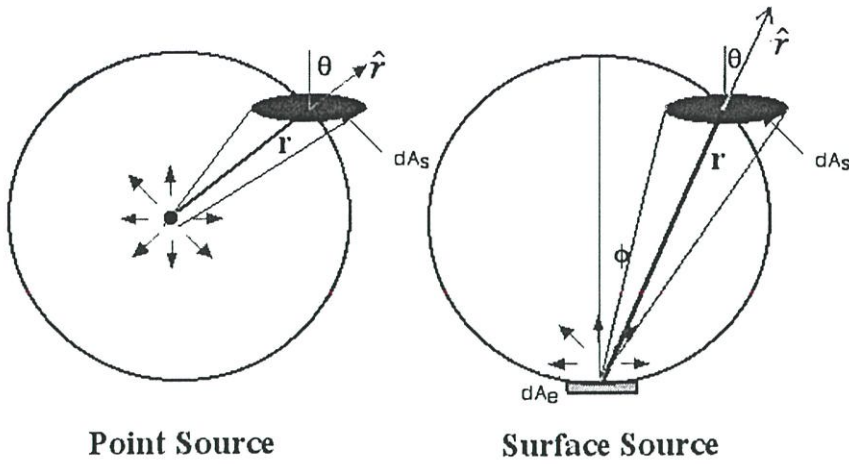
ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX(s \text{ หรือ } l) \rightarrow MX(g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂
การแยกส่วนประกอบ	$MX(s) \rightarrow M(s) + 1/2 X_2(g)$ $MX(s) \rightarrow M(l) + 1/n X_n(g)$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$MX(s) \rightarrow M(g) + 1/2 X_2(g)$	
(ก) ซาล์โคจีไนต์	X = S, Se, Te	CdS, CdTe, CdSe
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO(g) + 1/2 O_2(g)$	SiO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂

M = โลหะ, X = อโลหะ

2.5.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass : \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_c} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_c} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.59)$$



รูปที่ 2.39 แสดงรูปแบบโปรไฟล์การระเหยของสาร

โดยที่ A_E คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหยปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.39 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.60)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบมวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c$$

แฟกเตอร์ $\cos \phi$ เป็นฟังก์ชันของ ϕ เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า $\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$ ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี r จะได้

$$\bar{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi r^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi r^2} \cos \phi$$

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.61)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

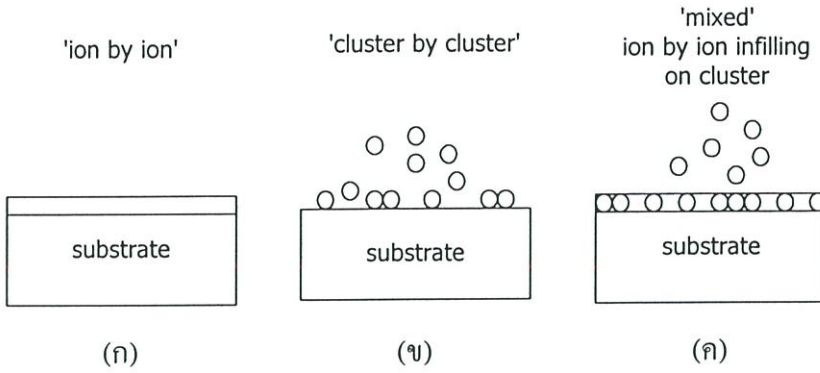
$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.62)$$

เมื่อ $n=1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ $n=0$ การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

2.5.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีออบสารละลายเคมี [5-6,30-40]

2.5.2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา

ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ สามารถทำได้ด้วยวิธีการออบสารละลายเคมีโดยการจุ่มจวนรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ ซึ่งสารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วย ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) แคลเซียมซัลเฟต ($CdSO_4$) ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ซึ่งจะให้อิออนของซัลเฟอร์ (S^{2-}) ไอออนของแคลเซียม (Cd^{2+}) และไอออนของซิงค์ (Zn^{2+}) ตามลำดับ โดยในการเตรียมฟิล์มนี้จะมีค่า pH ของสารละลายในอ่างประมาณ 10.6 – 11.8 และจะเกิด Cd^{2+} , Zn^{2+} อย่างช้าๆ โดย Zn^{2+} จะเข้าไปแทน Cd^{2+} ทำให้เกิดฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้เราใช้ค่า Zn ที่มีอัตราส่วนผสมทางเคมีดังต่อไปนี้ โดย $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9$ และ 1.0 ตามลำดับ โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



รูปที่ 2.40 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกของฟิล์มบาง

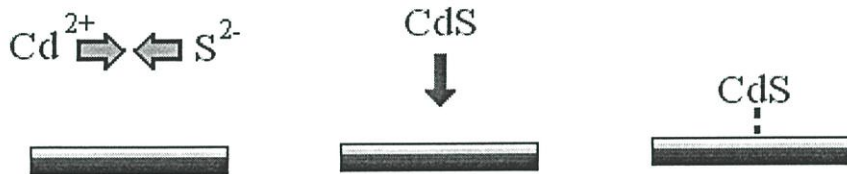
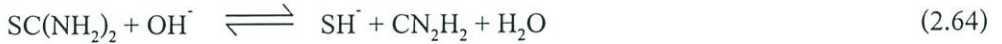
(ก) กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

(ข) กระบวนการโฮโมจีเนียส

(ค) กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรจีเนียสและโฮโมจีเนียส

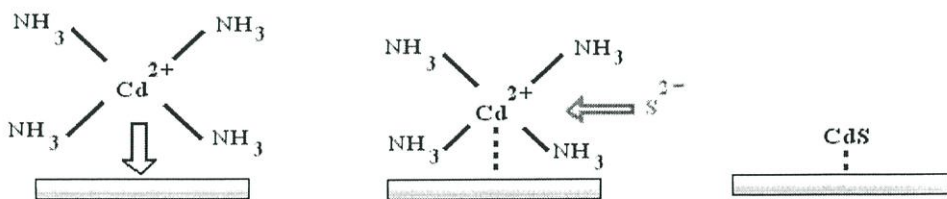
2.5.2.1.1 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ CdS

ก) กระบวนการโฮโมจีเนียส



รูปที่ 2.41 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส

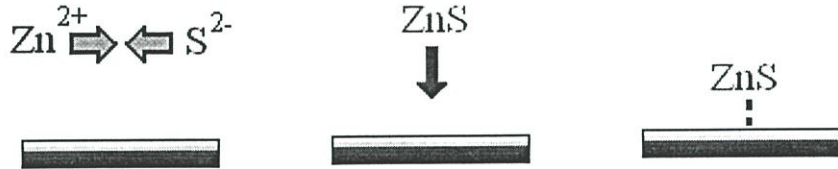
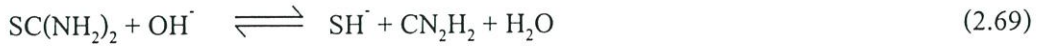
ข) กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส



รูปที่ 2.42 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

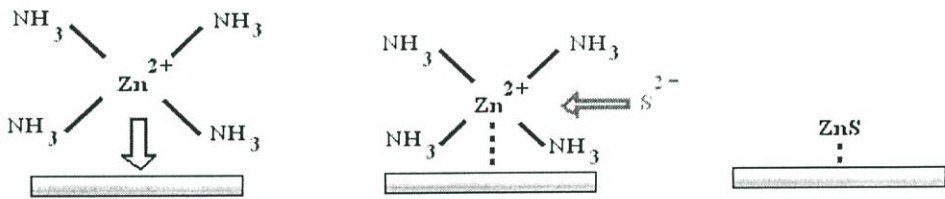
2.5.2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ ZnS

ก) กระบวนการไฮโมจีเนียส



รูปที่ 2.43 แสดงการเกิดฟิล์ม ZnS บนฐานรองรับโดยกระบวนการไฮโมจีเนียส

ข) กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส



รูปที่ 2.44 แสดงการเกิดฟิล์ม ZnS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

จากปฏิกิริยาข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการเกิดฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS แบบเฮเทอโรจีเนียส คือ



2.5.2.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์[5-6,24-34]

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

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous precipitation) หรือกลไกการจับตัวกันแบบทีละกลุ่มก้อน (cluster by cluster) ซึ่งจะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของแผ่นรองรับดังรูปที่ 2.35
2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ เรียกว่า แบบทีละไอออน (ion by ion) หรือการตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous precipitation) ซึ่งตัว Cd^{2+} หรือ Zn^{2+} จะไปจับกับ NH_3 กลายเป็น $Cd(NH_3)_4^{2+}$ หรือ $Zn(NH_3)_4^{2+}$ แล้วเคลื่อนมายังตำแหน่ง site บนผิวฐานรองรับ เกิดการดูดซับ (adsorption) ทำให้โมเลกุลของแอมโมเนียหลุดออกมา ในขณะนั้นเอง ไอออน S^{2-} ที่อยู่บริเวณนั้นจะสร้างพันธะรวมตัวกับแคดเมียมไอออนหรือสังกะสีไอออน กลายเป็น CdS หรือ ZnS ดังรูปที่ 2.36 และ 2.38

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

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีและวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่ตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานสูง และวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.1 การทำความสะอาดกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ

1. กระจกสไลด์ขนาด 12 มิลลิเมตร x 25 มิลลิเมตร
2. เครื่องซังคิติดอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)
3. เตาอบ
4. นาฬิกาจับเวลา
5. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
6. สารเคมี
 - น้ำยาอิกวินอค
 - น้ำปลอคประจุ
 - TCE
 - อะซีโตน
 - เอทานอล
 - HF 10%

3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

1. อ่างน้ำปรับอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิได้
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. เครื่องซังคิวิตอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)
5. แท่นเทียบฐานรองรับ (substrate holder)
6. ชุดกวนสารเคมี อัตราเร็วคงที่ 60 รอบต่อนาที
7. เตาแอนนีส
8. สารเคมี
 - เกลือแคดเมียมซัลเฟต ($\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$)
 - เกลือซิงค์ซัลเฟต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
 - ไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$)
 - แอมโมเนีย (NH_3)
 - ไฮดรอกซีเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{N}_2\text{H}_3\text{OH}$)
 - กรดบอริก (H_3BO_3)
 - น้ำปลอดประจุ (Deionized water)

3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

1. เครื่องระเหยสารในระบบสุญญากาศ (evaporator)
2. เครื่องอัดเม็ดสาร
3. เครื่องซังคิวิตอล (ที่มีตำแหน่งทศนิยมละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง)
4. เตาแอนนีส
5. สารเคมี
 - ผล็กผง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี
 - ผล็กผง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี
 - CdS บริสุทธิ์
 - ZnS บริสุทธิ์
 - B_2O_3

3.1.4 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

- เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ ของ Bruker รุ่น 08 รังสีเอกซ์มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

3.1.5 การวัดการส่งผ่านแสง

- เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ JASCO 7800 ความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร

3.1.6 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

- สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ RF-5301PC ยี่ห้อ Shimadzu
- ระบบทำความเย็น (cryogenic) ยี่ห้อ Leybold
- หลอดอัลตราไวโอเล็ต 220 V 400 W ยี่ห้อ EYE
- เลนส์นูนสองด้านความยาวโฟกัส 10 ซม.
- ฟิลเตอร์ส่งผ่าน (band pass filter)365 นาโนเมตร
- ยูวีฟิลเตอร์ (high pass filter) 400 นาโนเมตร
- เลนส์นูนหน้าเดียวความยาวโฟกัส 5 ซม.

3.1.7 การวัดความต้านทานแผ่น

- อิเล็กโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
- ลักซ์มิเตอร์
- แบตเตอรี่ 1.5 โวลต์ จำนวน 4 ก้อน
- แบตเตอรี่ 9 โวลต์ จำนวน 2 ก้อน
- สายโคแอกเชียลและคอนเนคเตอร์แบบ BNC
- หลอดฮาโลเจน ชนิด ELH (120 V , 300 W)
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ
- มัลติมิเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

3.2.1 การเตรียมกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ [3]

วิทยานิพนธ์นี้ได้เตรียมฐานรองรับขนาด $12 \times 25 \text{ mm}^2$ เพื่อใช้เป็นฐานรองรับสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง ในขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับนี้จะเป็นการทำความสะอาดและกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับโดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยแช่ในน้ำยาอีควินอก(น้ำยาล้างจาน) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำป้อนประจุ
2. นำกระจกสไลด์ไปแช่ใน TCE เป็นเวลา 10 นาที
3. นำกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. นำกระจกสไลด์ไปแช่ในน้ำป้อนประจุครั้งละ 10 นาที จำนวน 2 ครั้ง
6. กัดผิวหน้ากระจกด้วย HF ปริมาตร 10 มิลลิลิตร กับน้ำป้อนประจุ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 นาที
7. ล้างกระจกสไลด์ด้วยน้ำป้อนประจุครั้งละ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง สำหรับขั้นตอนที่ 2-7 ใช้เครื่องล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิคด้วยทุกครั้ง
8. อบกระจกสไลด์ที่ได้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที จะได้ฐานรองรับที่พร้อมนำมาใช้งาน

3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ และ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.2.2.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ[3]

การเตรียมฟิล์ม $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง CdS บริสุทธิ์ 99.999% และผลึกผง ZnS บริสุทธิ์ 99.999% เตรียมได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

1. ทำการบดผลึก CdS บริสุทธิ์ให้ละเอียดนำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
2. นำผง CdS บริสุทธิ์ที่ชั่งแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำผง ZnS ไปชั่งตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้
4. นำผง CdS บริสุทธิ์ที่อบไว้แล้ว มาบดผสมกับผง ZnS ที่ชั่งเตรียมไว้ให้เข้ากัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำผง CdS บริสุทธิ์ผสม ZnS ที่อบแล้วนำไปอัดเป็นเม็ด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ด้วยความดันสูงประมาณ 3.8 เมกะปาสกาล

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1g) กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

Composition (x) of Zn	Starting purify materials (total 1 gm)	
	CdS(g)	ZnS(g)
0.0	1.0000	-
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	-	1.0000

- นำมาตัดให้ได้ขนาดพอดีกับภาชนะระเหยสาร แล้วนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำการระเหยสารต่อไป
- ส่วนสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งคือผลึกผง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จากการตกตะกอนของสารละลาย $CdSO_4$, $ZnSO_4$, NH_3 และไฮดรอกไซด์ไฮเดรต ที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ โดยการนำเอาผลึกผงในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้คำนวณแล้วจากงานวิจัยท่านอื่น ไปอบที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเอามาอัดเม็ดตามข้อ 5 ดังกล่าวข้างต้นต่อไป

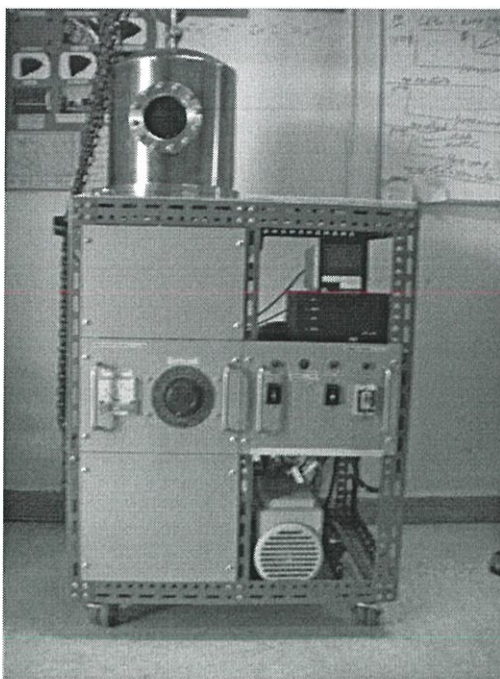
หมายเหตุ ถ้าทำการอัดเม็ดสารทิ้งไว้นาน ก่อนทำการระเหยควรจะทำกรอบเม็ดสารก่อนที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ส่วนการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทำวิธีการเดียวกัน เพียงแต่เพิ่มสารตั้งต้นด้วย B_2O_3 โดยชั่งสารตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ จากนั้นนำสารที่ได้ไปทำในข้อ 4 จนครบขั้นตอน

3.2.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [3]

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่น สิ่งสกปรกต่างๆและคราบไขมัน ด้วยอะซิโตน และเอทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำเม็ดสาร $Cd_{1-x}Zn_xS$ บรรจุลงในภาชนะระเหยสารที่เป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้วางลงบนหน้ากาทที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าอยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
6. เปิดปั๊มโรตารีประมาณ 20 นาที จากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออก จนได้ความดัน 3×10^{-3} มิลลิบาร์ แล้วเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันที่ต้องการ ในการทดลองนี้ใช้ความดันในช่วง $5 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-6}$ มิลลิบาร์
7. เริ่มทำการระเหยสารเพื่อเคลือบบนกระจก โดยการเปิดสวิทช์แบริแอคแล้วเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสอยู่ที่ประมาณ 100 – 130 แอมแปร์ แล้วแต่กรณี เมื่อมวลเม็ดสารเริ่มลดลงก็ทำการเปิดฉากขึ้น
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้วให้ปิดฉากขึ้น แล้วลดแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งไม่มีกระแส และปิดแบริแอค
9. ให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิห้องสุญญากาศลดลง แล้วปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มโรตารี
10. เปิดวาล์วให้อากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำกระจกที่เคลือบแล้วออกมา
12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาแอนนียลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

หมายเหตุ การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทำวิธีการเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนเม็ดสาร $Cd_{1-x}Zn_xS$ เป็น $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ แล้วทำตามขั้นตอนจนครบ



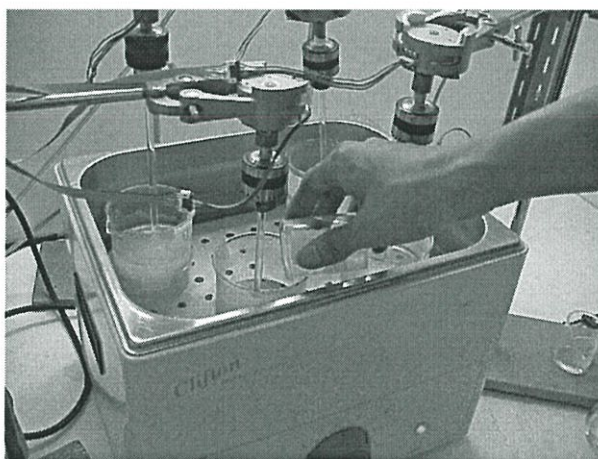
รูปที่ 3.1 แสดงระบบประเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ออกแบบและติดตั้งโดย
ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ

3.2.3 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี [5]

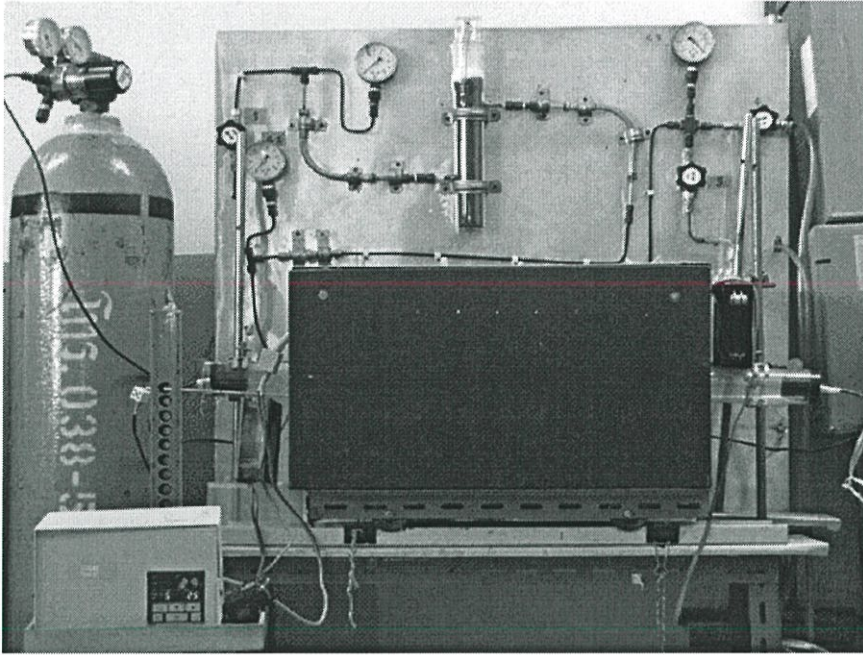
ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เราจะต้องใช้สารเคมี ดังนี้ $CdSO_4 + ZnSO_4$, $SC(NH_2)_2$, NH_3 และไฮดรอกซีเงินจำนวน 0.01, 0.05, 1.5, 3 M ตามลำดับ ปริมาตร 10, 10, 16.8, 27.3 มิลลิลิตร ตามลำดับ เสร็จแล้วเติมน้ำป्लอดประจุในสารละลายทั้งหมด นั้นจนมีปริมาตร 150 มิลลิลิตร ซึ่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น เกลือแคดเมียมซัลเฟต [$CdSO_4 \cdot 8/3 H_2O$], เกลือซิงค์ซัลเฟต [$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$], ไทโอยูเรีย [$SC(NH_2)_2$], กรดบอริก [H_3BO_3] ปริมาณ 0.2308, 0.1725, 0.5709, 0.0092 กรัม ตามลำดับ และเตรียมแอมโมเนียและไฮดรอกซีเงิน ปริมาตร 16.8, 27.3 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยอัตราส่วน Zn เท่ากับ 0.4
2. ละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟตลงในน้ำป्लอดประจุ 10 มิลลิลิตร และเกลือซิงค์ซัลเฟตลงในน้ำป्लอดประจุ 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายเกลือไทโอยูเรียลงในน้ำป्लอดประจุ 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำกระจกสไลด์ที่ขีดยกด้วยเทพลอนใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำป्लอดประจุอยู่ประมาณ 100 มิลลิลิตร ซึ่งแช่อยู่ในอ่างปรับอุณหภูมิ $80^\circ C$
5. เปิดสวิทซ์เตปปีงมอเตอร์ให้หมุนแท่นยึดฐานรองรับตลอดเวลาด้วยอัตราเร็วประมาณ 60 รอบต่อนาที

6. เทสารละลายแคดเมียมซัลเฟตและซิงค์ซัลเฟต 10 มิลลิลิตร ลงในแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปเทลงในบีกเกอร์ ตามด้วยไฮดาซีนและไทโอยูเรียที่เตรียมไว้ในบีกเกอร์ ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำปลอดประจุลงในบีกเกอร์ให้มีค่าประมาณ 150 มิลลิลิตร
7. เมื่อสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี ให้วัดค่า pH ของสารละลาย ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 11.6 จากนั้นรอประมาณ 1 ชั่วโมง โดยระหว่างนั้นให้ควบคุมอุณหภูมิของอ่าง และควบคุมอัตราการหมุนของแท่นยัดให้มีค่าคงที่เสมอและต้องเติมน้ำในอ่างให้มีระดับน้ำเท่ากับสารละลายที่อยู่ในบีกเกอร์ตลอดเวลา
8. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ให้นำเอาออกจากบีกเกอร์จะพบว่าฟิล์มบางเคลือบติดอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ นอกจากนี้ยังมีตะกอนของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางและตกตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์
9. นำแผ่นกระจกที่เคลือบฟิล์มบางใส่ลงในน้ำปลอดประจุแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่อง อัลตราโซนิก ประมาณ 10 นาที จากนั้นเปลี่ยนน้ำปลอดประจุ แล้วทำการเขย่าอีก 2 ครั้ง เพื่อขจัดตะกอนที่อยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางออกให้หมด
10. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเคลือบอีก 7 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-9 หลังจากครบแล้วนำมาเป่าด้วยให้แห้งด้วยความร้อนจากไคร้เป่าผม
11. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการอบสารละลายเคมีในอ่างอบสารละลายเคมีที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้



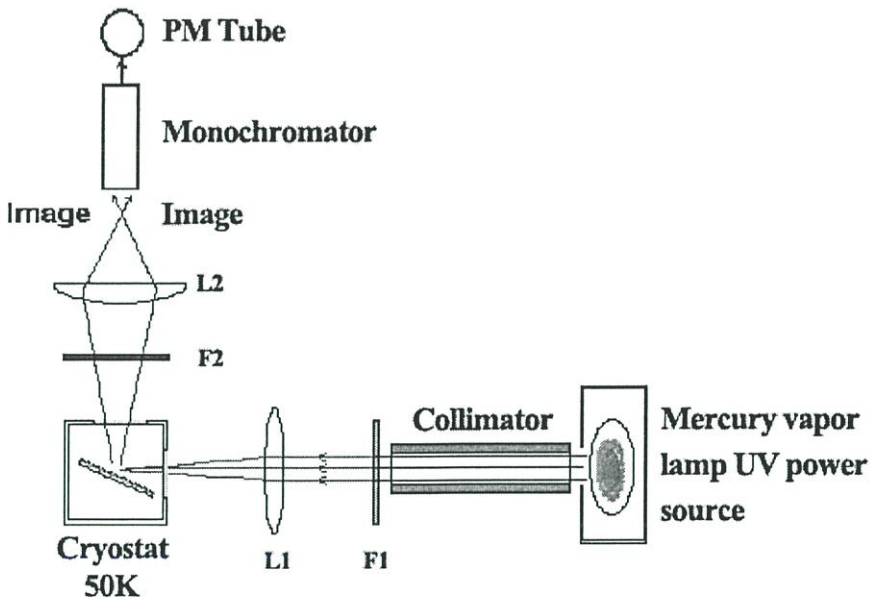
รูปที่ 3.3 แสดงระบบเตาแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์

3.3 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง

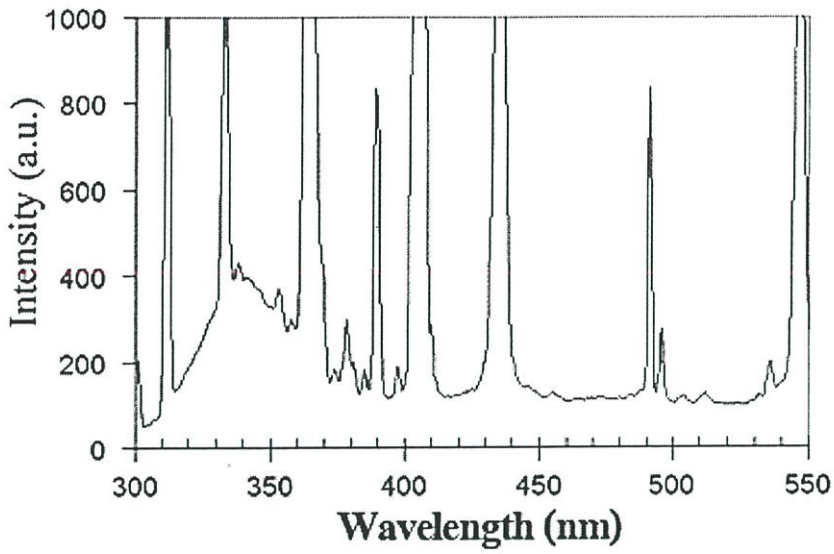
1. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์โดยใช้ความยาวคลื่น (λ) ในย่าน $\text{CuK}\alpha$ มีค่าเท่ากับ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ แรงดัน 40 กิโลโวลต์
2. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสทิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 300-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
3. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง และวัดค่าความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น
4. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำในช่วงความยาวคลื่น 400-750 นาโนเมตร โดยกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร

3.4 การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ

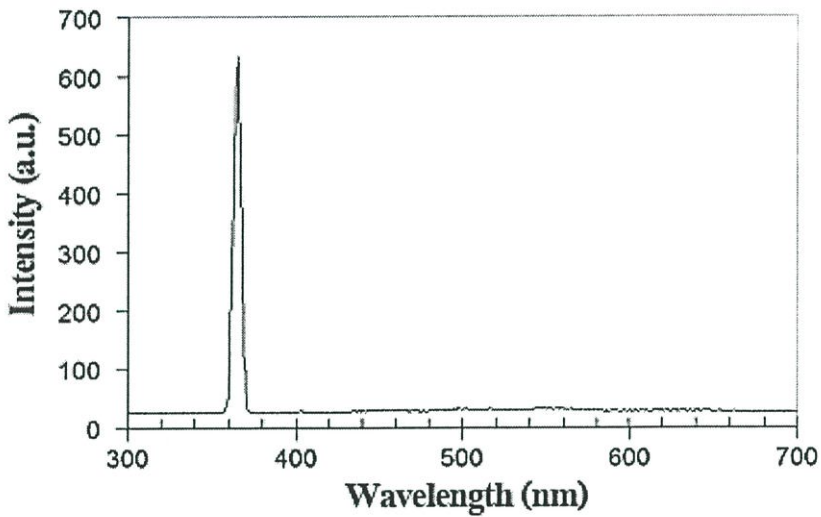
ในการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ทำการติดตั้งระบบการวัดดังรูปที่ 3.4 หลอดบรรจุไอปรอทความดันสูงเป็นแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่นรวมทั้งย่านอัลตราไวโอเล็ตถูกล้อมรอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมและเจาะช่องเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร ให้เป็นทางออกของแสงโดยมีคอลลิเมเตอร์เป็นตัวบังคับให้เป็นลำแสงขนาน แสงที่ผ่านคอลลิเมเตอร์ออกมาจะถูกกรองด้วยฟิลเตอร์ F_1 ทำให้แสงที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (อัลตราไวโอเล็ต) ผ่านไปได้เท่านั้น แสงความยาวคลื่นนี้จะถูกรวมด้วยเลนส์นูนสองหน้า (bi plano convex lense) ซึ่งมีทางยาวโฟกัส 15 เซนติเมตร ไปตกลงบนฟิล์มบางที่อยู่ภายในโคโอสตัทโดยผ่านช่องหน้าต่างที่ทำจากควอทซ์ โคโอสตัทนี้ต่อกับระบบทำความเย็นโคโอสตัทซึ่งทำอุณหภูมิได้ประมาณ 50 เคลวิน เมื่อฟิล์มบางได้รับการกระตุ้นจากพลังงานของแสงอัลตราไวโอเล็ตก็จะเกิดการเรืองแสงออกมาทางหน้าต่างอีกด้านหนึ่งโดยมีฟิลเตอร์ F_2 ทำหน้าที่ตัดแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตรออกเพื่อป้องกันความยาวคลื่นแสงที่ใช้กระตุ้นเข้าสู่ตัวรับแสง แสงที่ฟิล์มเปล่งออกมานั้นอยู่ในย่านที่ตามองเห็นจะถูกรวมโดยเลนส์นูนด้านเดียว (plano convex lense) ทางยาวโฟกัส 5 เซนติเมตร แสงที่ถูกรวมนี้จะเข้าสู่ภาครีบ (โฟโตมัลติพลายเออ) ของเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 3.4 แสดงวิธีติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ



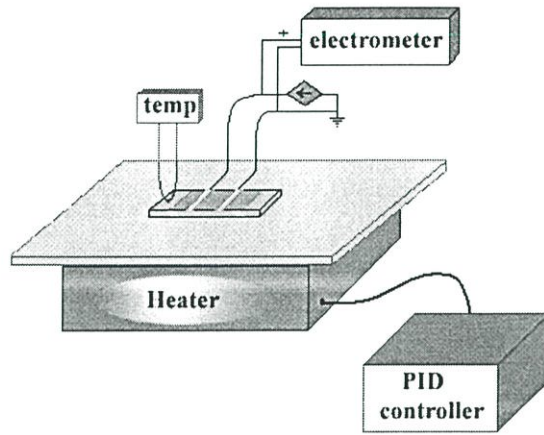
รูปที่ 3.5 แสดงสเปกตรัมของหลอดไอปรอทความดันสูงที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์



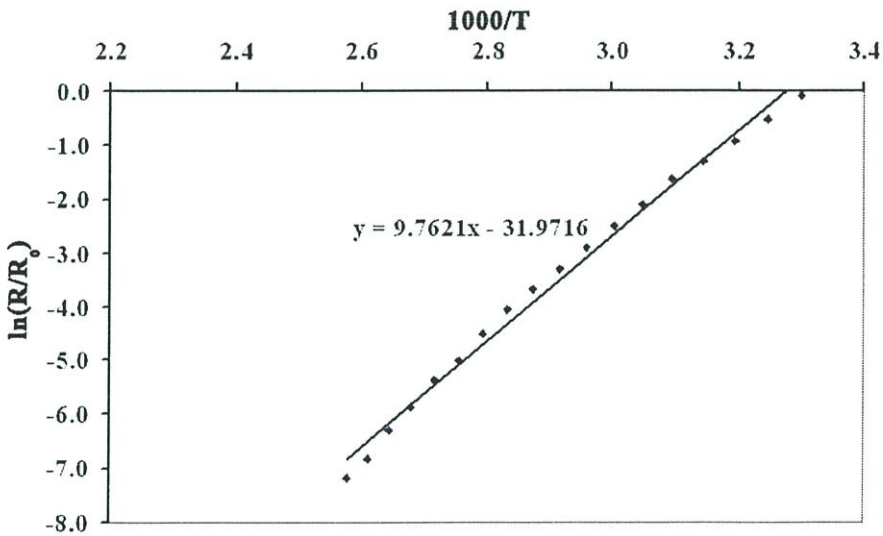
รูปที่ 3.6 แสดงสเปกตรัมของหลอดไอปรอทความดันสูงที่ผ่านฟิลเตอร์ 365 นาโนเมตร

3.5 การวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เนื่องจากการวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิต้องทำการวัดขณะที่อุณหภูมิกำลังเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเป็นแบบจ่ายกระแสคงที่ที่เพียงวัดความต่างศักย์คร่อมฟิล์มขณะนั้น ก็จะทราบความต้านทานของฟิล์มจากความสัมพันธ์ของโอห์ม เริ่มต้นการวัดที่อุณหภูมิห้องแล้ว เพิ่มอุณหภูมิเตาขึ้นในอัตรา 10°C ต่อ 10 นาที และบันทึกความต่างศักย์คร่อมฟิล์มเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปทุกๆ 10°C เช่นกัน เมื่อเสร็จสิ้นการวัดนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1000}{T}$ กับ $\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$ เมื่อ R และ R_0 คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การจัดอุปกรณ์วัดความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.8 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R/R_0)$ ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี เมื่อไม่ผ่านการแอนนีสล

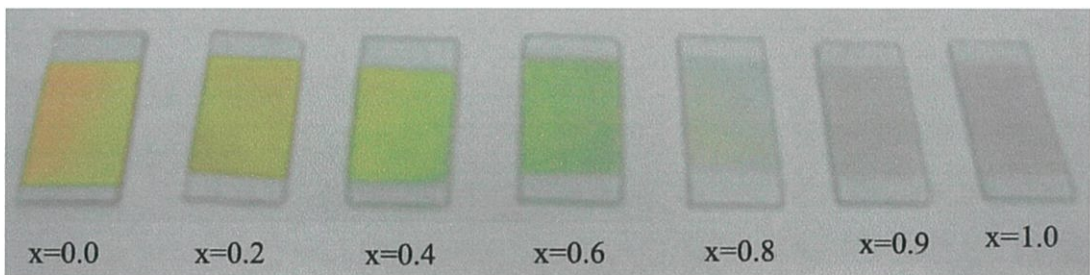
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

4.1 फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และ फिल्मบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมได้

4.1.1 फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

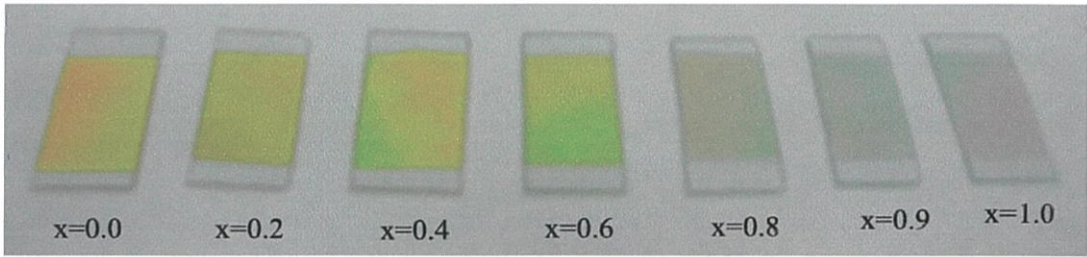
แผ่นฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดีและเหนียวยืดดี สีของแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลือง โดยความเข้มของสีเหลืองจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Zn เพิ่มขึ้น (ZnS บริสุทธิ์จะโปร่งแสง) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของท่านอื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว



รูปที่ 4.1 แสดง फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีก

4.1.2 फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการ อบสารละลายเคมี

หลังจากการเตรียม फिल्मบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี พบว่ามีตะกอนของสาร $Cd_{1-x}Zn_xS$ เหลืออยู่ในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโฮโมจีนียส (homogeneous reaction) จึงนำตะกอนของสาร $Cd_{1-x}Zn_xS$ นี้มาเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ อีกครั้ง फिल्मที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเตรียมด้วย CdS และ ZnS ที่เป็นผลึกผงบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.2

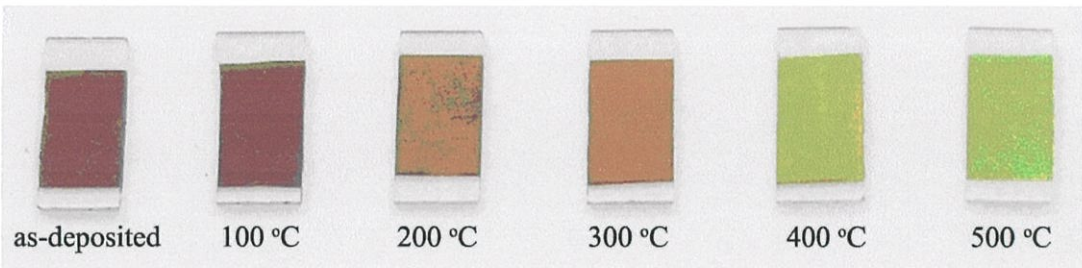


รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

4.1.3 ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ

สุญญากาศกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

ฟิล์มที่ได้ยึดติดกับกระจกสไลด์ดี และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3

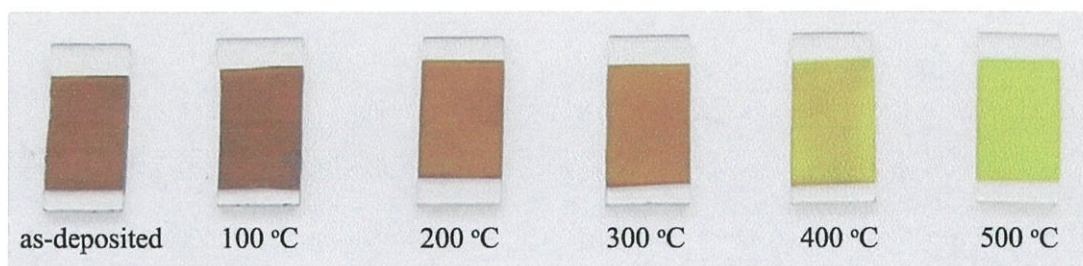


รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

4.1.4 ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ

สุญญากาศกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี

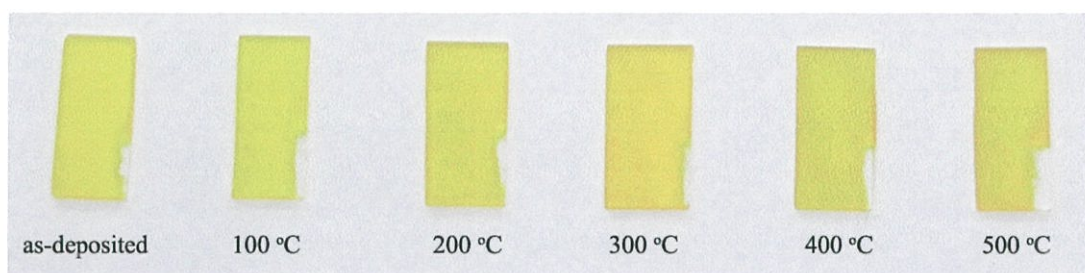
ฟิล์มที่ได้ยึดติดกับกระจกสไลด์ดี และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่ อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

4.1.5 ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

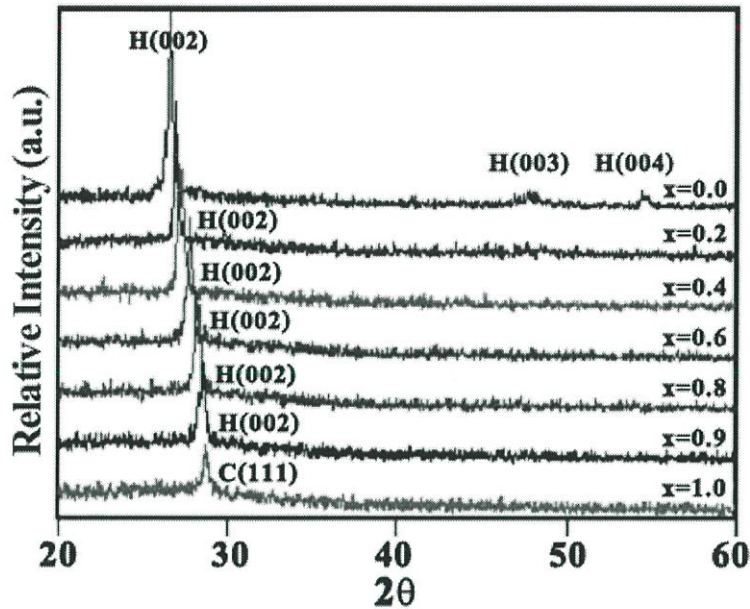
การเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ฟิล์มที่ได้ยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี จากนั้นเมื่อนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที จะได้ฟิล์มบางแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เรานำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับฟิคมাত্রาฐาน ได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิล

จากรูปที่ 4.6 ที่แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะเห็นว่าความเข้มของฟิสิกมีค่าลดลงและเลื่อนไปทางขวามือ (มุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น) เมื่ออัตราส่วนผสม(x) ของ Zn เพิ่มขึ้น ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงบริสุทธิ์ CdS และ ZnS สำหรับฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ($x < 0.9$) จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล ส่วนฟิล์มบาง ZnS จะมีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ มีทิศทางการจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ (111) ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ ZnS ตั้งแต่ 0-0.9 จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล(เวิร์ทไซท์) แต่ที่อัตราส่วนผสม(x) ของ Zn เท่ากับ 1.0 จะมีโครงสร้างแบบคิวบิก(ซิงค์เบลนด์) ซึ่งหมายถึงโครงสร้างของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะเปลี่ยนจากเฮกซะโกนัลเป็นคิวบิกเมื่ออัตราส่วนผสม(x) มากกว่า 0.9 นอกจากนี้ยังพบว่ามุมของการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (002) จะเลื่อนไปยังมุมสูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ Zn ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าค่าคงที่โครงสร้างของระนาบ (002) ลดลงนั่นเอง โดยธรรมชาติ CdS และ ZnS จะมีโครงสร้างทั้งแบบเฮกซะโกนัลและแบบคิวบิก ถ้าพิจารณาระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันบนระนาบ (002)

ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก จะเห็นว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (a_0 , c_0) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (a) ได้ โดยมีวิธีการคำนวณ a_0 กับ c_0 สำหรับทุกส่วนประกอบของแผ่นฟิล์มดังนี้[2]

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

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

ในทำนองเดียวกัน

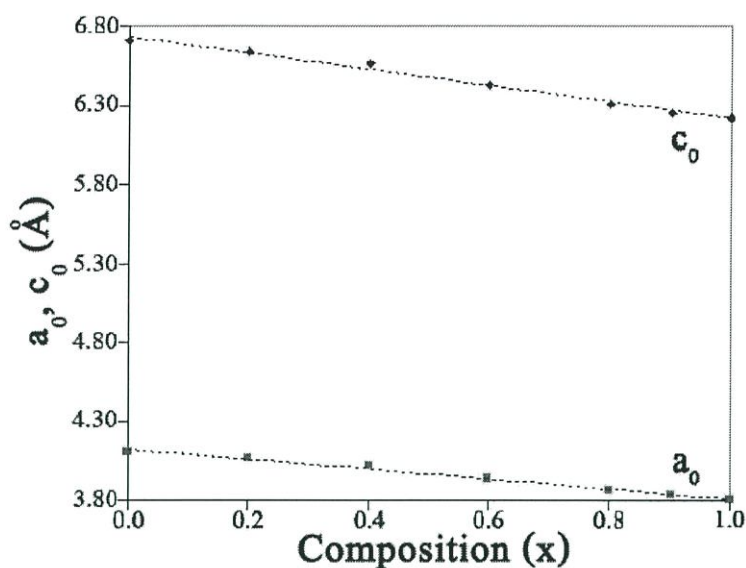
$$d_{110} = d_{220} \quad (4.3)$$

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

การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 เมื่อคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีกแสดงดังตารางที่ 4.1

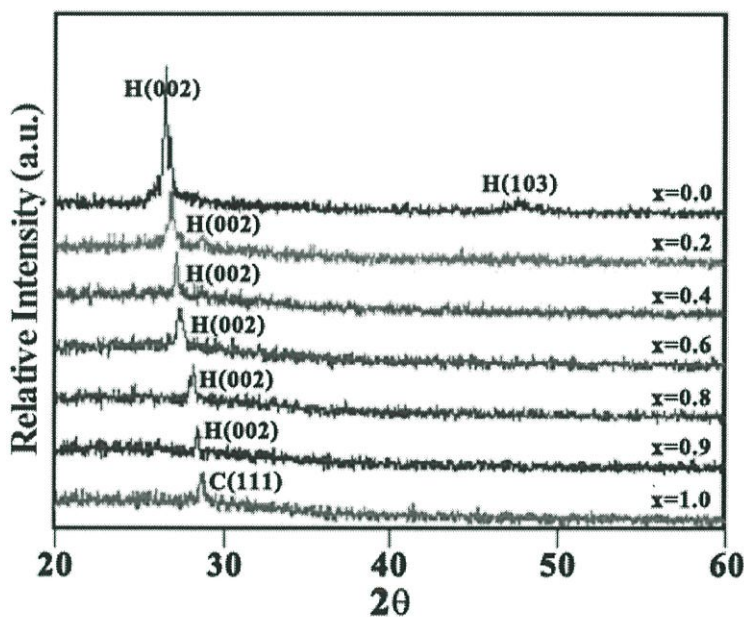
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก, FWHM, ขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีก

Composition (x) of Zn	a_0 (Å)	c_0 (Å)	FWHM	Grain size(nm)
0.0	4.12	6.72	0.212	42
0.2	4.06	6.64	0.240	34
0.4	4.02	6.56	0.246	31
0.6	3.94	6.43	0.298	28
0.8	3.86	6.31	0.336	25
0.9	3.83	6.25	0.354	23
1.0	3.81	6.22	0.371	22



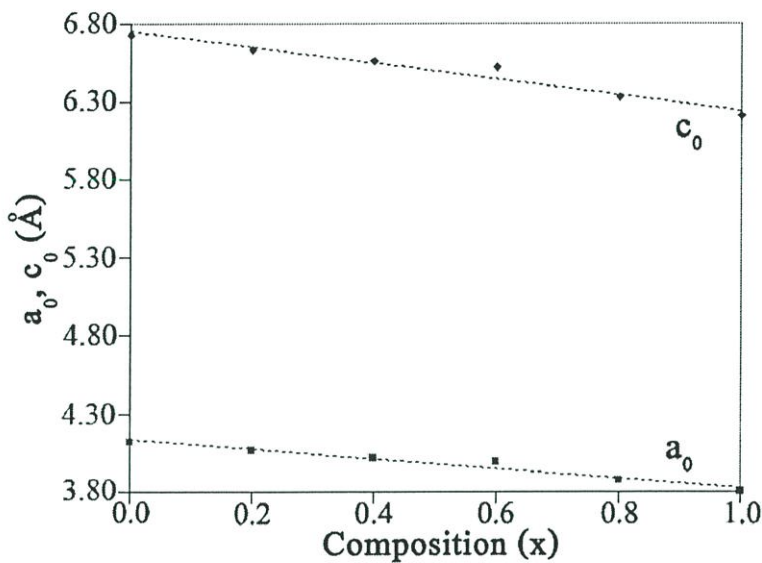
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆกับ a_0 , c_0 (Å) ในกรณี
ที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

โดยเส้นประจะเชื่อมค่าคงที่ของโครงผลึกของแผ่นฟิล์ม CdS กับฟิล์ม ZnS เข้าด้วยกัน ลักษณะ
การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงผลึกจะลดลงแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของเวการ์ด์
(Vegard's Law) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากรัศมีไอออนของ Zn^{2+} มีขนาดเล็กกว่ารัศมีไอออนของ Cd^{2+}



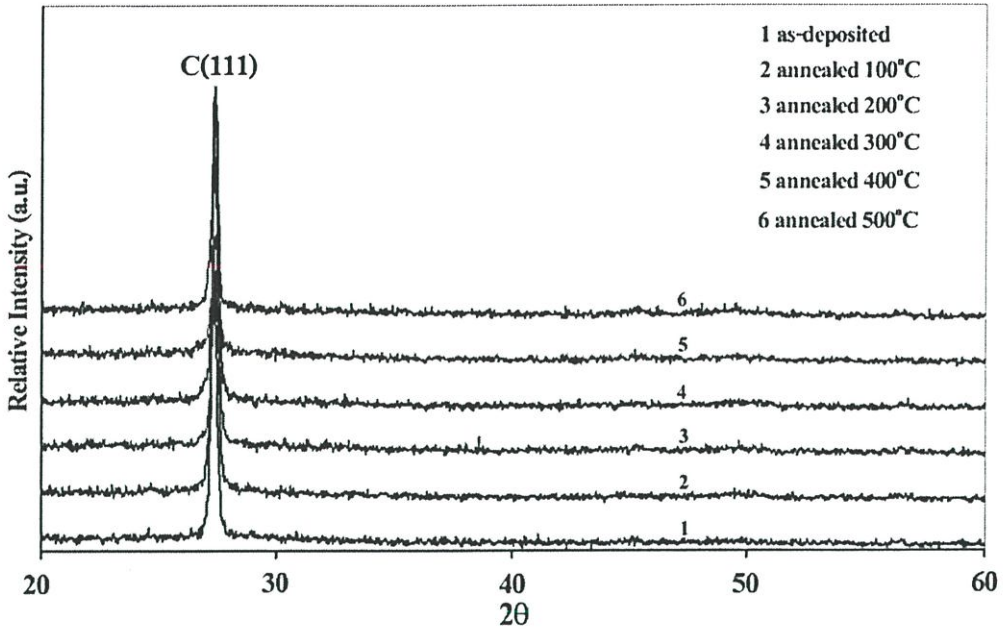
รูปที่ 4.8 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x)ของ Zn ค่าต่างๆ
ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็น
ผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่
มีการแอนนีกัล

จากการวิเคราะห์แนวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า ความเข้มของพีคจะมีค่าลดลงและพีคจะเลื่อนไปทางขวามือ (มุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น) เมื่ออัตราส่วนผสม(x) ของ Zn เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6 แล้วพบว่าพีคที่ได้ในแต่ละส่วนผสมของ Zn นั้นมีโครงสร้างผลึกในแบบเดียวกันแต่ความเข้มของพีคจะต่ำกว่าของฟิล์มบางที่เตรียมโดยสารตั้งต้นเป็น CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณ a_0 กับ c_0 ได้ด้วยวิธีเดียวกับฟิล์มบางที่เตรียมโดยสารตั้งต้น CdS และ ZnS บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.9 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ กับ a_0 , c_0 (Å) ในกรณี ที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล

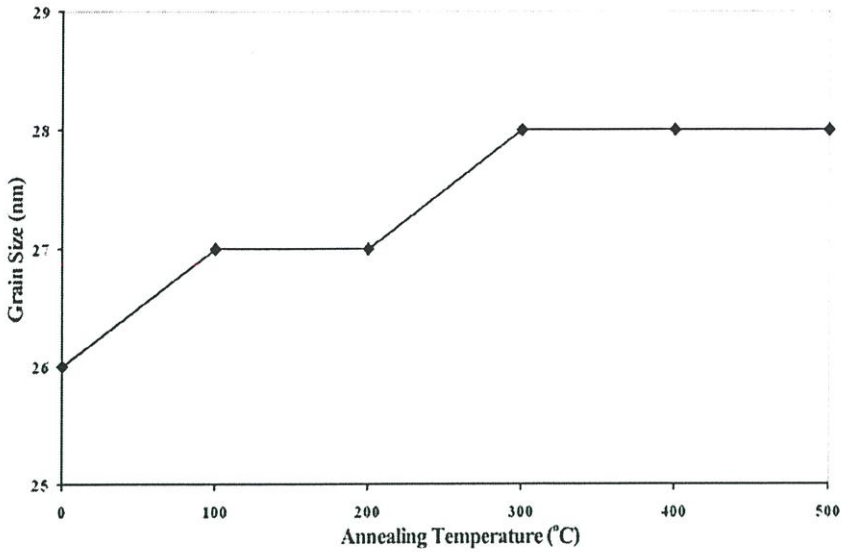
จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.12 จะสังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S: B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% มีความเป็นผลึกที่ดี สังเกตได้จากลักษณะของพีคซึ่งมีความคมชัด โครงสร้างเป็นแบบคิวบิก มีพีคที่ระนาบ (111) ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 27 องศา เมื่อทำการแอนนีสลที่อุณหภูมิต่างๆ ผลของการแอนนีสลไม่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึกมากนัก ในขณะที่ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S: B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี จะได้ผลใกล้เคียงกัน แต่ความสูงของพีคจะน้อยกว่า บอกลักษณะโครงสร้างผลึกที่มีความเป็นระเบียบน้อยกว่า อุณหภูมิแอนนีสลมีผลต่อขนาดของเกรนค่อนข้างน้อย ดูได้จากขนาดของเกรนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิแอนนีสลเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.13



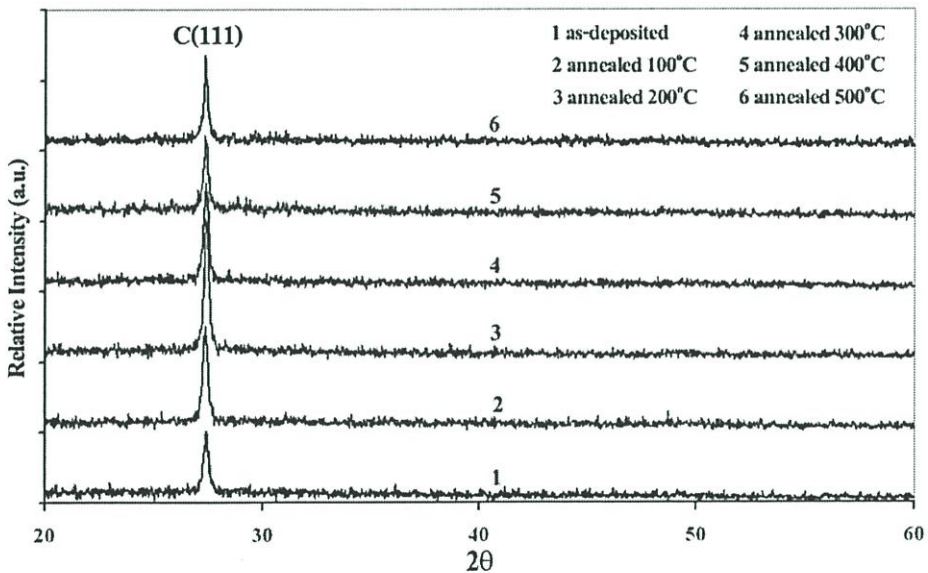
รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM และขนาดของเกรนที่คำนวณมาจากกราฟ XRD ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature(°C)	Lattice Constants(Å)	FWHM	Grain Size (nm)
As-deposited	5.648	0.287	26
100	5.648	0.285	27
200	5.630	0.285	27
300	5.630	0.282	28
400	5.642	0.274	28
500	5.642	0.273	28



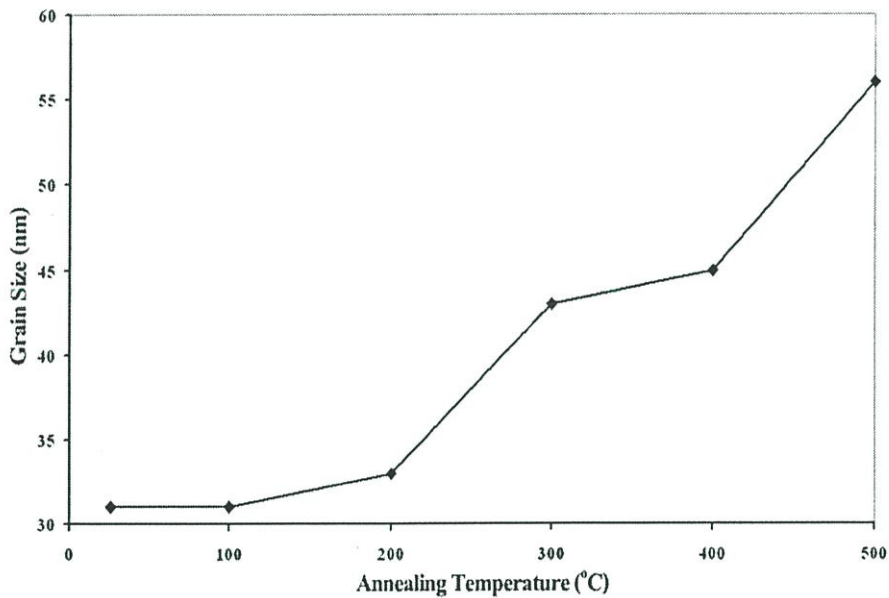
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับอุณหภูมิแอนนีกัลของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีกัลและเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกัลและเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

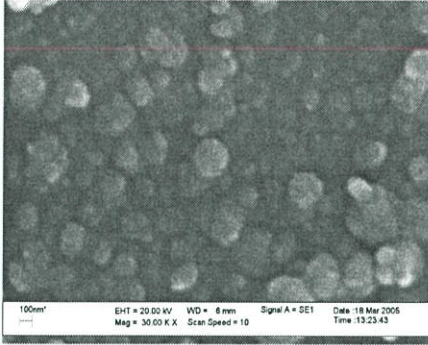
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM และขนาดของเกรนที่คำนวณมาจากกราฟ XRD ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature(°C)	Lattice Constants(A°)	FWHM	Grain Size (nm)
As-deposited	6.498	0.293	31
100	6.504	0.295	31
200	6.504	0.273	33
300	6.504	0.212	43
400	6.516	0.202	45
500	6.516	0.161	56

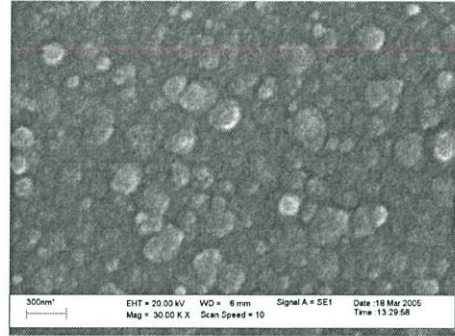


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับอุณหภูมิแอนนีสของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

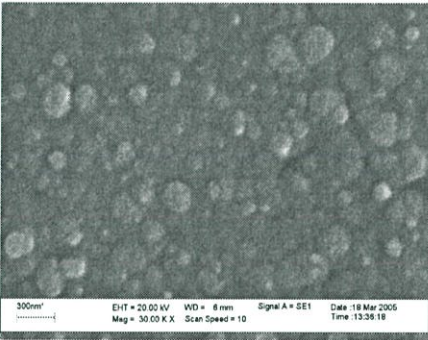
4.3 ผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



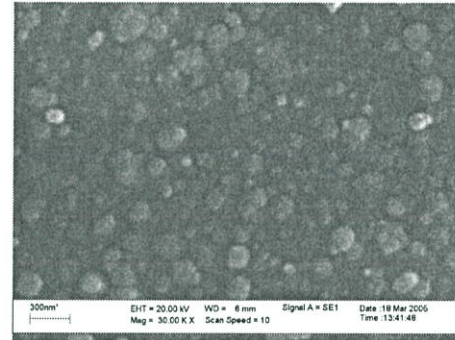
As-deposited



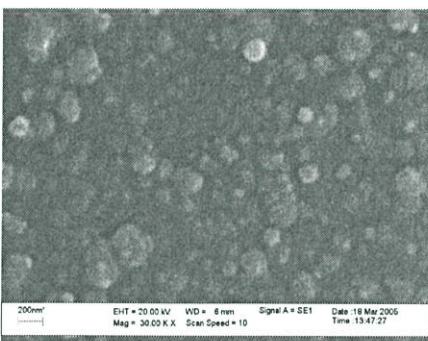
100°C



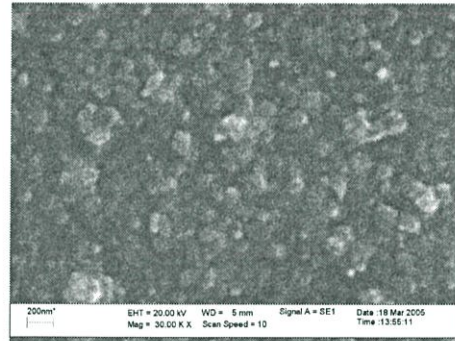
200°C



300°C



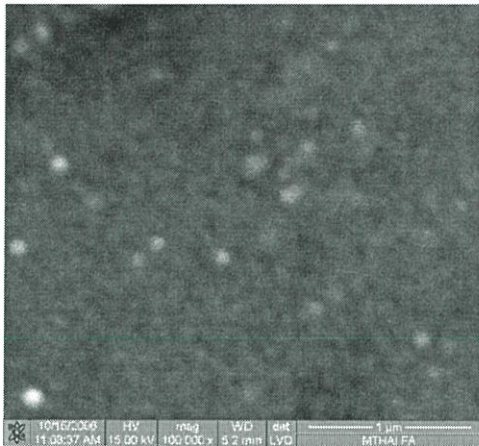
400°C



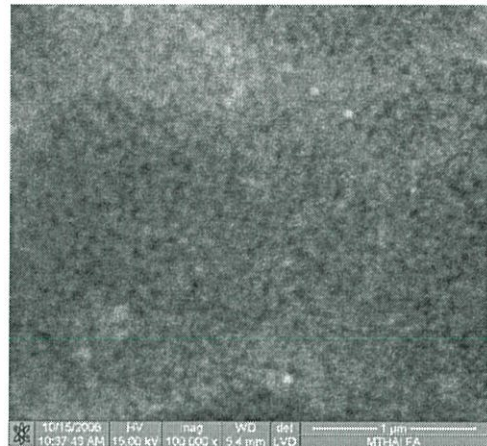
500°C

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

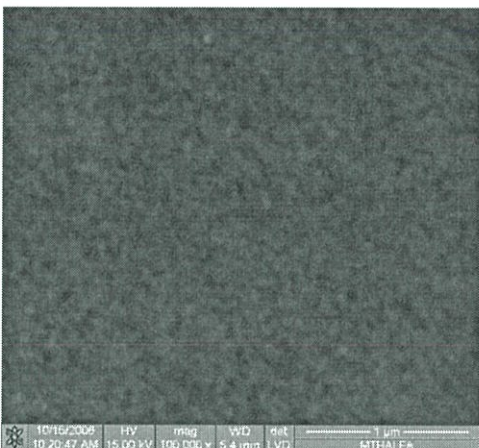
จากรูปที่ 4.14 พบว่าเกรนที่ได้จะมีรูปร่างค่อนข้างกลม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนัลทำให้ขอบเขตของเกรนชัดเจนขึ้น และมีขนาดโตขึ้น ที่ผิวหน้าฟิล์มบางมีอนุภาคกลมขนาดใหญ่ซึ่งเป็นอนุภาคของ CdS บอกลถึงการมีกระบวนการโฮโมจีเนียสเกิดขึ้นด้วย และอนุภาค CdS ดังกล่าวจะลดขนาดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น



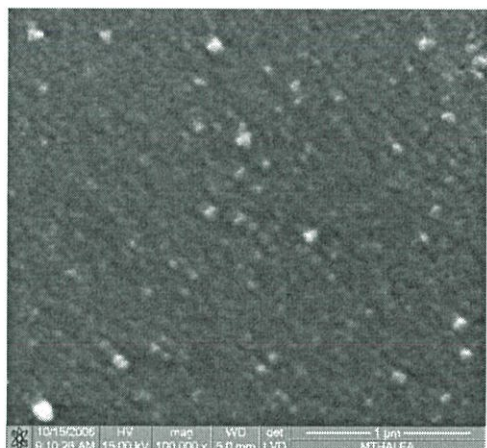
x = 0.2



x=0.4



x=0.6

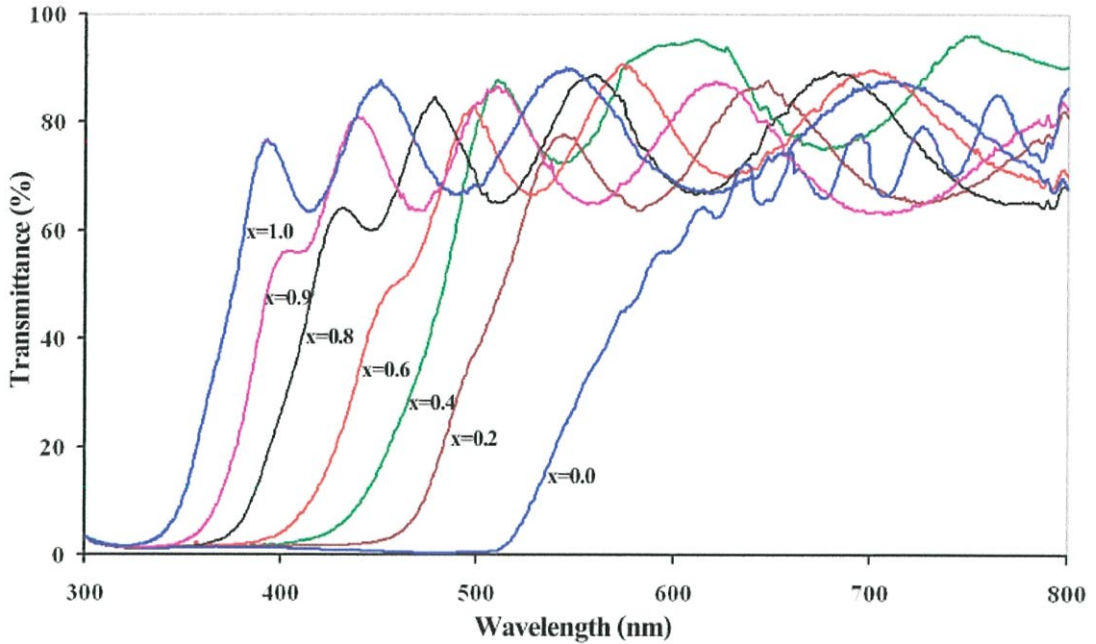


x=0.8

รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ $x = 0.2$ ถึง $x=0.8$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล ที่ถ่ายโดย FESEM กำลังขยาย 100,000 เท่า

จากการนำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ไปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 100,000 เท่า ปรากฏว่าภาพที่ได้เห็นเกรนไม่ชัด เนื่องจากเกรนมีขนาดเล็กมาก จึงไม่สามารถอธิบายอะไรได้มากนัก

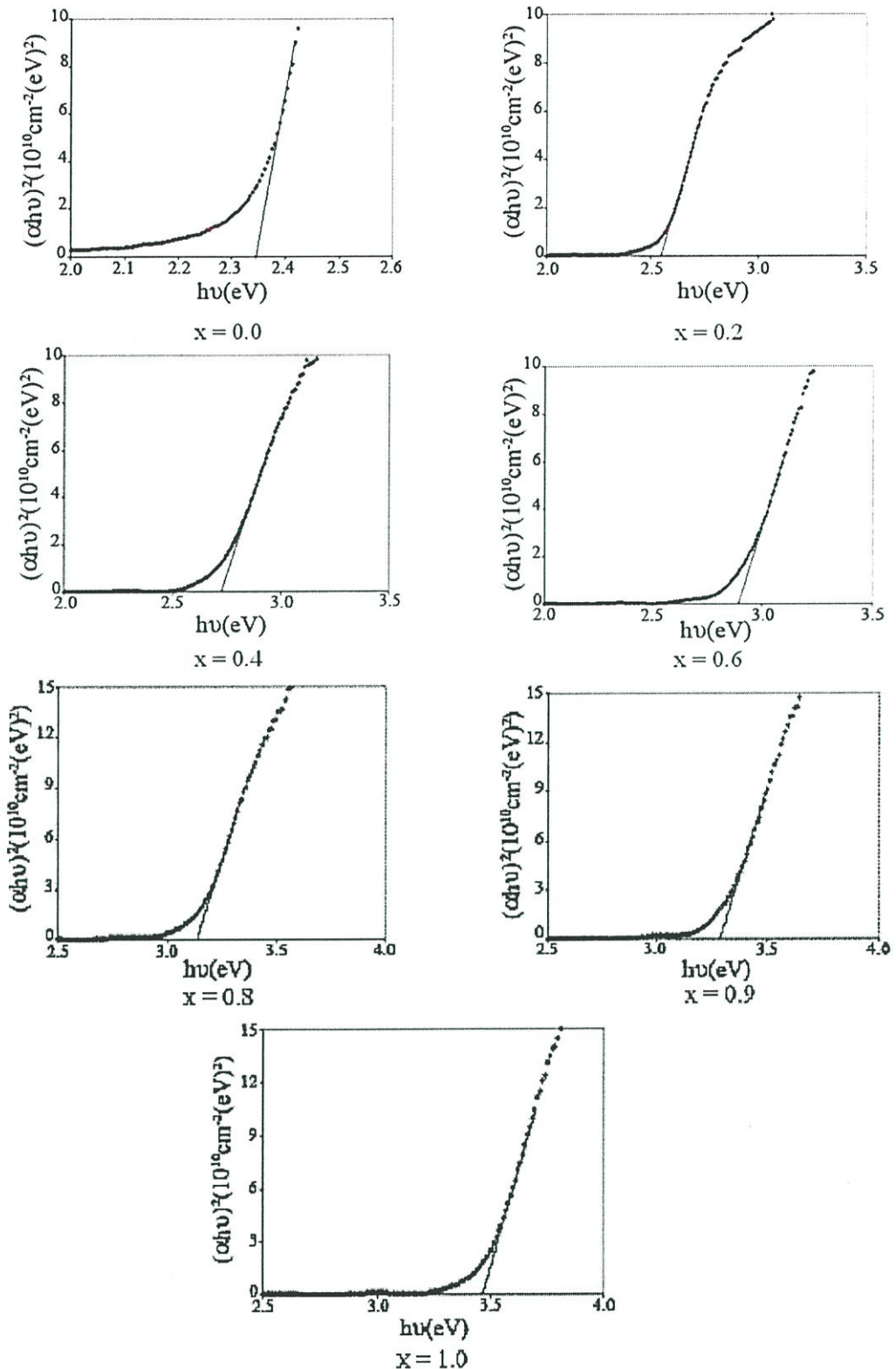
4.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง



รูปที่ 4.16 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล

รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดคัมเบลบีม ยี่ห้อ JASCO 7800 ที่ช่วงความยาวคลื่น 300–800 นาโนเมตร พบว่าขอบของการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นกว่า เมื่อสัดส่วนการเจือ Zn เพิ่มมากขึ้น บอกถึงค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อเจือ Zn เพิ่มมากขึ้น

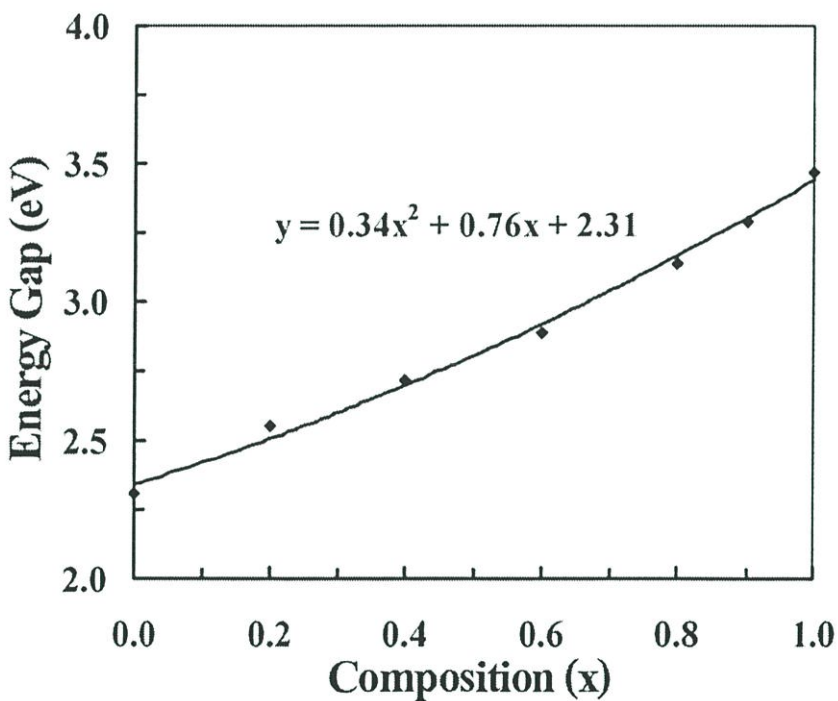
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยทำการลากเส้นตรงการประมาณค่า(extrapolation) ของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้น ไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงและค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ Zn มากขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในที่กรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

Composition (x) of Zn	Energy Gap (eV)
0.0	2.31
0.26	2.55
0.4	2.72
0.6	2.89
0.8	3.14
0.9	3.29
1.0	3.47



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

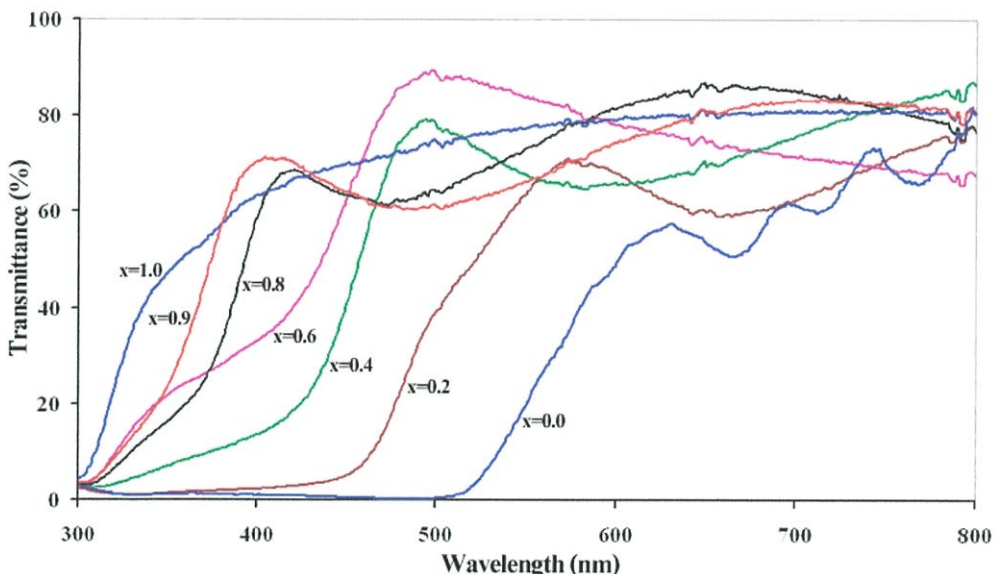
จากรูปที่ 4.18 บอกให้ทราบว่าอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ของฟิล์มบางนั้นสามารถกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ สำหรับกรณีนี้ค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.31 – 3.47 eV (x = 0 ถึง x = 1.0) ค่าของช่องว่างแถบพลังงาน $E_g(x)$ หาได้จากสมการ[2]

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

เมื่อ $E_g(CdS)$ และ $E_g(ZnS)$ คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdS และ ZnS ตามลำดับและ b คือ ค่าพารามิเตอร์โบว์ริง (bowing parameter) โดยที่สมการของผลึกเดี่ยว(single crystal) คือ[41]

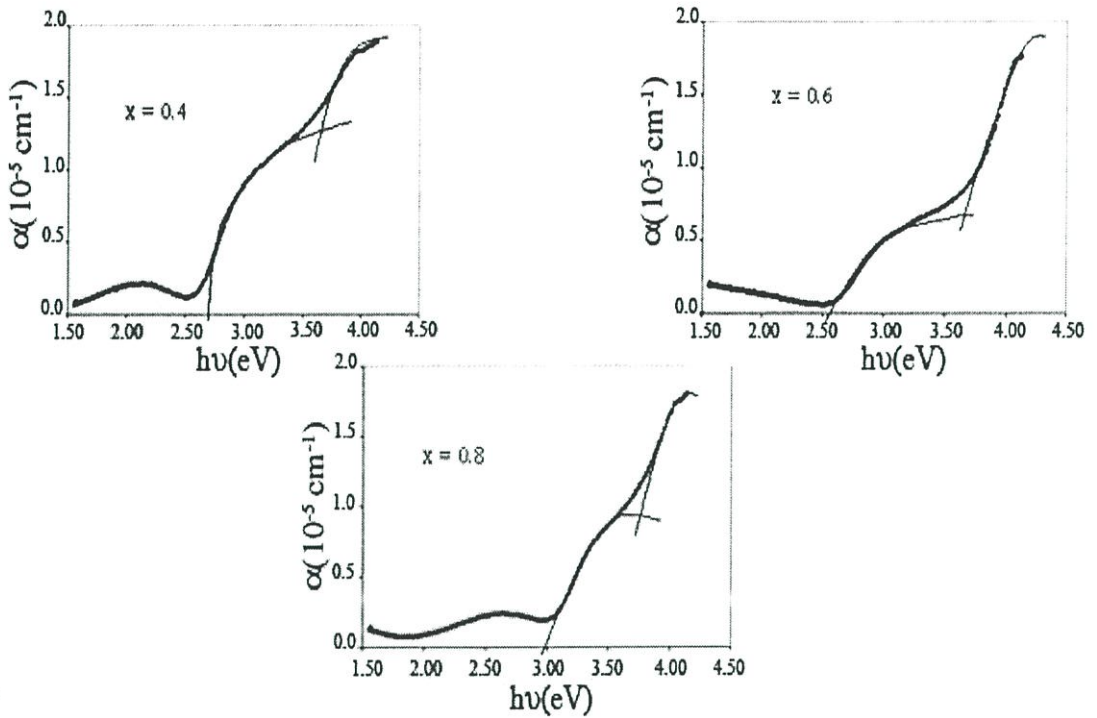
$$E_g(x) = E_g(CdS) + 0.9x + 0.3x^2$$

จากรูปที่ 4.18 ค่าบนเส้นทึบเป็นการนำค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากการทดลองมาพลอตในรูปสมการกำลังสอง สำหรับฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลจะให้ค่า $E_g(CdS) = 2.31$ eV, $E_g(ZnS) = 3.47$ eV และ $b = 0.34$ eV



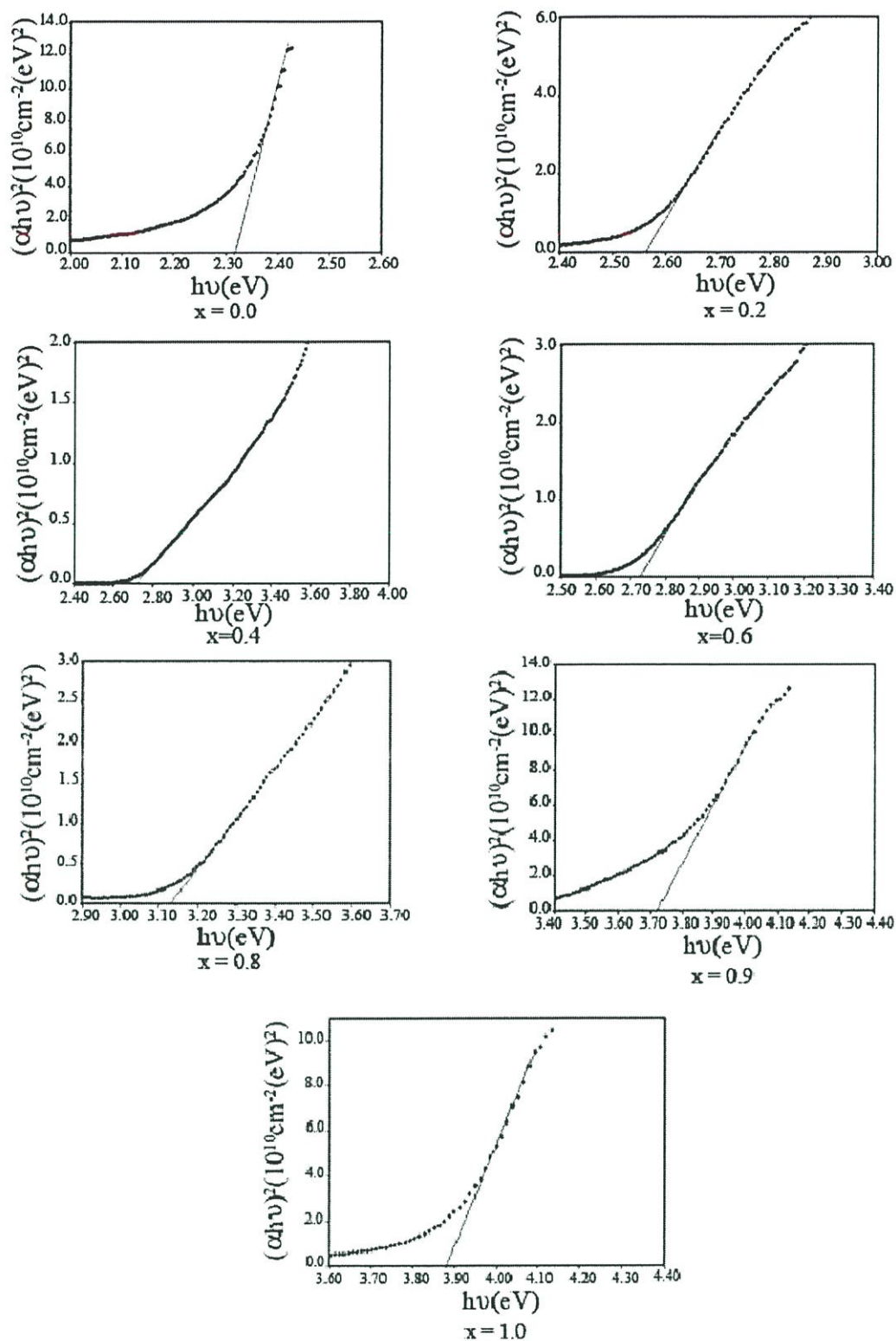
รูปที่ 4.19 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

สำหรับฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อดูจากกราฟระหว่าง α กับ $h\nu$ พบว่าที่ $x = 0.4, 0.6$ และ 0.8 มีค่า E_g มากกว่า 1 ค่า ดังรูปที่ 4.20



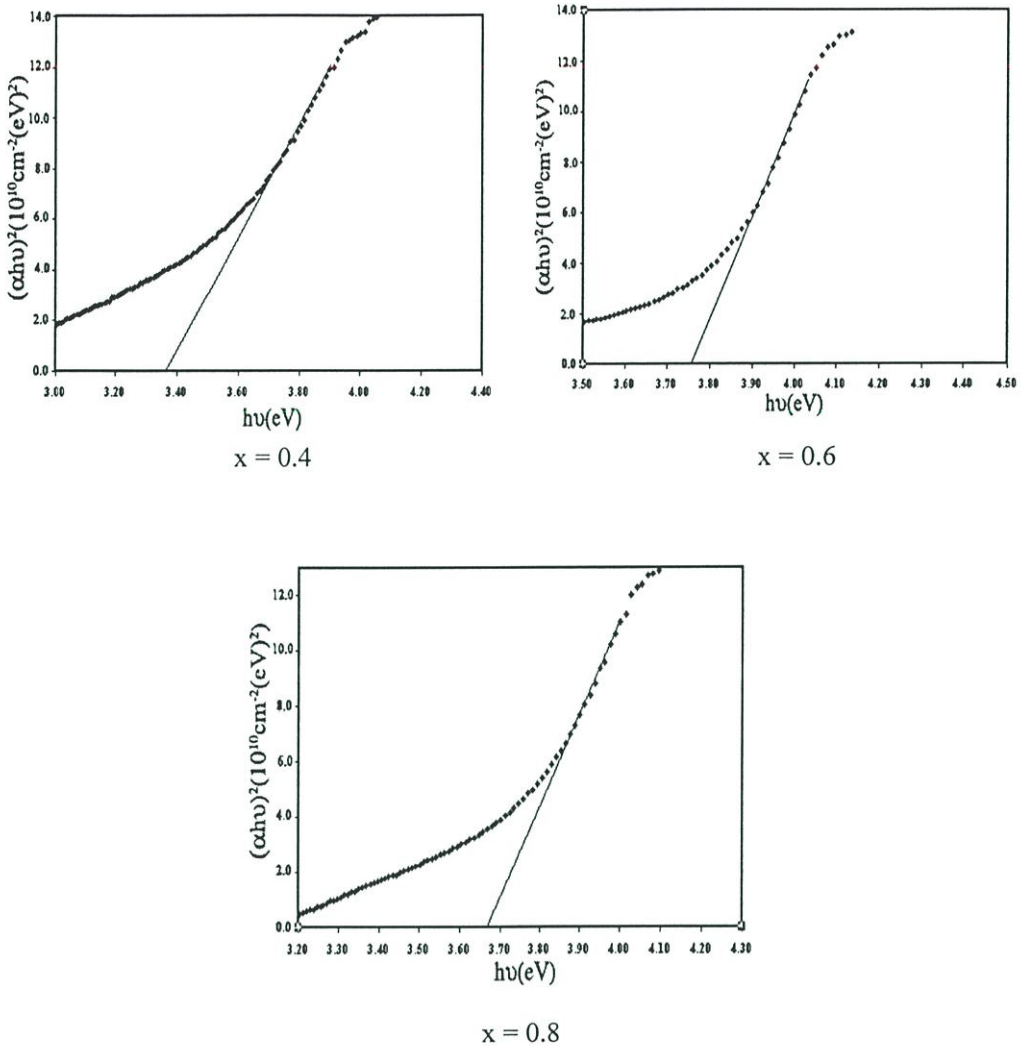
รูปที่ 4.20 กราฟระหว่าง α กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่การแอนนีส เพื่อแสดงว่ามี E_g มากกว่า 1 ค่า

เขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เพื่อหาค่า E_{g1} ได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیل เพื่อการหาค่า E_g

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เพื่อการหาค่า E_{g2} ดังรูปที่ 4.22

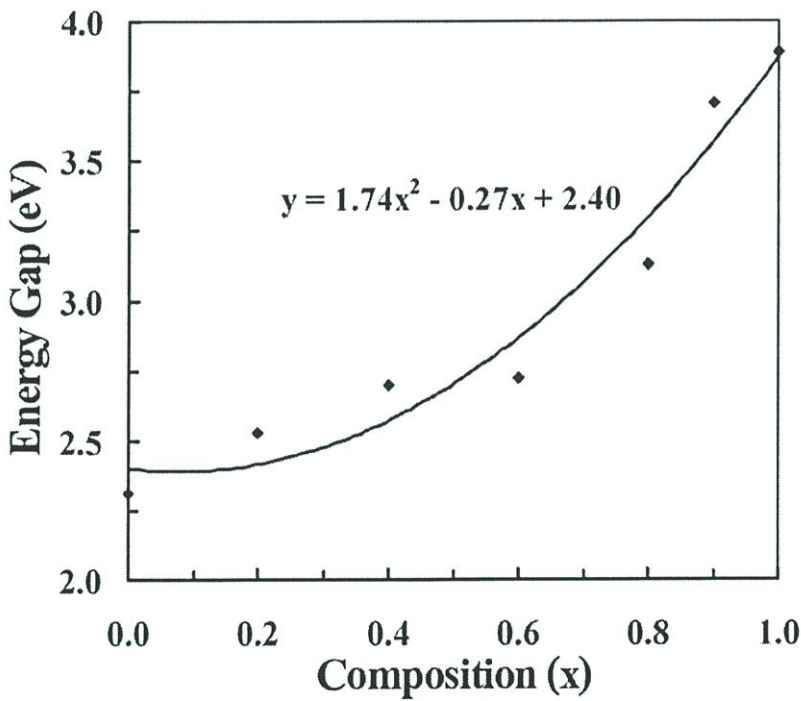


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیل เพื่อการหาค่า E_{g2}

พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่ออัตราส่วนผสมของ Zn มากขึ้น จะทำให้มีค่า E_g มากขึ้นและบางอัตราส่วนผสม (x) ของ Zn จะให้ค่า E_g มากกว่า 1 ค่า ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

Composition (x) of Zn	Energy Gap: E_{g1} (eV)	Energy Gap: E_{g2} (eV)
0.0	2.31	-
0.2	2.53	-
0.4	2.70	3.36
0.6	2.72	3.75
0.8	3.13	3.67
0.9	3.71	-
1.0	3.89	-

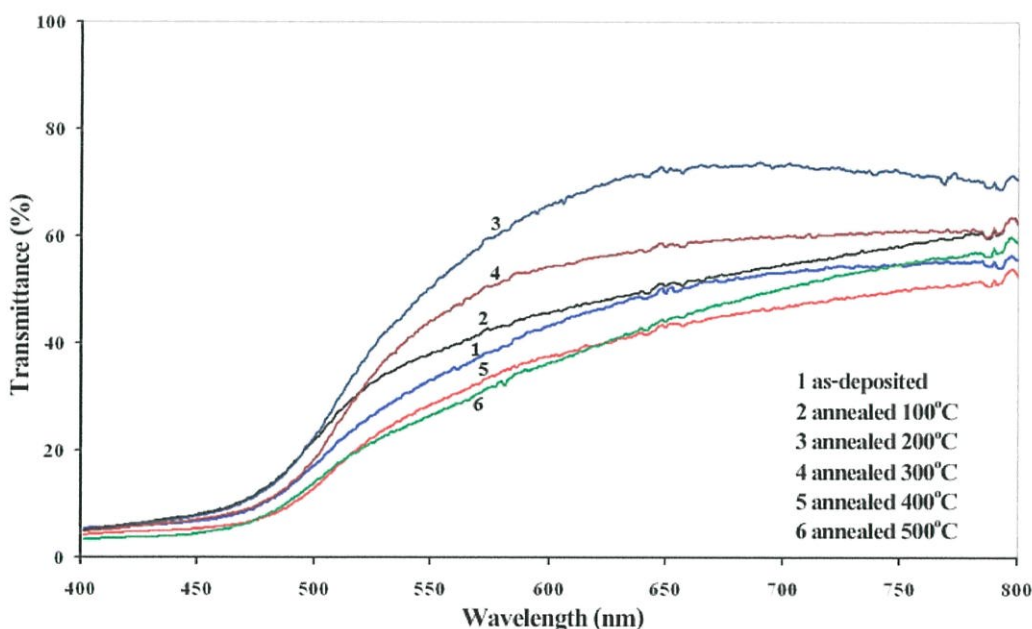


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ กับอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

จากรูปที่ 4.23 फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส มีค่า E_{g1} อยู่ในช่วง 2.31 – 3.89 (x=0 ถึง x=1.0) และมีค่า $E_{g1}(CdS) = 2.31$ eV, $E_{g1}(ZnS) = 3.89$ eV และ $b = 1.74$ eV

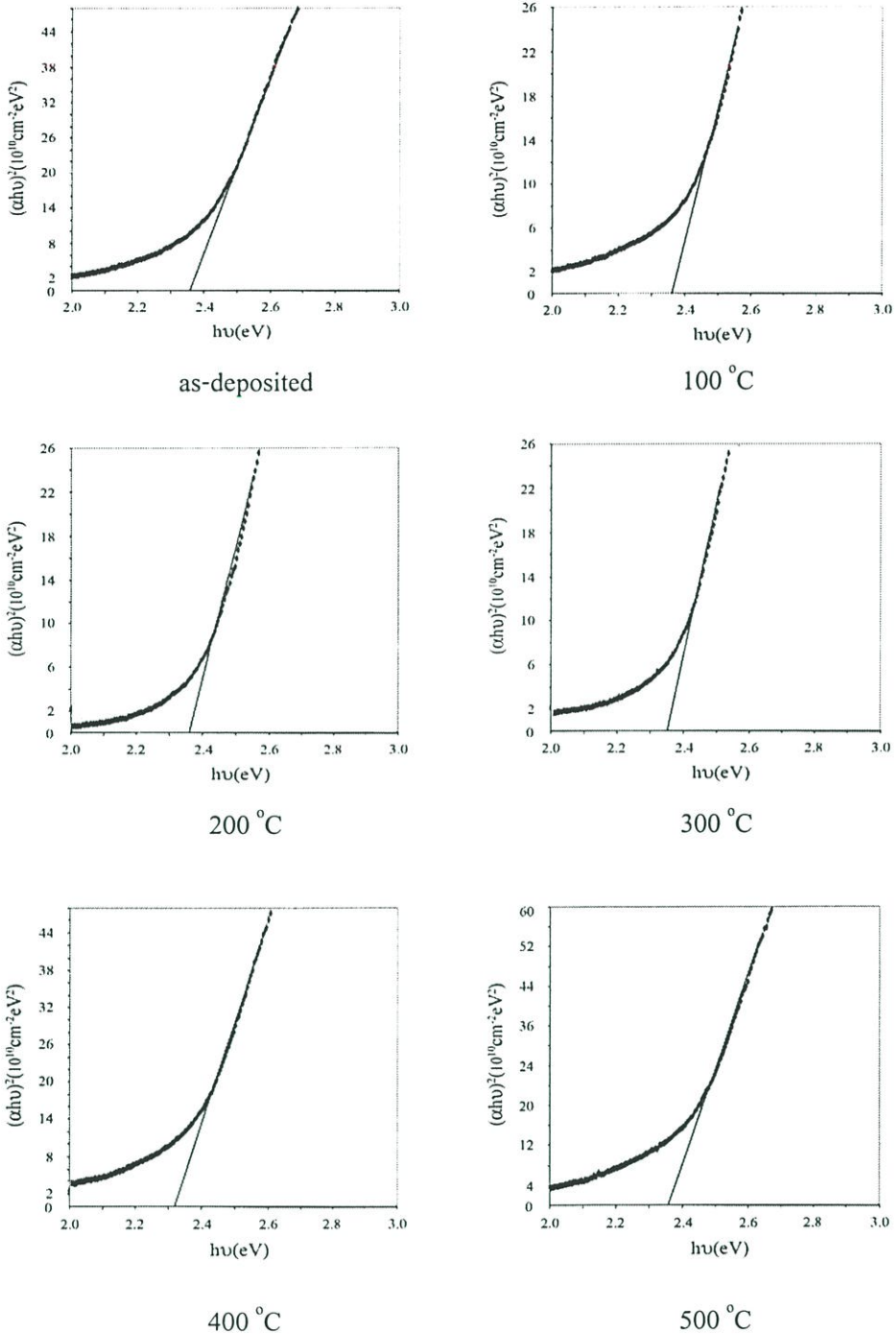
จะพบว่า फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส มีค่าพารามิเตอร์โบว์ริงใกล้เคียงกับผลึกเดี่ยวมากกว่ากรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี บอกลถึงคุณภาพ फिल्मบางที่ดีกว่า นอกจากนี้ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ยังมีค่าช่องว่างแถบพลังงานมากกว่า 1 ค่า แสดงว่านอกจากเกิด फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ แล้วยังมีเฟสอื่นผสมอยู่ด้วย

จากนั้นทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของ फिल्मบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อหาค่า E_g เช่นเดียวกัน

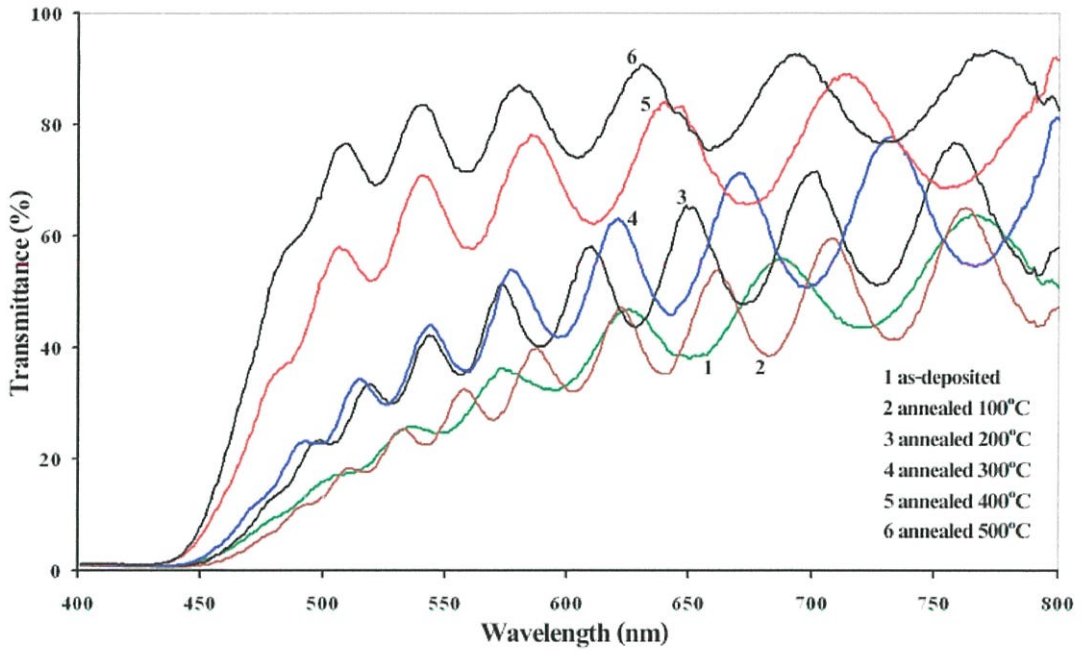


รูปที่ 4.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของ फिल्मบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.24 จากกราฟการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ แสดงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน($h\nu$) เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.25

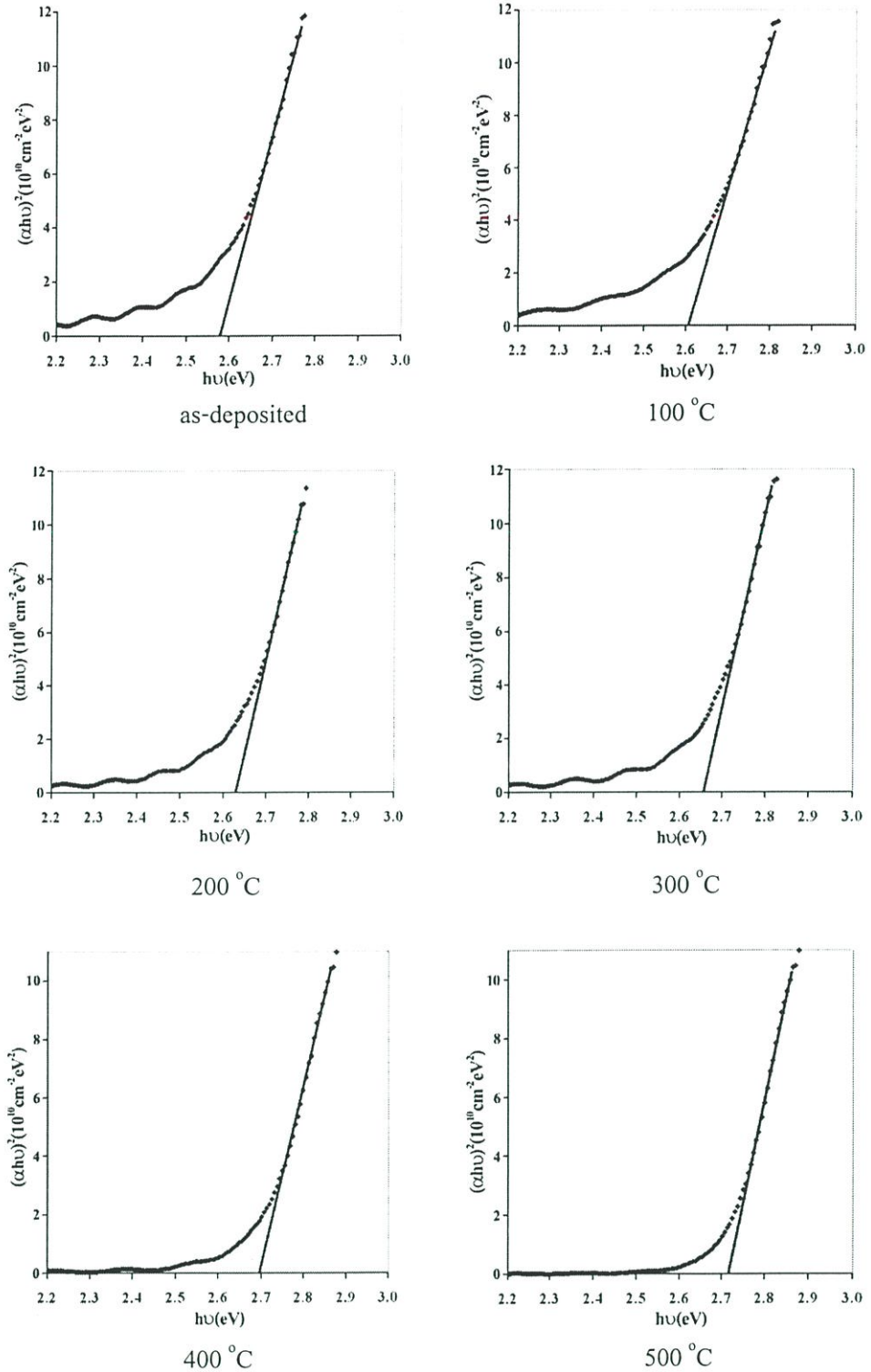


รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

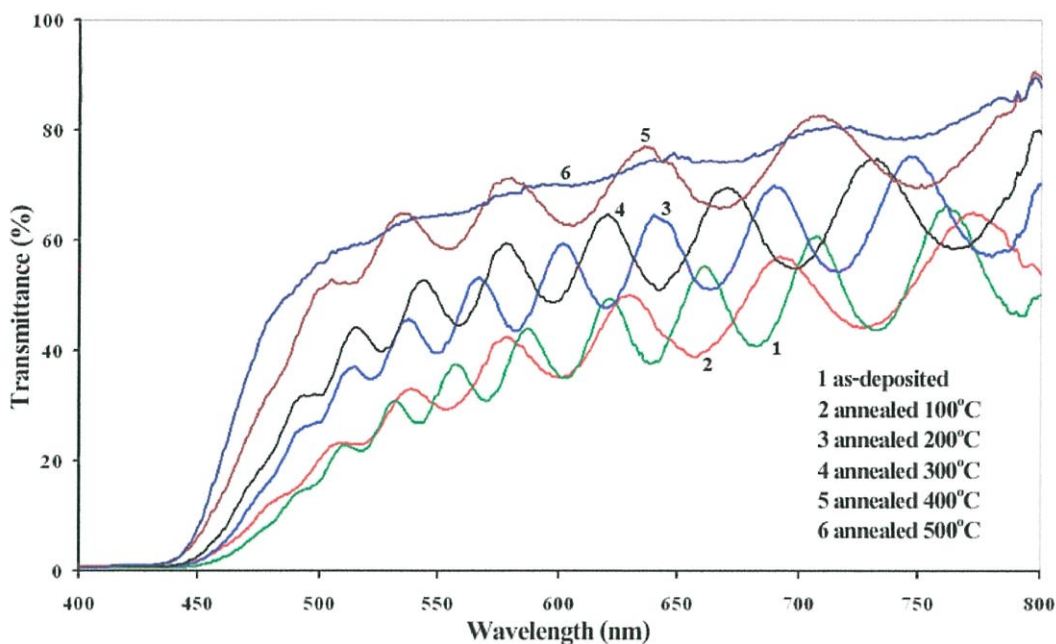


รูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 - 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.26 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) แสดงดังในรูปที่ 4.27

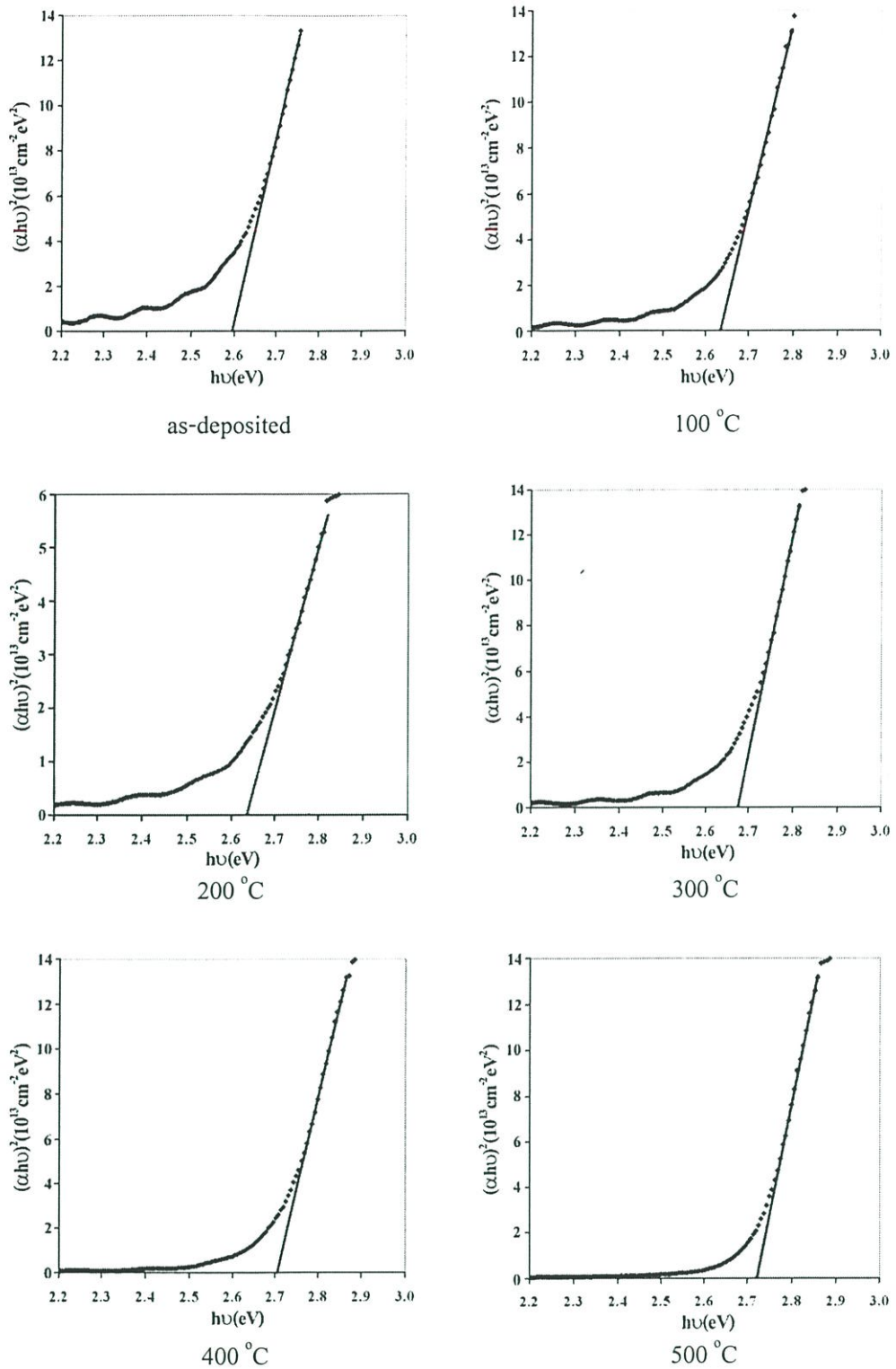


รูปที่ 4.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100\text{-}500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

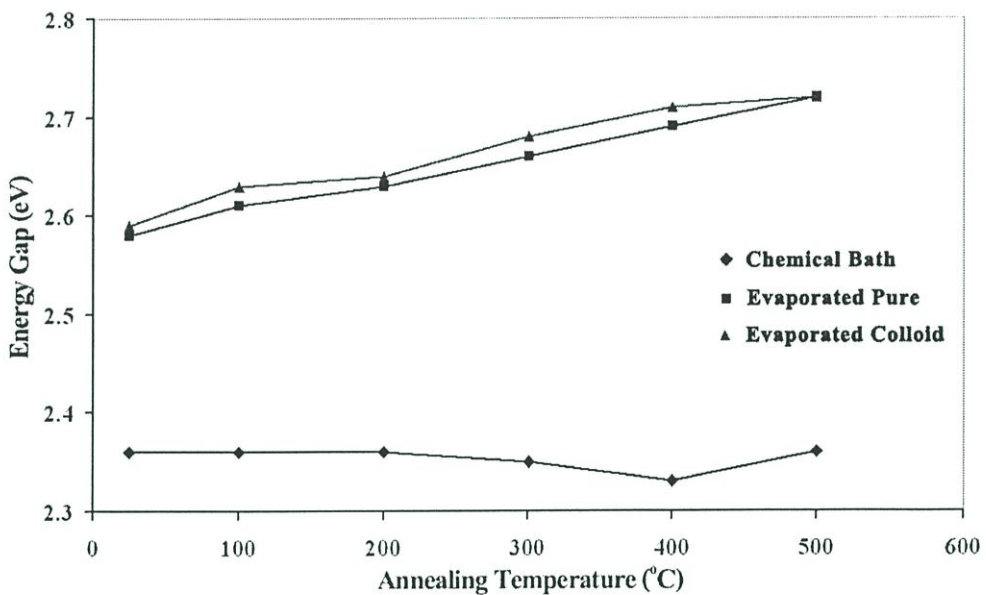
จากรูปที่ 4.24 จะพบว่าฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี การเพิ่มอุณหภูมิแอนนีสจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางมากนัก ในขณะที่ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีขอการดูดกลืนแสงจะเลื่อนมาทางด้านความยาวคลื่นน้อยลงและมีขอการดูดกลืนชัดเจนมากขึ้นตามอุณหภูมิแอนนีสที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.26 และ 4.28 การที่ขอการดูดกลืนมีความชันมากขึ้นบอกถึงลักษณะ โครงผลึกที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

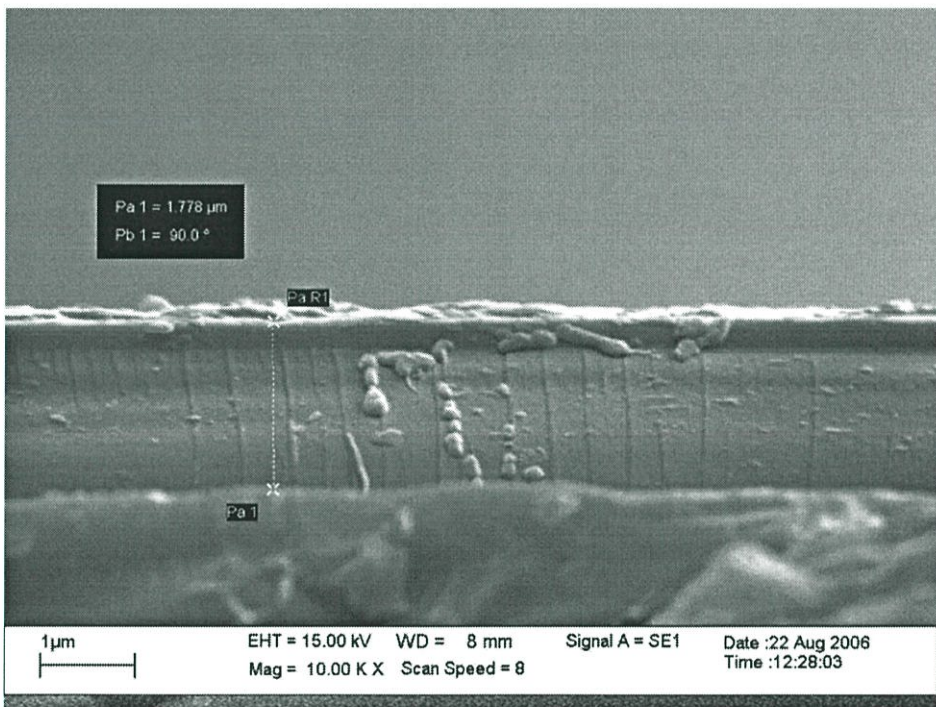
Annealing Temperature (°C)	Energy Gap (eV)		
	Chemical Bath	Evaporated Pure	Evaporated Colloid
As-deposited	2.36	2.58	2.59
100	2.36	2.61	2.63
200	2.36	2.63	2.64
300	2.35	2.66	2.68
400	2.33	2.69	2.71
500	2.36	2.72	2.72



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.30 พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัลที่สูงขึ้น ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมได้โดยวิธีอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที จะมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 2.37 อิเล็กตรอน โวลต์ และเริ่มลดลงที่อุณหภูมิแอนนัล 300 องศาเซลเซียส จนลดลงต่ำสุดที่ 2.33 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิแอนนัล 400 องศาเซลเซียส โดยช่วงที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงอาจมาจากการที่ผลึกมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น จากนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานจะกลับเพิ่มสูงขึ้น

การหาความหนาของฟิล์มบางโดยสเปกตรัมการส่งผ่านแสง



รูปที่ 4.31 แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความหนาที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature(°C)	Thickness(nm)	
	Evaporated Pure	Evaporated Colloid
As-deposited	1750	1756
100	1295	1653
200	1224	1824
300	1702	1544
400	1296	1634
500	1715	-

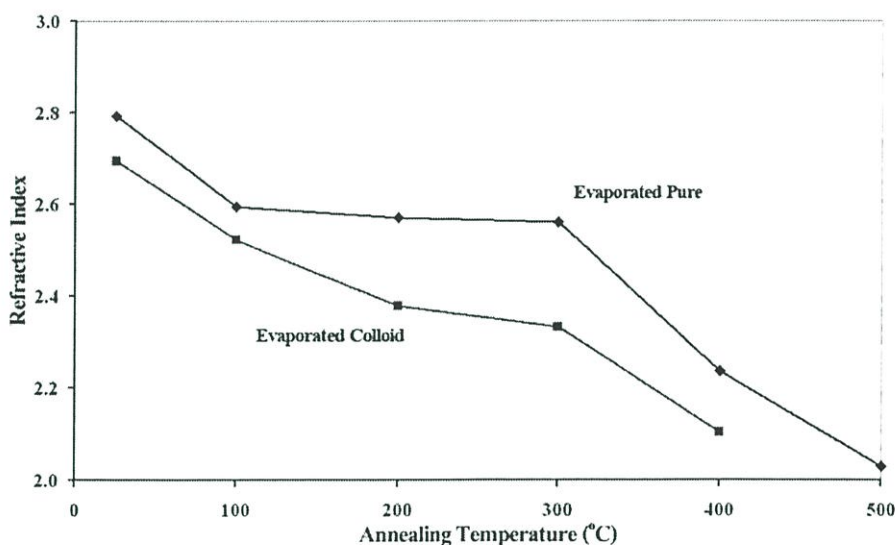
ค่าความหนาของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ จากการถ่ายภาพตัดขวางด้วย SEM มีค่าเท่ากับ 1.778 ไมโครเมตร ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณวิธีการแทรกสอดคือ 1.715 ไมโครเมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 3.5%

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความหนาที่ได้จากการคำนวณจากรีการแทรกสอดของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

Composition (x) of Zn	Thickness(nm)
0.0	3079
0.2	694
0.4	719
0.6	496
0.8	721
0.9	835
1.0	655

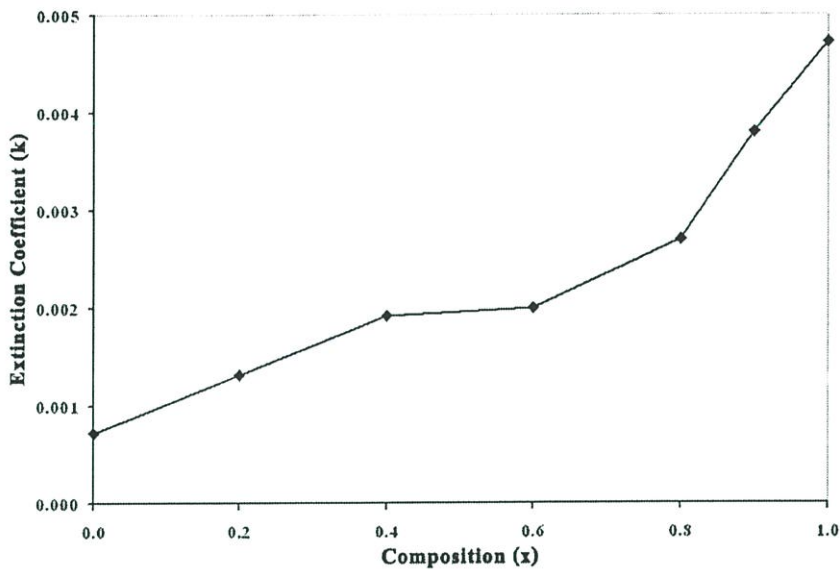
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature(°C)	Refractive Index	
	Evaporated Pure	Evaporated Colloid
As-deposited	2.79	2.69
100	2.59	2.52
200	2.57	2.38
300	2.56	2.33
400	2.24	2.10
500	2.03	-



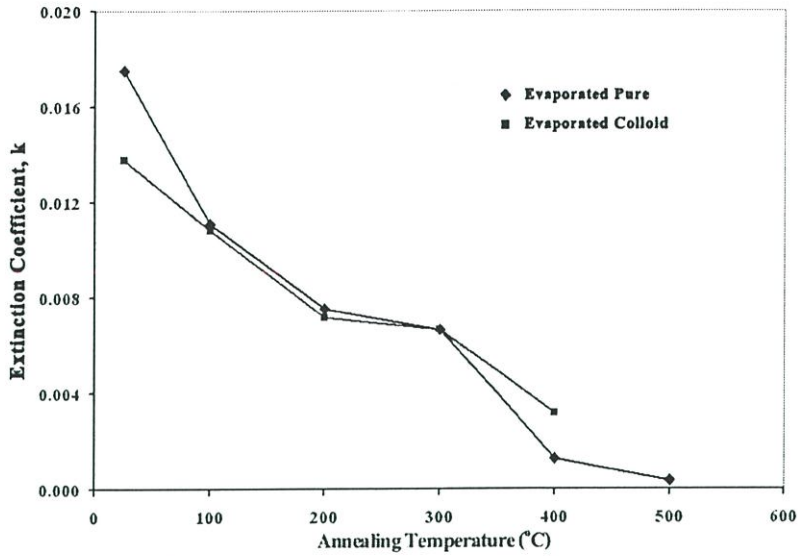
รูปที่ 4.32 แสดงค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.32 จะแสดงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิแอนนิลที่สูงขึ้น เกิดจากการที่ผลึกมีเกรนโตขึ้น ขอบเขตของเกรนน้อยลง ฟิล์มบางมีความใสมากขึ้น ผิวหน้าของฟิล์มบางมีความเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแสงดีขึ้น ค่าดัชนีหักเหจึงลดลง[42]

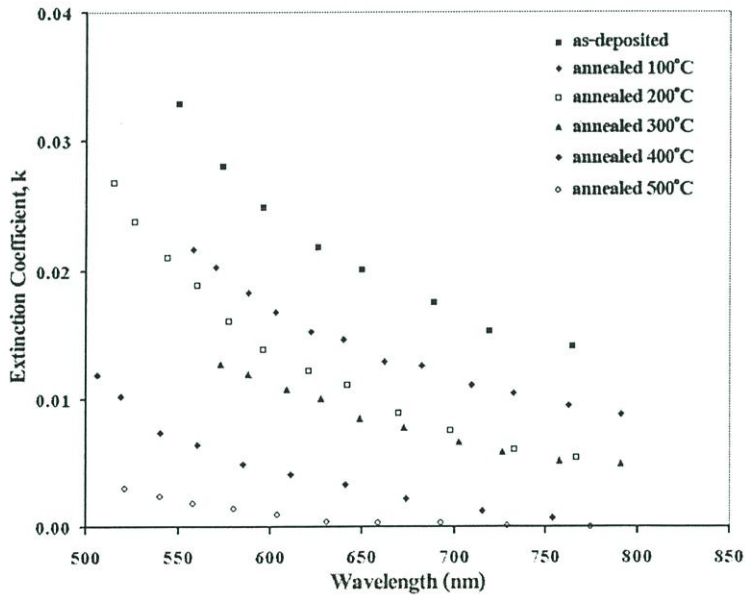


รูปที่ 4.33 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิล

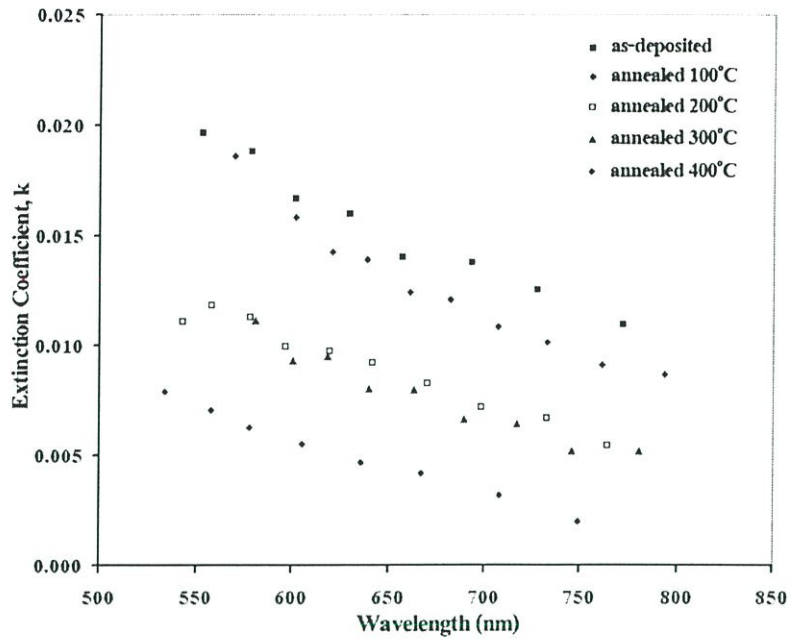
จากรูปที่ 4.33 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนิล ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางนี้ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากขนาดเกรนที่เล็กลงของฟิล์มบาง ส่วนรูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิแอนนิลสูงขึ้น เป็นผลจากขนาดเกรนที่โตขึ้นและฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอมากขึ้นตามอุณหภูมิแอนนิล



รูปที่ 4.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.35 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.36 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

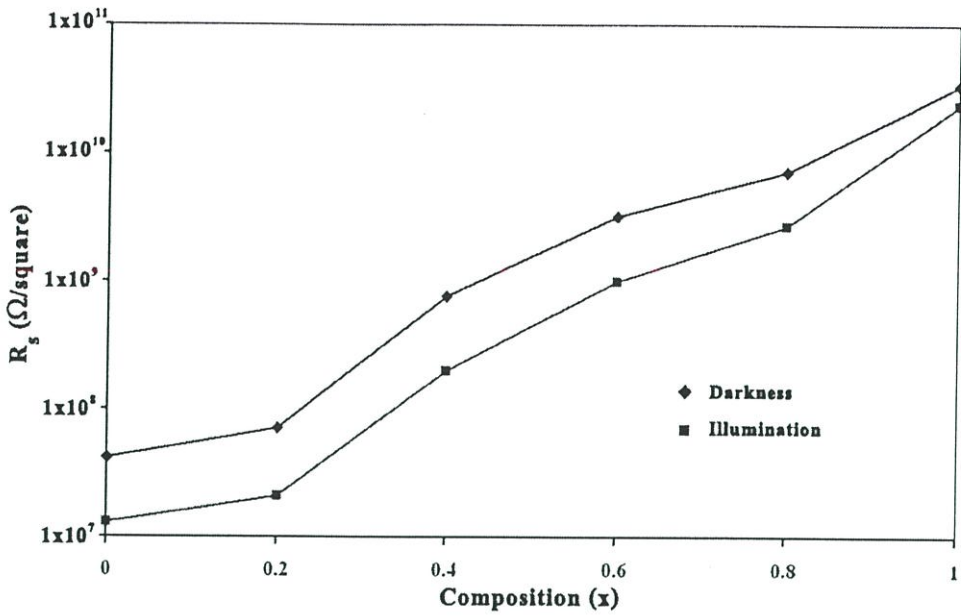
จากรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิแอนนิลที่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงตามความยาวคลื่นตกกระทบที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลที่ได้ตรงกับค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่มีค่าลดลงตามความยาวคลื่นตกกระทบที่ลดลง

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง

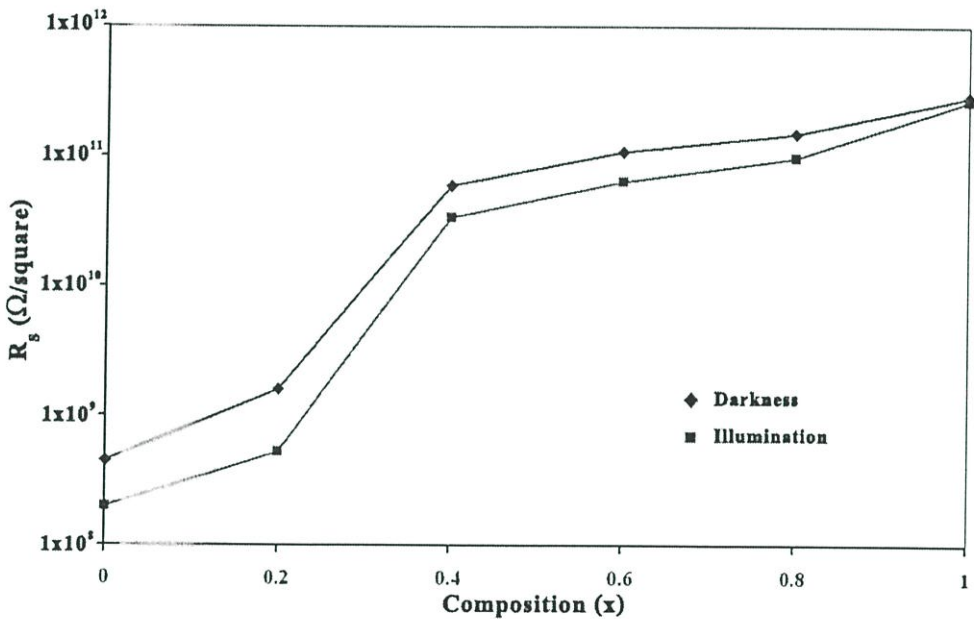
ทำการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี ในกรณีไม่มีการฉายแสง และมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH จากรูปที่ 4.37 และ รูปที่ 4.38 พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสม(x) ของ Zn เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เมื่อมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH จะทำให้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำ ส่งผลให้ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% มีความต้านทานแผ่นลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี จะมีค่าความต้านทานแผ่นสูงกว่ากรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการฉายแสง และจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อมีการฉายแสง

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

Composition (x) of Zn	R_s (Ω /square)			
	Darkness		Illumination	
	Pure	Colloid	Pure	Colloid
0.0	4.20×10^8	4.52×10^8	1.30×10^8	2.05×10^8
0.2	7.14×10^8	1.63×10^9	2.12×10^8	5.31×10^8
0.4	7.61×10^9	6.07×10^{10}	2.02×10^9	3.48×10^{10}
0.6	3.23×10^{10}	1.12×10^{11}	1.04×10^{10}	6.41×10^{10}
0.8	7.24×10^{10}	1.51×10^{11}	2.70×10^{10}	9.91×10^{10}
1.0	3.41×10^{11}	2.97×10^{11}	2.44×10^{11}	2.76×10^{11}



รูปที่ 4.37 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล กรณีไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH



รูปที่ 4.38 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล กรณีไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

ผลการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH มีดังรูปที่ 4.39, 4.40 และรูปที่ 4.41 พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการฉายแสง ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามอุณหภูมิแอนนัลที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าคงที่จนถึงอุณหภูมิแอนนัลที่ 300 °C ขึ้นไปจะมีค่าความต้านทานแผ่นสูงขึ้นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิแอนนัลตั้งแต่ 300 °C ลงมาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางจะมีมากขึ้น ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นทั้งสองกรณี เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแผ่นจะค่อนข้างคงที่และลดลงที่อุณหภูมิแอนนัล 400 °C จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มแบบเดียวกันเมื่อไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH ผลการวัดทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.11

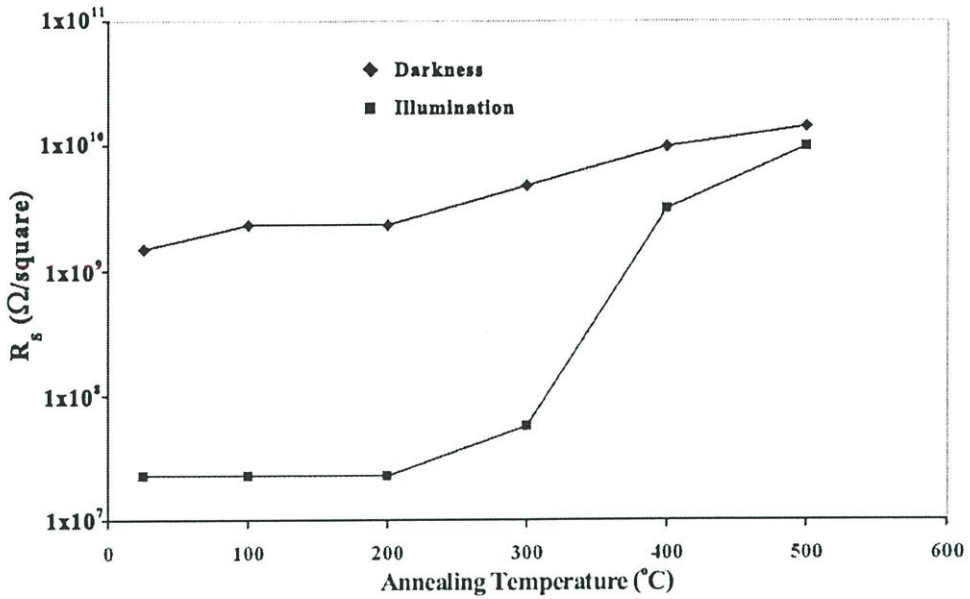
สำหรับฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีที่อุณหภูมิแอนนัลไม่เกิน 300 °C มีการตอบสนองต่อแสงดีมาก สังเกตได้จากค่าความต้านทานแผ่นที่ลดลงอย่างมากเมื่อมีการฉายแสง ในขณะที่ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีมีการตอบสนองต่อแสงน้อย จากตารางที่ 4.12 จะพบว่าการเจือโบรอนจะช่วยให้ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ มีค่าความต้านทานแผ่นลดลงอย่างมาก เมื่อเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่ตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% และกรณีที่ตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

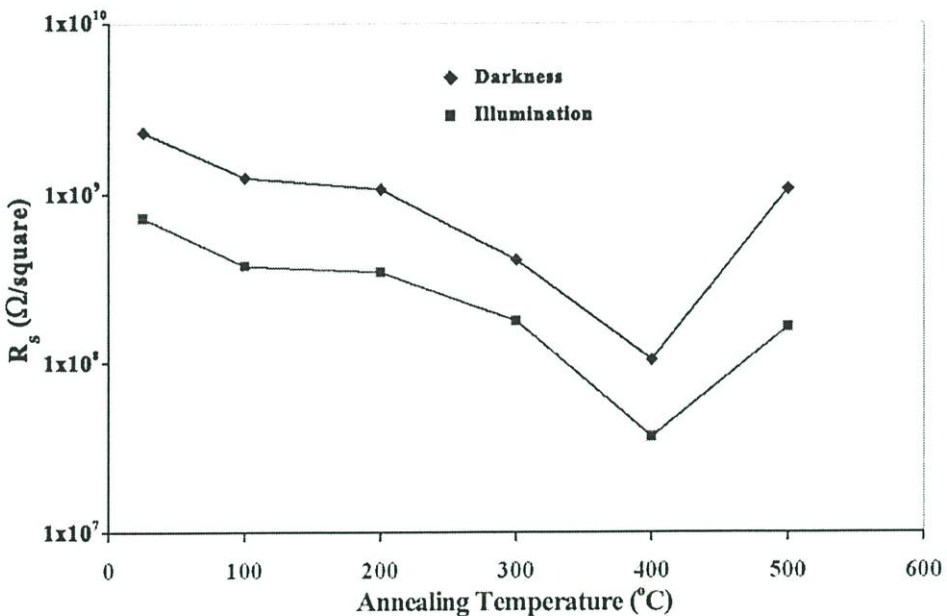
Annealing Temperature (°C)	R_s (Ω /square)					
	Darkness			Illumination		
	Chemical Bath	Evaporated		Chemical Bath	Evaporated	
		Pure	Colloid		Pure	Colloid
As-deposited	1.51×10^9	2.32×10^9	4.82×10^9	2.37×10^7	7.28×10^8	8.19×10^8
100	2.32×10^9	1.25×10^9	2.32×10^9	2.34×10^7	3.75×10^8	3.45×10^8
200	2.34×10^9	1.07×10^9	1.82×10^9	2.31×10^7	3.45×10^8	5.33×10^8
300	4.85×10^9	4.07×10^8	1.49×10^9	5.72×10^7	1.76×10^8	4.07×10^8
400	9.83×10^9	1.05×10^8	4.07×10^8	3.22×10^9	3.64×10^7	8.22×10^7
500	1.42×10^{10}	1.07×10^9	4.98×10^{10}	9.84×10^9	1.64×10^8	3.32×10^{10}

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

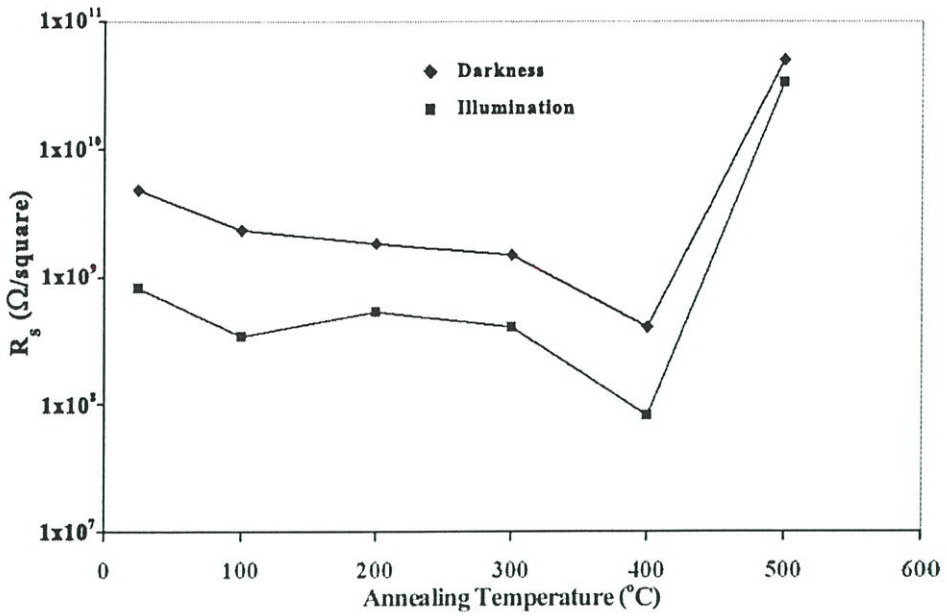
Annealing Temperature (°C)	R_s (Ω /square)			
	Darkness		Illumination	
	$Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$	$Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$	$Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$	$Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$
As-deposited	6.00×10^{11}	1.51×10^9	1.20×10^9	2.37×10^7
100	9.00×10^{10}	2.32×10^9	6.87×10^8	2.34×10^7
200	6.30×10^{10}	2.34×10^9	8.00×10^7	2.31×10^7
300	1.50×10^{11}	4.85×10^9	3.33×10^8	5.72×10^7
400	1.20×10^{13}	9.83×10^9	1.20×10^{10}	3.22×10^9
500	2.40×10^{13}	1.42×10^{10}	1.20×10^{11}	9.84×10^9



รูปที่ 4.39 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที กรณีไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH



รูปที่ 4.40 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที กรณีไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH



รูปที่ 4.41 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100\text{-}500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที กรณีไม่มีฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล

Composition (x) of Zn	Activation Energy (meV)	
	E_{a1}	E_{a2}
0.0	84	-
0.2	370	-
0.4	208	329
0.6	292	699
0.8	146	599
1.0	143	776

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ของ Zn ค่าต่างๆ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล

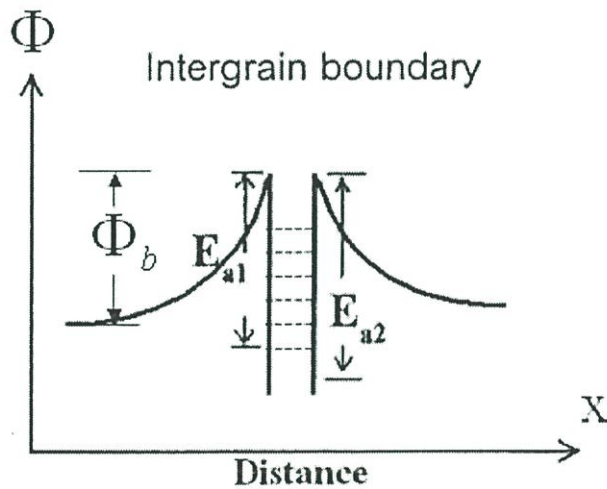
Composition (x) of Zn	Activation Energy (meV)	
	E_{a1}	E_{a2}
0.0	36	-
0.2	565	-
0.4	169	775
0.6	624	903
0.8	583	713
1.0	685	1032

จากตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนیل พบว่าที่ x เท่ากับ 0.0-0.2 มีค่าเดียว แต่เมื่อ x เท่ากับ 0.4 – 1.0 พบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นมากกว่า 1 ค่า อธิบายได้ว่า เมื่อพลังงานกระตุ้นมีค่าเดียว เป็นกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบของเกรน เมื่อเกรนเล็กลง ค่าของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า อธิบายได้จากสมการที่ (2.51)

$$\sigma = AT^{-\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right]$$

เมื่ออุณหภูมิมีค่ามากขึ้น กำแพงศักย์จะมีค่าลดลง ส่งผลให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

แต่เมื่อพลังงานกระตุ้นมีมากกว่า 1 ค่า อาจเกิดจากการที่มีระดับพลังงานย่อยตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนถูกจับไว้โดยกับดัก ซึ่งระดับพลังงานย่อยนี้มีอยู่มากกว่า 1 ระดับ ดังนั้นเมื่อเราให้พลังงานความร้อนแก่ฟิล์มบาง อิเล็กตรอนสามารถกลับขึ้นมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ ดังรูปที่ 4.42



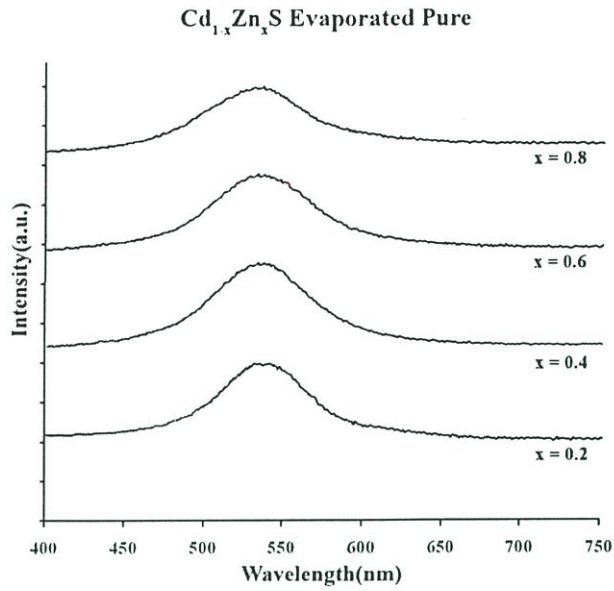
รูปที่ 4.42 แผนภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ ϕ_b คือความสูงของกำแพงศักย์ และ x คือระยะทาง

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในปิกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกัลและเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

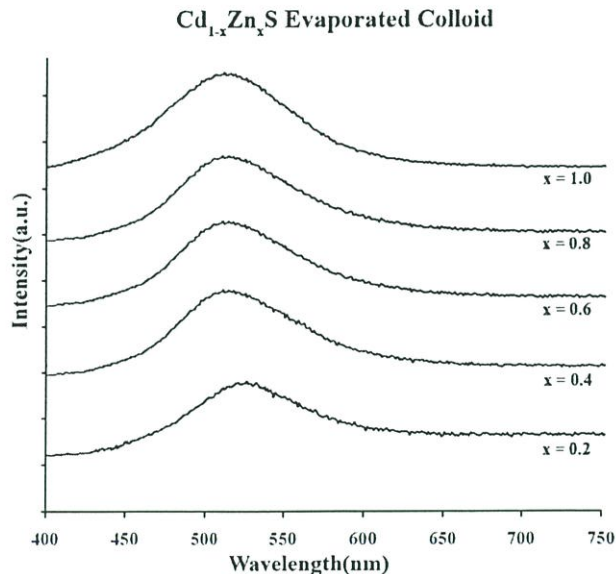
Annealing Temperature(°C)	Activation Energy (meV)					
	Chemical Bath		Evaporated pure		Evaporated colloid	
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a1}	E_{a2}	E_{a1}	E_{a2}
As-deposited	120	-	78	-	75	-
100	85	-	67	-	57	-
200	42	255	53	419	71	-
300	71	692	59	985	57	982
400	72	629	58	551	47	623
500	70	619	56	548	36	493

กรณีของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่วัดค่าพลังงานกระตุ้นได้สองค่านี้ นอกจากเกิดจากการที่มีระดับพลังงานย่อยตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนแล้ว การเจือโบรอนเข้าไปอาจทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ เมื่อเรากระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนจึงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ ทำให้ปริมาณพาหะทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง

4.7 ผลการวิเคราะห์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

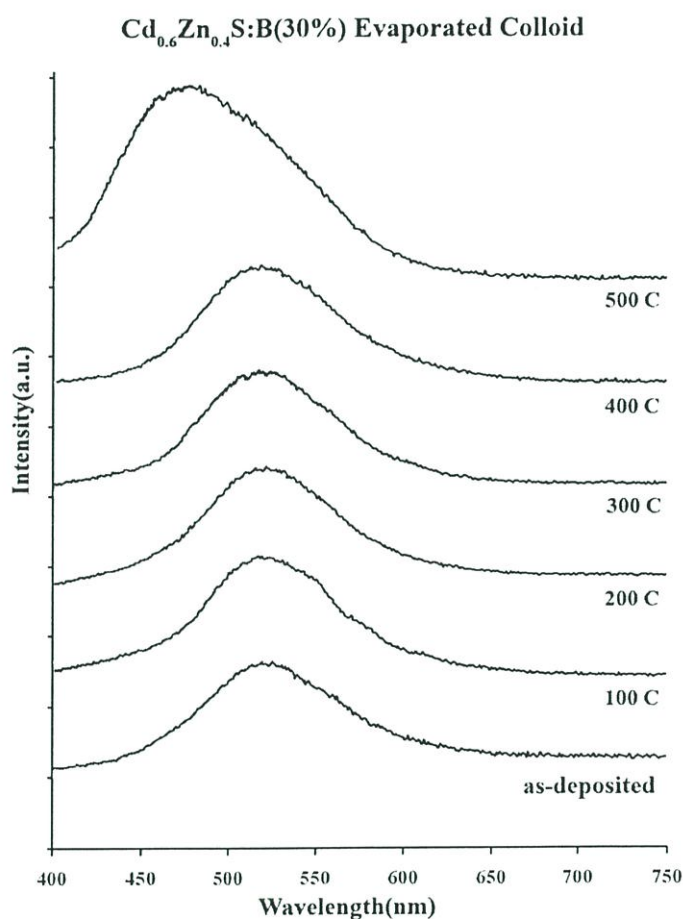


รูปที่ 4.43 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ค่าต่างๆของ Zn ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

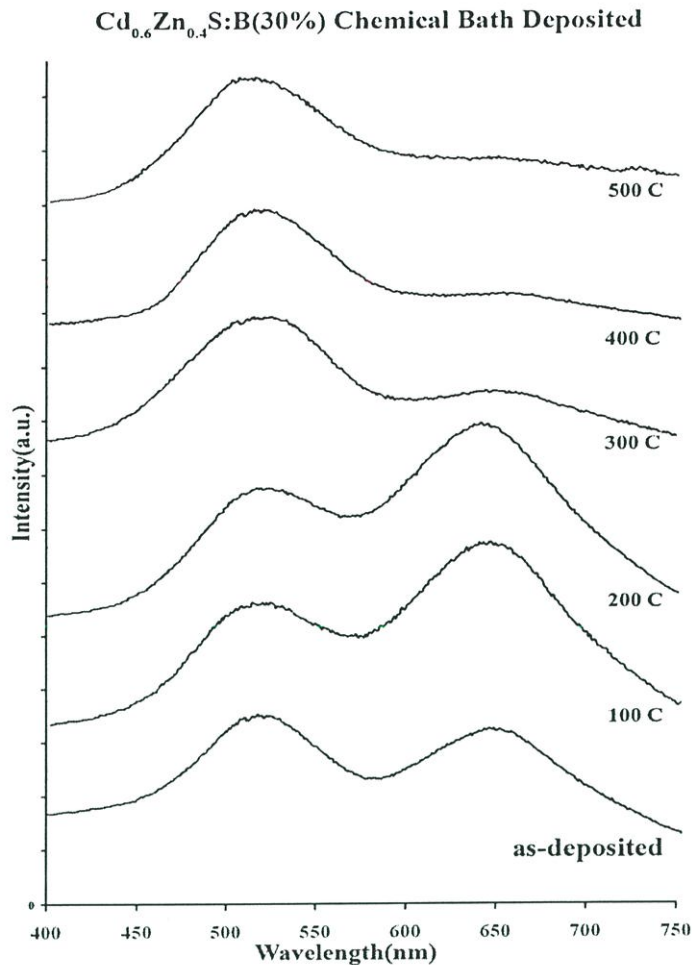


รูปที่ 4.44 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ค่าต่างๆของ Zn ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

จากรูปที่ 4.43, 4.44 และ 4.45 พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ค่าต่างๆของ Zn ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีเมื่อไม่มีการแอนนีส และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที มีแถบการเปล่งแสงสีเขียวเพียงแถบเดียว โดยแถบสีที่เปล่งออกมานั้นเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานดังรูปที่ 4.48

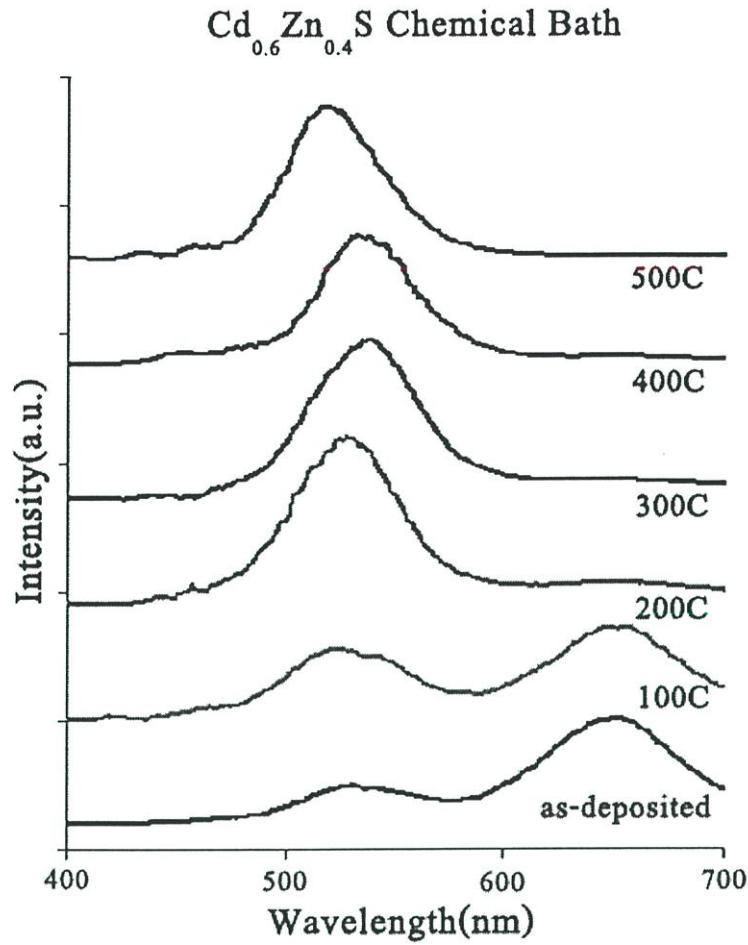


รูปที่ 4.45 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

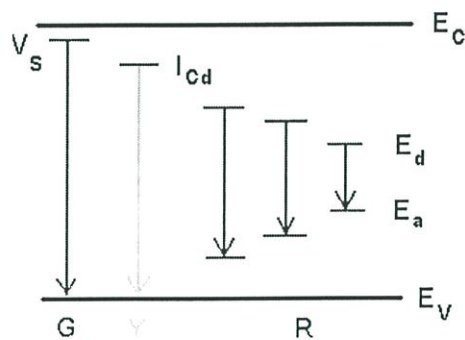


รูปที่ 4.46 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30%) ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.46 พบว่าแถบการเปล่งแสงของฟิล์มบาง Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30%) ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี ที่อุณหภูมิแอนนัลต่างๆ แสดงแถบสีเขียวและแดงอย่างชัดเจน โดยกรณีที่ยังไม่มีการแอนนัลแถบสีแดงและเขียวมีความเข้มใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนัลความเข้มสีแดงจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิแอนนัลถึง 300°C แถบสีแดงจะลดความเข้มลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งอุณหภูมิแอนนัล 500°C จะไม่ปรากฏแถบสีแดงเลย โดยแถบสีที่เปล่งแสงออกมาอาจเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานดังรูปที่ 4.48 สอดคล้องกับรูปที่ 4.47 ที่แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของฟิล์มบาง Cd_{0.6}Zn_{0.4}S ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที จะเห็นว่าการเจือโบรอนไม่มีผลต่อตำแหน่งพีคของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ แต่ยังมีผลทำให้ความเข้มของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลง



รูปที่ 4.47 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.48 แสดงแผนภาพการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นสเปกตรัมสีเขียว(G) สีเหลือง(Y) และสีแดง(R)

I_{Cd} คือการแทรกตัวของอะตอมแคดเมียมในโครงผลึก (Cadmium Interstitial)

V_{S} คือการขาดหายของอะตอมซัลเฟอร์ (Sulfur Vacancy)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ขั้นเตรียมฟิล์มบาง และเน้นทางด้าน การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางจนถึงขั้นการวิเคราะห์ผลสุดท้าย พร้อมด้วยข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

สรุปผลการเตรียมฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยมีอัตราส่วนผสมของ $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง CdS และ ZnS บริสุทธิ์ 99.999% และผลึกผง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี โดยการคำนวณอัตราส่วนผสมของสารแล้วนำไปอัดเม็ด เพื่อป้องกันการกระเด็นของสารในระบบสุญญากาศเมื่อได้รับความร้อน ผลที่ได้คือฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS บริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ยึดติดกับฐานรองรับได้ดี มีความเรียบสม่ำเสมอ มีสีเหลืองเข้ม และสีจะเริ่มอ่อนจางลงตามสัดส่วนของ Zn ที่เพิ่มขึ้น

ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ฟิล์มบางที่ได้ยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี หลังจากนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มบางมีสีใกล้เคียงกับเมื่อไม่มีการแอนนัล ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%) และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ฟิล์มบางที่ได้ยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี หลังจากนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มบางมีสีอ่อนลง คือเปลี่ยนจากสีน้ำตาลไปเป็นสีเหลืองอ่อนตามอุณหภูมิแอนนัลที่สูงขึ้น

สรุปผลการศึกษาสมบัติฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$

จากการศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีทิศทางการจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ (111) โดยจะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัลและแบบคิวบิก ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับการเตรียมฟิล์มบาง เมื่อส่วนผสมของ ZnS เป็น 100% จะมีโครงสร้างเปลี่ยนจากเฮกซะโกนัลเป็นแบบคิวบิก ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี นอกจากนี้ยังพบว่ามุมของการเลี้ยวเบนจะเลื่อนเป็นมุมที่สูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ ZnS ที่สูงขึ้น ขนาดของเกรนที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อ ZnS เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเข้มฟลักของกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% จะมีความเข้มฟลักมากกว่ากรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี อาจเกิดจากในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีนั้นมีความไม่บริสุทธิ์อยู่สูงกว่า ค่าคงที่โครงสร้างของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่คำนวณได้จากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของ ZnS เพิ่มขึ้น ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมได้จากวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และจากกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิกจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบ (111) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ผลของการแอนนัลไม่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างมากนักและอนุภาคของโบรอนที่เจือไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกัน แต่ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% จะมีฟลักสูงกว่าในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีบอถึงความเป็นผลึกที่ดีกว่า เนื่องมาจากสารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่า

จากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เกรนมีขนาดเล็กมาก จึงเห็นไม่ชัดเจนนัก ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เกรนที่ได้จะมีขนาดโตขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัลที่เพิ่มขึ้น และพบอนุภาคของ CdS ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางซึ่งบอถึงการมีกระบวนการเกิดฟิล์มบางแบบโฮโมจีเนียสขึ้นด้วย

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านแสง พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีมีลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% อยู่ในช่วง 2.31-3.47 eV สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โบว์ริง (bowing parameter) ได้เท่ากับ 0.34 และค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

ฟิล์มบางที่เตรียมได้ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีอยู่ในช่วง 2.31- 3.89 eV มีค่าช่องว่างแถบพลังงานมากกว่า 1 ค่า แสดงว่านอกจาก $Cd_{1-x}Zn_xS$ แล้วยังมีเฟสอื่นผสมอยู่ด้วย สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โบว์ริงจากค่า E_g ได้เท่ากับ 1.74 และค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Zn เพิ่มขึ้น ส่วนการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที เมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลสูงขึ้นบริเวณขอบการคูดกลืนแสงจะมีความชันมากขึ้น บอกลถึงโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ค่าความหนาของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่คำนวณจากรีฟลักตรอสคอดของการส่งผ่านแสงมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการถ่ายภาพตัดขวางด้วย SEM ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นทั้งสองกรณีมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงมีค่าลดลงตามอุณหภูมิแอนนัลที่สูงขึ้น เกิดจากการที่ผลึกมีเกรนที่โตขึ้น มีขอบเขตของเกรนน้อยลง ผิวหน้าของฟิล์มบางมีความเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแสงดีขึ้น ค่าดัชนีหักเหจึงลดลง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นทั้งสองกรณี มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของ Zn ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากขนาดเกรนที่เล็กลงของฟิล์มบาง

จากการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสม(x) ของ Zn เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้นมาก และเมื่อมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH จะทำให้ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ลดลง ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี ค่าความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัล และตอบสนองต่อแสงได้ดีที่อุณหภูมิแอนนัลต่ำกว่า 300°C ในขณะที่ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมได้จากวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และจากกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี พบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแผ่นจะค่อนข้างคงที่และลดลงที่อุณหภูมิแอนนัล 400 °C จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มแบบเดียวกันเมื่อไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง น่าจะมีผลมาจากฟิล์มบางที่เตรียม

โดยวิธีการอบสารละลายเคมีมีความบกพร่องของโครงสร้างสูงมาก อุณหภูมิแอนนีสที่ไม่สูงพอจึงมีผลต่อโครงสร้างน้อยกว่าฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จึงส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วย นอกจากนี้ความบกพร่องของโครงสร้างดังกล่าวยังเห็นผลชัดเจนเมื่อมีการฉายแสง ซึ่งค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และการเจือโบรอนช่วยให้ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ มีการนำไฟฟ้าดีขึ้น

จากการวัดค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทั้งสองกรณีและฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ทั้งสามกรณี ที่ยังไม่ผ่านการแอนนีส พบว่าเมื่อพลังงานกระตุ้นมีค่าเดียวอธิบายค่าแพนดักซ์ที่บริเวณขอบของเกรนได้ว่า เมื่อเกรนเล็กลงค่าของค่าแพนดักซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า แต่เมื่อพลังงานกระตุ้นมีมากกว่า 1 ค่า เกิดจากการที่มีระดับพลังงานย่อยตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนถูกจับไว้โดยกับดัก ซึ่งระดับพลังงานย่อยนี้มีอยู่สองถึงสามระดับ ดังนั้นเมื่อเราให้พลังงานความร้อนแก่ฟิล์มบางอิเล็กตรอนสามารถกลับขึ้นมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ จึงทำให้ความต้านทานของฟิล์มบางมีค่าลดลง

จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน เมื่อกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสม(x) ค่าต่างๆ ของ Zn ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส จะปรากฏแถบสีเขียวเพียงแถบเดียว อาจเกิดจากการขาดหายของอะตอมซัลเฟอร์ที่มีปริมาณสูง ซึ่งในกรณีของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีก็ได้ผลเช่นเดียวกัน ส่วนกรณีของฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี พบว่ากรณีของ CdS ปรากฏแถบสีเขียวและแถบสีแดง ความเข้มใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนีสความเข้มสีแดงจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิแอนนีสถึง 300°C แถบสีแดงจะลดความเข้มลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งอุณหภูมิแอนนีส 500°C จะไม่ปรากฏแถบสีแดงเลย ส่วนแถบสีเขียวยังคงอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์มาแล้ว เป็นที่น่าสังเกตว่าที่อุณหภูมิแอนนีส 300°C อาจจะมีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนัล โดยดูได้จากแถบสีแดงที่ลดลงอย่างรวดเร็วบอกถึงการเรียงตัวของโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น(ระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับลดปริมาณลงจนไม่เห็นพีก) สัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลงและการตอบสนองต่อแสงที่เริ่มลดลงจากผลการวัดความต้านทานแผ่น นอกจากนี้ยังอาจบอกได้ว่าการ

เปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่อุณหภูมิต่ำในงานวิจัยนี้และจากผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์มาแล้ว
ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมจากวิธีอบสารละลายเคมีจะปรากฏแถบสีเขียวและสีแดง
ในขณะที่ฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมจากวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
จะปรากฏแถบสีเขียวเพียงแถบเดียว บอกลถึงการมีระดับพลังงานย่อยที่มากกว่าหรือมีความบกพร่อง
ของโครงสร้างที่ผิวหน้ามากกว่า เมื่อเตรียมโดยฟิล์มบางวิธีการอบสารละลายเคมี

จากผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์สรุปได้ว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบ
สารละลายเคมีมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้พัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากตอบสนองต่อ
แสงได้ดีและสามารถลดความต้านทานได้ด้วยการเจือโบรอนเข้าไป ส่วนฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่
เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง CdS และ
ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในบีกเกอร์ที่
เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมีมีคุณสมบัติแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยัง
พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S:B(30\%)$ ที่เตรียมจากวิธีการอบสารละลายเคมีมีการเปลี่ยนเฟสที่
อุณหภูมิแอนนیل $300^{\circ}C$ ผลที่ได้ตรงกับผลงานที่เคยตีพิมพ์มาแล้ว

ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

- การระเหยสารในระบบสุญญากาศ ควรนำสารไปอัดเป็นเม็ดก่อน เพื่อป้องกันการกระเด็น
ของสารเมื่อได้รับความร้อน ขณะทำการระเหยภายในระบบสุญญากาศ
- การทำการวัดสมบัติทางแสงหรือทางไฟฟ้าของฟิล์มบางควรทำให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียม
ฟิล์มบางได้ เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้า
- การถ่ายภาพฟิล์มบางที่มีความต้านทานสูงด้วยเครื่อง SEM หากไม่เห็นเกรน ควรเคลือบฟิล์ม
บางด้วยทองคำก่อนทำการถ่ายภาพ
- การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ต้องทำในห้องที่มีดสนิท เพื่อป้องกันแสงรบกวน และระบบทำ
ความเย็นต้องมีการระบายความร้อนที่ดี และจัดวางชุดอุปกรณ์ทางแสงให้อยู่ในตำแหน่งที่
เหมาะสม
- การวัดความต้านทานแผ่นควรใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายใน(impedance) สูงมากๆ
เนื่องจากฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีความต้านทานสูงมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Ramanathan, G. Teeter, J.C. Keane and R. Noufi, "Properties of High-Efficiency CuInGaSe_2 Thin Film Solar Cells", **Thin Solid Films** ,vol.480-481 ,2005. pp.499-502.
- [2] J.H. Lee, W.C. Song, J.S. Yi, K.J. Yang, W.D. Han and J. Hwang, "Growth and Properties of the $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ Thin Films for Solar Cell Applications", **Thin Solid Films.**, vol.431-432, 2003. pp.349-353.
- [3] J.H. Lee, H.Y. Lee, J.H. Kim and Y.K. Park, "Heat Treatment of Boron Doped CdS Films Prepared by Chemical Bath Deposition for Solar Cell Application", **Jpn.J.Appl.Phys.**, vol.39, 2000. pp.1669-1674.
- [4] C. Kittel. **Introduction to Solid State Physics**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 1971.
- [5] งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์", รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [6] วีรชัย ลิภา, "การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี", วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547.
- [7] M. Ohring. **Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure**. 2nd ed. San Diego: ACADEMIC PRESS. 2002.
- [8] บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น): หน้า 9, 12-15, 25.
- [9] B.D Cullity, **Elements of X-ray Diffraction** . Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1956.
- [10] R.J.D. Tilley. **Understanding Solids: The Science of Materials**. Chichester: John Wiley & Sons. 2004.
- [11] F. Abelas, **Optical Properties of Solids**. London: North-Holland, 1972.
- [12] W.R. Runyan. **Semiconductor Measurement and Instrument**. 3rd ed. New York: Mc Graw-Hill. 1975.
- [13] D.K. Schroder. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York: John Wiley & Sons. 1990.

- [14] R Swanepoel. "Determination of the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon", **J.Phys. E:Sci.** Vol. 16, 1983. pp.1214-1222.
- [15] A.P. Caricato, A. Fazzi, G. Leggieri, "A Computer Program for Determination of Thin Films Thickness and Optical Constants", **Applied Surface Science.**, vol.248, 2005. pp.440-445.
- [16] J C Manificier, J Gsiot and J P Fillard , "A Simple Method for the Determination of the Optical Constants n, k and the Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film", **J. Phys. E.**, vol.9, 1976. pp.1002-1004.
- [17] J. Torres, J.I. Cisneros, G. Gordillo, F.Alvarez, "A Simple Method to Determine the Optical Constants and Thickness of $Zn_xCd_{1-x}S$ Thin Films", **Thin Solid Films.**, vol.289 , 1996. pp. 238-241.
- [18] Akram K.S. Aqili and Asghari Maqsood, "Determination of Thickness, Refractive Index, and Thickness Irregularity for Semiconductor Thin Films from Transmission Spectra", **Applied Optics.**, vol.14, 2002. pp.218-224.
- [19] M. Zribi, M. Kanzari, B. Rezig. "Optical constants of Na-doped $CuInS_2$ Thin Films." **Material Letters.** vol. 60, 2005, pp. 98-103.
- [20] S.M. Sze. **Physics of Semiconductor Devices.** New York: John Wiley & Sons. 1981.
- [21] A.H. Kitai. **Solid State Luminescence.** London: Chapman & Hall, 1993.
- [22] G.E. McGuire, **Semiconductor Materials and Process Technology Handbook**, Noyes, 1988.
- [23] K.M. Garadkar, P.P. Hankare, and R.K. Patil "Effect of Indium Doping on Structural, Optical and Electrical Properties of $Cd_{0.95}Hg_{0.05}S$ Thin Films", **Mater.Chem.Phys.** vol. 58, 1999. pp 64-70.
- [24] K.S. Ramaiah, "Electrical Properties of In Doped CdS Thin Films" **J.Mater.Sci.Mater. Elec.** vol. 10, 1999.pp.291-294.
- [25] M.V. Garcia-Cuencu, J.L. Morenza.and J.M. Codina, "Electrical Conduction in Polycrystalline CdS Films:I.Theory". **J.Phys.D:Appl.Phys.** vol.20, 1987.pp.951-957.
- [26] M.V. Garcia-Cuencu, J.L. Morenza, E. Bertran and A. Lousa, "Electrical Conduction in Polycrystalline CdS Films:II.Comparison of Theory and Experiment", **J.Phys.D:Appl.Phys.** vol.20, 1987.pp.958-962.
- [27] I. Gunal and M. Parlak, "Current Transport Mechanisms in Low Resistive CdS Thin Films", **J.Mater.Sci.Mater.Elec.** vol.8,1997.pp.9-13.

- [28] N.S. Harris, **Modern Vacuum Practice**, McGraw-Hill, 1989.
- [29] ชัยวิทย์ ศิลาวรรณานาย, “ฟิสิกส์และเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.
- [30] J.M. Dona, J. Herrero, “Process and Film Characterization of Chemical-Bath-Deposited ZnS Thin Films”, **J. Electrochem. Soc.**, vol.141 (1), 1994. pp. 205-210.
- [31] J.M. Dona, J. Herrero, “Chemical Bath Co-deposited CdS-ZnS Film Characterization”, **Thin Solid Films.**, vol.268, 1995. pp. 5-12.
- [32] T. Yamaguchi, Y. Yamamoto, T. Tanaka, and A. Yoshida, “Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Film by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Device”, **Thin Solid Films** ., vol.343-344, 1999 . pp. 516-519.
- [33] P. O’ Brien, J. Mcaleese, “Developing an Understanding of the Processes Controlling the Chemical Bath Deposited of ZnS and CdS”, **J. Mater. Chem** .,vol.8 , 1998. pp.2309-2314.
- [34] I.O. Oladeji and L. Chow, “A Study of the Effects of Ammonium Salts on Chemical Bath Deposited Zinc Sulfide Thin Films ”, **Thin Solid Films** .,vol.399 ,1999. pp.184-153.
- [35] S.A. Al Kuhaimi and Z. Tulbah, “Structural, Compositional, Optical, and Electrical Properties of Solution-Grown $Zn_xCd_{1-x}S$ ”, **J. Electrochem. Soc.**, vol.147 (1), 2000. pp. 214-218.
- [36] S.M. Zhou, Y.S. Feng and L.D. Zhang, , “Growth and Optical Characterization of Large Scale Crystal $Cd_{1-x}Zn_xS$ Whiskers via Vapor Reaction”, **J. Crystal Growth.**, vol.252, 2003. pp.1-3.
- [37] สุกฤษฎี เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [38] H. Metina, R. Esen., “Annealing studies on CBD grown CdS thin films”. **Journal of Crystal Growth**, 2003. pp.141-148.
- [39] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ, “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์”, รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.

- [40] S.A. Tomas and O. Vigil, "Influence of Thermal Annealing in Different Atmospheres on the Band-Gap Shift and Resistivity of CdS Thin Films", **J. Appl. Phys.**, vol.78, 1995. pp.2204-2207.
- [41] G.K. Padam, G'L' Malhotra, and S.U.M. Rao, "Studies on Solution-Grown Thin Films of $Zn_xCd_{1-x}S$ ", **J. Appl. Phys.**, vol.63. No.3, 1987. pp.770-774.
- [42] P. Prathap, Y.P.V. Subbaiah, M. Devika and K.T. Ramakrishna Reddy, "Optical Properties of In_2O_3 Films Prepared by Spray Pyrolysis", **Materials Chemistry and Physics**, vol 100, 2006, pp.375-379.
- [43] R. Lozada-Morales, O. Zelaya-angel, G. Torres-Delgado, "Photoluminescence in Cubic and Hexagonal CdS Films", **Applied Surface Science**, vol.175-176, 2001.pp.562-566.
- [44] O.P.Agnihotri and B.K.Gupta, " $Cd_{1-x}Zn_xS$ Films for Low Cost Solar Cells", **Jpn.J.Appl.Phys.**, vol.18, 1979. pp.317-320.
- [45] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ, "การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศ", รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [46] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ, "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์", รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [47] Ng. Gaewdang and T. Gaewdang, "Investigations on Chemically Deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films with Low Zn Content". **Materials Letters**, vol 59, 2005. pp.3577-3584.
- [48] G. Gordillo, E. Romero, "Structural Characterization of Thin Films Based on II-VI Ternary Compounds Deposited by Evaporation". **Thin Solid Films**, vol 484, 2005. pp.352-357.

ภาคผนวก ก.

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

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

Pattern : 49-1302		Radiation = 1.540598		Quality : High		
$(Cd_{0.8}Zn_{0.2})S$		2θ	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] = 99.56 Dx = 4.505				
SAMPLE PREPARATION : Cd Cl ₂ , Zn Cl ₂ 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 : 40-838		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
$Cd_{7.23}Zn_{2.77}S_{10}$		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		25.502	51	1	0	0
		27.081	100	0	0	2
		28.776	43	1	0	1
		37.442	5	1	0	2
		44.833	61	1	1	0
		48.902	10	1	0	3
		52.230	2	2	0	0
		55.696	4	0	0	4
		120.554	2	3	1	3
		148.985	2	3	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.04200 c = 6.56800 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 (N O ₃) ₂ containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C. GENERAL COMMENTS : 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.						

Pattern : 24-1137		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Zn _{0.9} Cd _{0.1} S		2th	l	h	k	l
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	l/cor = 6.40				

Pattern : 40-835		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
Cd _{0.05} Zn _{1.95} S ₁₀		2th	l	h	k	l
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 (186)		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 (NO₃)₂ containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C. GENERAL COMMENTS : 19.5 mole % ZnS. GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: a=4.131-0.001314 P; s=0.003, c=6.173-0.00458 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.</p>						

Pattern : 24-1136		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
$Zn_{0.9}Cd_{0.1}S$ Wurtzite, cadmian, syn / Zinc Cadmium Sulfide		2th 26.832 28.383 30.389 39.402 47.280 51.502 55.187 56.066 57.246 58.683 63.204 65.651 72.481 75.586 77.326 78.613 81.757 82.524 87.989 91.215 94.618 94.855 100.348 100.900	l 100 65 100 40 70 65 10 45 15 1 8 1 1 20 8 10 2 14 6 8 18 2 8 8 4	h 1 0 1 1 1 2 1 1 2 0 2 1 1 2 1 1 1 2 3 0 3 2 3 2 1	k 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 2 1 1 1 0 2 0 0 1 0 0 0 0	l 0 2 1 2 0 3 0 2 1 4 5 2 4 3 1 2 0 3 6 2 5 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 l/cor = 2.90	GENERAL COMMENTS : (002) may be observed as the strongest reflection due to preferred orientation.				

Pattern : 3-1093		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
ZnS Wurtzite / Zinc Sulfide		2th 27.165 28.587 30.699 47.835 50.978 56.783 72.675 76.809 79.079 83.219 88.898 92.094 95.578 99.401	l 50 70 30 100 30 100 10 30 30 30 70 30 100 30	h 1 0 1 1 1 1 2 1 0 0 0 0 0 0	k 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0	l 0 2 1 0 0 2 0 0 6
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.				

ภาคผนวก ข.

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้น

การเตรียมสารตั้งต้นเพื่อเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}:\text{B}$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี

การคำนวณปริมาณของ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในสารละลายปริมาตร 150 ml

มวลโมเลกุลของธาตุ

$$\text{Cd} = 112.40 \text{ g/mol}$$

$$\text{Zn} = 65.38 \text{ g/mol}$$

$$\text{S} = 32.064 \text{ g/mol}$$

$$\text{H} = 1.007 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล

$$= (112.40) + (32.064) + 4(15.9994) + \frac{8}{3} [2(1.007) + 15.9994] \quad \text{g}$$

$$= 256.4973 \quad \text{g}$$

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล

$$= (65.38) + (32.064) + 4(15.9994) + 7[2(1.007) + 15.9994] \quad \text{g}$$

$$= 287.5354 \quad \text{g}$$

ต้องการ $[\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O} + \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ จำนวน 0.01 M

แต่สัดส่วน $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O} : \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เป็น 0.6 : 0.4

ดังนั้น $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ จะมีความเข้มข้น = $(0.6)(0.01) = 0.006 \text{ M}$

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ จะมีความเข้มข้น = $(0.4)(0.01) = 0.004 \text{ M}$

สารละลาย 1000 ml มี $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ (ความเข้มข้น 0.006M) จำนวน = 1.5390 g

สารละลาย 150 ml มี $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ (ความเข้มข้น 0.006M) จำนวน = $\frac{1.5390}{1000} (150)$ g
= 0.2309 g

สารละลาย 1000 ml มี $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (ความเข้มข้น 0.004M) จำนวน = 1.1501 g

สารละลาย 150 ml มี $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (ความเข้มข้น 0.004M) จำนวน = $\frac{1.1501}{1000} (150)$ g
= 0.1725 g

$$\begin{aligned} \text{ถ้าเจือ } \text{H}_3\text{BO}_3 \text{ 30 \% wt ของ } \left[\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O} + \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \right] \\ \text{จะต้องใช้ } \text{H}_3\text{BO} \text{ จำนวน} &= \frac{30}{100} (0.2309 + 0.1725)\text{g} \\ &= 0.1210 \quad \text{g} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณ $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ในสารละลายปริมาตร 150 ml

มวลโมเลกุลของธาตุ

S	=	32.064	g / mol
C	=	12.01115	g / mol
N	=	14.0067	g / mol
H	=	1.007	g / mol

$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล

$$\begin{aligned} &= 32.064 + 12.01115 + 2(14.0067) + 4(1.007) && \text{g} \\ &= 76.1166 && \text{g} \end{aligned}$$

สารละลาย 1000 ml มี $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ (ความเข้มข้น 0.05 M) จำนวน = 3.8058 g

$$\begin{aligned} \text{สารละลาย 150 ml มี } \text{SC}(\text{NH}_2)_2 \text{ (ความเข้มข้น 0.05 M) จำนวน} &= \frac{3.8058}{1000} (150) && \text{g} \\ &= 0.5709 && \text{g} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณ NH_3 ในสารละลายปริมาตร 150 ml

NH_3 (25%) โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก (weight by weight) หมายถึงในสารละลาย 1 g จะมีเนื้อสาร NH_3 อยู่ 0.25 g และ NH_3 มีความเข้มข้น 0.91 g / ml นั่นคือปริมาตร 1 ml จะมีเนื้อสารละลายอยู่ 0.91 g หรือมีเนื้อสาร NH_3

$$= (0.91)(0.25) \quad \text{g}$$

$$= 0.2275 \quad \text{g}$$

NH_3 1 M จะมีมวล = 14.0067 + 3(1.007) g

$$= 17.0277 \quad \text{g}$$

ต้องการ NH_3 จำนวน 1.5 M จะมีเนื้อสาร = (1.5)(17.0277) g

$$= 25.5416 \quad \text{g}$$

$$\begin{aligned} \text{เนื้อสารละลาย NH}_3 \text{ 0.2275 g จะต้องตวงสาร} &= 1 \text{ ml} \\ \text{เนื้อสารละลาย NH}_3 \text{ 25.5416 g จะต้องตวงสาร} &= \frac{1}{0.2275} (25.5416) \text{ ml} \\ &= 112.2708 \text{ ml} \end{aligned}$$

นั่นคือตวง NH_3 จำนวน 112.2708 ml หลังเติมน้ำลงไปจนมีปริมาตร 1000 ml จึงจะเรียกว่า เป็น ความเข้มข้น 1.5 M

$$\begin{aligned} \text{แต่ถ้าต้องการความเข้มข้น 1.5M ในปริมาตร 150 ml จะต้องตวง NH}_3 &= \frac{112.2708}{1000} (150) \text{ ml} \\ &= 16.8 \text{ ml} \end{aligned}$$

การคำนวณปริมาณของไฮดรอกซีโมโนไฮเดรต $\text{NH}_2 - \text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ หรือเขียนว่า $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ ใน สารละลายปริมาตร 150 ml

มวลโมเลกุลของธาตุ

$$\begin{aligned} \text{N} &= 14.0067 \text{ g/mol} \\ \text{H} &= 1.007 \text{ g/mol} \\ \text{O} &= 15.9994 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล

$$\begin{aligned} &= 2(14.007) + 5(1.007) + 15.9994 + 1.007 \text{ g} \\ &= 50.0554 \text{ g} \end{aligned}$$

$\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ มีความเข้มข้น $1.032 \text{ g/cm}^3 = 1.032 \text{ g/ml}$

$\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ จำนวน 3 M จะมีเนื้อสารอยู่ = 150.1662 g

มีเนื้อสาร $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ จำนวน 1.032 g ในปริมาตรของสารละลาย = 1 ml

$$\begin{aligned} \text{มีเนื้อสาร } \text{N}_2\text{H}_5\text{OH} \text{ จำนวน 150.1662 g ในปริมาตรของสารละลาย} &= \frac{150.1662}{1.032} \text{ ml} \\ &= 145.5094 \text{ ml} \end{aligned}$$

เราต้องการทราบว่าสารละลาย $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ ปริมาณ 150 ml (มีความเข้มข้น 3M) จะต้องใช้สารละลาย $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ ปริมาตรเท่าใด

ปริมาตรสารละลายจำนวน 1000 ml (1ลิตร) จะมีเนื้อสาร $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ (ความเข้มข้น 3M) คิดเป็นปริมาตร

$$= 145.5094 \text{ ml}$$

ปริมาตรสารละลายจำนวน 150 ml จะมีเนื้อสาร $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ (ความเข้มข้น 3M) คิดเป็นปริมาตร

$$= \frac{145.5094}{1000} (150) \text{ ml}$$

$$= 21.8 \text{ ml}$$

แต่ความเข้มข้นของ $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ เท่ากับ 80% โดยปริมาตร ดังนั้น

มีเนื้อสาร $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ (โดยปริมาตร) 80 ml จากปริมาตรสารละลาย = 100 ml

มีเนื้อสาร $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ (โดยปริมาตร) 21.8ml จากปริมาตรสารละลาย = $\frac{100}{80}(21.8)$ ml

= 27.3 ml

ดังนั้นจึงต้องตวง $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ จำนวน 27.3 ml แล้วเติมน้ำให้มีปริมาตร 150 ml

จะได้ความเข้มข้น 3 M ตามต้องการ

การเตรียมสารตั้งต้นเพื่อเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$
โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

มวลโมเลกุลของธาตุ

$$Cd = 112.40 \text{ g/mol}$$

$$Zn = 65.38 \text{ g/mol}$$

$$S = 32.064 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} CdS \text{ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล} &= (112.40) + (32.064) && \text{g} \\ &= 144.464 && \text{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ZnS \text{ 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล} &= (65.38) + (32.064) && \text{g} \\ &= 97.444 && \text{g} \end{aligned}$$

$Cd_{0.8}Zn_{0.2}S$ จำนวน 1 โมล

$$\text{ประกอบด้วย} \quad CdS \quad \text{ปริมาณ} = (0.8)(144.464) = 115.5712 \quad \text{g}$$

$$ZnS \quad \text{ปริมาณ} = (0.2)(97.444) = 19.4888 \quad \text{g}$$

$$\text{ดังนั้น } Cd_{0.8}Zn_{0.2}S \text{ จำนวน 1 โมล มีน้ำหนัก} = 115.5712 + 19.4888 = 135.06 \quad \text{g}$$

ถ้าต้องการ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}S$ จำนวน 1 g

$$\text{ดังนั้น} \quad CdS \text{ จะมีปริมาณ} = (115.5712)/(135.06) = 0.8557 \quad \text{g}$$

$$ZnS \text{ จะมีปริมาณ} = (19.4888)/(135.06) = 0.1443 \quad \text{g}$$

ในกรณีนี้ถ้าเจือ B_2O_3 30 % wt ของ $[CdS + ZnS]$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ } B_2O_3 \text{ จำนวน} &= \frac{30}{100} (0.8557 + 0.1443) \text{g} \\ &= 0.3 \quad \text{g} \end{aligned}$$

การคำนวณที่สัดส่วน(x) ของ Zn ค่าอื่นๆ ก็ทำตามวิธีนี้ เพียงแต่เปลี่ยนค่า x ไปตามที่ต้องการ

ภาคผนวก ค.

การคำนวณค่าสมบัติทางแสงของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การหาค่าดัชนีหักเห (n)

การหาค่าดัชนีหักเห สามารถหาได้จากสมการ

$$n = \left[N + (N^2 - s^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2.30)$$

เมื่อ

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

สมการที่ (2.30) ใช้หาค่าดัชนีหักเห ($n(\lambda)$) ที่ค่าความยาวคลื่นนั้นๆ จากค่า T_M และ T_m

เมื่อ T_M คือ ค่าสูงสุดของการส่งผ่านแสง

T_m คือ ค่าต่ำสุดของการส่งผ่านแสง

การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง (k)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง สามารถหาได้จากสมการ

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (2.15)$$

โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นค่าที่ต้องการคำนวณ

α หาจาก

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{x} \right) \quad (2.17)$$

โดยที่ x สามารถหาได้จาก

$$x = \frac{E_M - [E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n - 1)^3 (n - s^2)} \quad (2.31)$$

เมื่อคำนวณจากค่าที่จุดสูงสุดของการส่งผ่านแสง

เมื่อ

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

และเมื่อกำหนดจากค่าที่จุดต่ำสุดของการส่งผ่านแสงจะใช้สมการ

$$x = \frac{E_m - [E_m^2 - (n^2 - 1)^3(n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n - 1)^3(n - s^2)} \quad (2.32)$$

เมื่อ

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

ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้ $s = 1.51$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจิตติกร จรรยาธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	12 พฤศจิกายน 2518 ที่สมุทรสงคราม
ที่อยู่	56 หมู่ 9 ต.บางช้าง อ.อัมพวา จ.สมุทรสงคราม 75110 โทร 0-3475-2571
ประวัติการศึกษา	2541 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2550 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง 2) ระบบการเตรียมฟิล์มบาง 3) เมมฟิสิกส์
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2547-2548	อาจารย์ผู้ช่วยสอน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2542-ปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์ สำนักฝนหลวงและการบินเกษตร สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, T. Chanyatham, P. Sittiketkorn, N. Promros and P. Prachopchok. **“Effect of Boron Dopant on The Properties of $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S$ Thin Films Prepared by Thermal Evaporation.”** 32th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2006.
2. Ng. Gaewdang, W. Lipar, T. Gaewdang, T. Chanyatham and T. Wongcharoen. **“Some Properties of Chemical Bath Codeposited CdS-ZnS Thin Films.”** 29th Congress on Science and Technology of Thailand, Konkean, Thailand, October 2003.
3. Ng. Gaewdang, W. Lipar, T. Chanyatham, T. Gaewdang and T. Wongcharoen. **“Chemically Deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films Suitable for Solar Cell Application.”** 30th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2004.

4. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, P. Sittiketkorn, T. Chanyatham and P. Prachopchok. **“Structural and Optical Characterization of Sodium Doped Copper Indium Diselenide Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method.”** 32th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2006.
5. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, Pa. Sittiketkorn, S. Kirtsaeng and T. Chanyatham. **“Effects of Selenization Temperature on Some Properties of CuInSe₂ Thin Films.”** 31th Congress on Science and Technology of Thailand, Suranaree University of Technology, Thailand, October 2005.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, A. Harnwunggmoung, P. Siriputtaiwon , P. Prachopchok, P. Sittiketkorn, T. Chanyatham and N. Promros. **“Growth and Characterization of CdTe Thin Films Prepared by Close-Spaced Sublimation Method.”** 32th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2006.
7. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, P. Prachopchok, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham. **“Some Properties of P-Type CuAlO₂ Thick Films Prepared by Screen Printing Method.”** 32th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2006.
8. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham. **“Some Properties of CdTe Thin Films Grown by Thermal Evaporation.”** 30th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2004.
9. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham. **“Growth and Some Properties CdTe Thin Films by Thermal Evaporation .”** 3rd Thailand materials Science and Technology Conference, Bangkok, Thailand, August 2004.
10. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, N. Promros, A. Nakaruk, W. Lipar and T. Chanyatham. **“Photochemical Deposition of CdS Thin Films for Photovoltaic Applications.”** The First National Conference on Applied Optics, 9 January 2004, Bangkok University, Bangkok, Thailand, pp.75-79.