

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ
สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe

PREPARATION AND CHARACTERIZATION SEMICONDUCTOR THIN FILMS
FOR CdTe SOLAR CELL



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1256-2

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ
สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe

PREPARATION AND CHARACTERIZATION SEMICONDUCTOR THIN FILMS
FOR CdTe SOLAR CELL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547
ISBN 974-15-1256-2

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก

PREPARATION AND CHARACTERIZATION SEMICONDUCTOR THIN FILMS
FOR CdTe SOLAR CELL



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

2004

ISBN 974-15-1256-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe
ชื่อนักศึกษา	นายสุกฤษฎี เกิดแสง
รหัสประจำตัว	45061304
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.งามนิตย์ แก้วแดง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ได้เตรียมขึ้นด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีการระเหยสารความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (5 at%) ที่เตรียมโดยการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำประมาณ $1.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ และมีการส่งผ่านแสงสูงถึง 90% ในทำนองเดียวกันฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี และผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที และฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 มีสมบัติทางฟิสิกส์เหมาะสมในการพัฒนาเป็นชั้นหน้าต่าง และชั้นดูดกลืนแสง ตามลำดับ

Thesis Title	PREPARATION AND CHARACTERIZATION SEMICONDUCTOR THIN FILMS FOR CdTe SOLAR CELL
Name	Mr.Sukrit Kirtsang
Student ID	45061304
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit Gaewdang

ABSTRACT

In this thesis, a study of various semiconducting thin films prepared by chemical bath deposition and thermal evaporation techniques is elucidated for suitable CdTe solar cell application. From experimental results, SnO₂:F(5 at%) thin films prepared by thermal evaporation and annealed in oxygen atmosphere 400°C for 30 min show a low resistivity value about $1.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ and high optical transmittance about 90%. In the similar manner, Cd_{1-x}Zn_xS : X=0.4 thin films prepared by chemical bath deposition and annealed in nitrogen atmosphere 300°C for 30 min and CdTe thin films prepared by thermal evaporation and annealed in CdCl₂ atmosphere 400°C for 30 min are shown to have good physical properties for window layer and adsorbtion layer respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์งามนิตย์ แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจน อุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพปฎล สุทธิศิริ และ อาจารย์ เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชา เพื่อใช้ในการวิจัย และให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสาร อิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ต และย่านตามองเห็นในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร และกล้องจุลทรรศน์

ขอขอบคุณ อาจารย์ปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ และอาจารย์พิมล ศิริพจนาวรรณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานกราฟฟิก และการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย ขาวประเสริฐ คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะ และคุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณวีรชัย ลิภา ผู้ช่วยวิจัย สังกัด ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คุณอุปถัมภ์ นาครักษ์ และคุณฐิติกร จรรยาธรรม นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวัสดุทางแสง ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์ และร่วมทำการทดลองการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง สวารกึ่งตัวนำ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครู-อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์จนถึงปัจจุบัน กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ อาจารย์สุพัทธรา วุฑฒยากร และนายสุภาพ เกิดแสง ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

สุกฤษฎี เกิดแสง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างผลึก.....	5
2.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก.....	8
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ.....	9
2.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	10
2.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์.....	11
2.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์.....	13
2.1.3 ข้อบกพร่องผลึก.....	14
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	15
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	18
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	19
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	19
2.4.2 การเกิดสีของผลึก.....	21
2.4.3 การส่งผ่านแสง.....	22
2.4.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	24
2.4.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	27
2.5.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุล.....	27
2.5.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล.....	29
2.5.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	30
2.6 การเตรียมฟิล์มบาง.....	34
2.6.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	35
2.6.1.1 อัตราการระเหยสาร.....	35
2.6.1.2 ความดันไอของธาตุ.....	36
2.6.1.3 การระเหยสารประกอบ.....	38
2.6.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหยสาร.....	39
2.6.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี.....	41
2.6.2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา.....	41
2.6.3 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์.....	42
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	43
3.1.1 การทำความสะอาดกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ.....	43
3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี.....	44
3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	44
3.1.4 การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง.....	44
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ.....	45
3.2.1 การเตรียมกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ.....	45
3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 , $CdTe$, $Cd_{1-x}Zn_xS$	46
3.2.2.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	46
3.2.2.2 การเตรียมสารที่ใช้ในการอบสารละลายเคมี.....	49
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ.....	52

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	53
4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	53
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	54
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	56
4.1.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	58
4.1.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	66
4.2 ฟิล์มบาง $SnO_2:F$	70
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $SnO_2:F$	71
4.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $SnO_2:F$	72
4.2.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $SnO_2:F$	74
4.2.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $SnO_2:F$	76
4.3 ฟิล์มบาง $CdTe$	79
4.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $CdTe$	80
4.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $CdTe$	82
4.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $CdTe$	85
4.3.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $CdTe$	87
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย	90
5.1 สรุปผล.....	90
5.1.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้นลดการสะท้อนแสง/ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง.....	90
5.1.2 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้นหน้าต่าง.....	91
5.1.3 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้นดูดกลืนแสง.....	93
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	96
เอกสารอ้างอิง.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ SnO_2 และ $CdTe$	102
ประวัติผู้เขียน.....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แลตทิซพาราไมเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ..... 6
2.2	ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ..... 7
2.3	ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก.....9
2.4	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการเตรียมโดย วิธีการทางฟิลิกส์ และวิธีการทางเคมี.....34
2.5	แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ..... 38
3.1	แสดงน้ำหนักของสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 และ CdTe 47
3.2	แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X = 0.4$ 50
4.1	แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ ที่คำนวณได้จากการวัดการ เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอน57
4.2	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานและลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนیل และเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....64
4.3	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีไม่มีการฉายแสง และมีการฉายแสงของ ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....67
4.4	แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์ และได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอน73
4.5	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ $10 \text{ at}\%$75
4.6	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ $10 \text{ at}\%$76
4.7	แสดงค่าความหนาแน่นพาหะและสภาพคล่องตัวของพาหะของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ $10 \text{ at}\%$78
4.8	แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอน84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe.....	86
4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง CdTe.....	87
4.11 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง CdTe ที่มีการแอนนีสล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และภายใต้บรรยากาศของก๊าซCdCl ₂ ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที.....	88
5.1 แสดงผลการทดลองค่าสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม ในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.....	95



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ..... 5
2.2	การบอกระนาบต่างๆของผลึก.....8
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....10
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์.....11
2.5	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์กับแบบซิงค์เบลนด์.....12
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์.....13
2.7	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบต่างๆ..... 14
2.8	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์.....15
2.9	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....16
2.10	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรน จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....17
2.11	แสดงภาพถ่ายผิวหน้าที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 18
2.12	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรีนซิก 19
2.13	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$).....20
2.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์($T = 0\text{ K}$).....21
2.15	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง.....22
2.16	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน.....23
2.17	แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะ ฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มิ-ดิแรกและความหนาแน่นของพาหะอิสระ.....28
2.18	ลักษณะการต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์พาว์.....30
2.19	วงจรการวัดการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานสูง..... 32
2.20	แสดงการหาค่าความต้านทานของฟิล์มบาง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในวงจรกับความต่างศักย์คร่อมฟิล์ม.....33
2.21	กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว.....37

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว.....37
2.23	แสดงรูปแบบการระเหยของสาร.....39
2.24	แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง.....42
3.1	แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ46
3.2	แสดงระบบการแอนนیلฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำในภายใต้บรรยากาศต่างๆ.....51
4.1	ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X = 0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....53
4.2	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....54
4.3	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มโดยวิธีการอบสารละลายเคมี.....55
4.4	แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....56
4.5	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนิล และเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....58
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนิล และเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....60

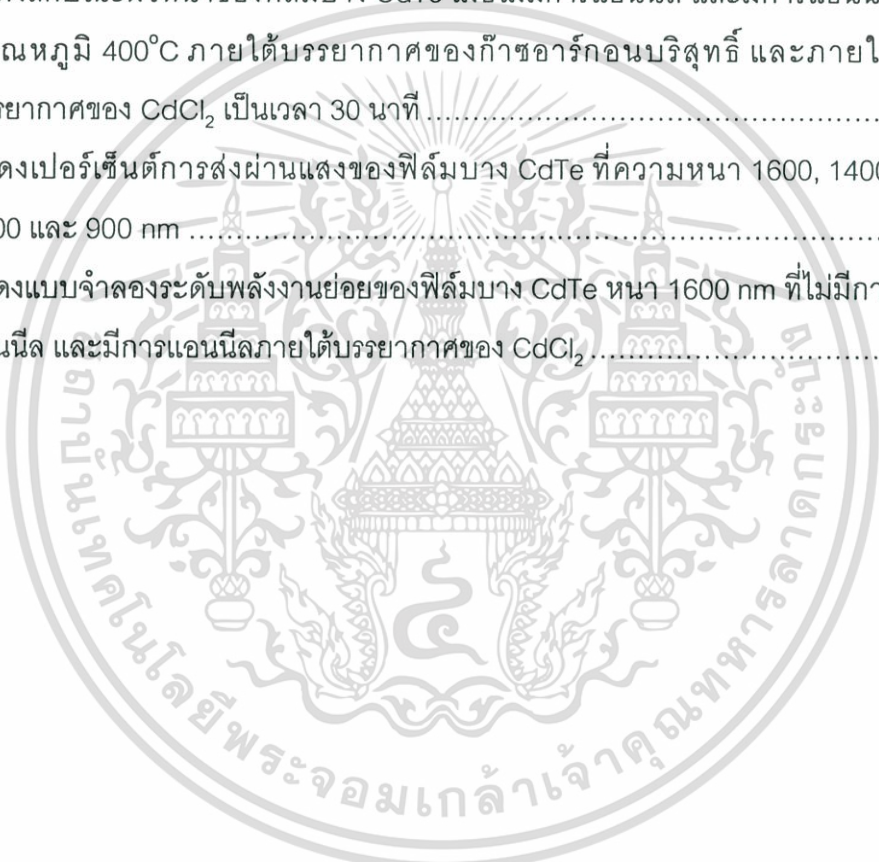
สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กราฟแสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g1} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานฟोटอน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	62
4.8 กราฟแสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g2} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานฟोटอน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	63
4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g1} และ E_{g2} ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอุณหภูมิการแอนนีกัลต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	64
4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ในกรณีที่ไม่มี การฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที.....	67
4.11 แสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	68
4.12 แสดงแบบจำลองระดับพลังงานย่อยของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$	69
4.13 แสดงลักษณะฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at%.....	70
4.14 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at%.....	71
4.15 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at%.....	72
4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at%.....	74
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับ พลังงานฟोटอนของฐานรองรับ และฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at%	75
4.18 แสดงแบบจำลองการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากขอบล่างสุดของ แถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำของฟิล์มบาง $SnO_2:F$	77
4.19 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะ สภาพคล่องตัวของพาหะ และสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at%.....	78
4.20 ฟิล์มบาง $CdTe$ ที่ความหนา $1600, 1400, 1100$ และ 900 nm.....	79
4.21 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $CdTe$ ที่ความหนา $1600, 1400, 1100$ และ 900 nm	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdTe เมื่อมีการแอนนีกัลที่ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และภายใต้บรรยากาศของ CdCl ₂ เป็นเวลา 30 นาที.....	81
4.23 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm	82
4.24 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และภายใต้บรรยากาศของ CdCl ₂ เป็นเวลา 30 นาที.....	83
4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm	85
4.26 แสดงแบบจำลองระดับพลังงานย่อยของฟิล์มบาง CdTe หนา 1600 nm ที่ไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของ CdCl ₂	89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ที่ค้นพบโดย เบคเคอเรล (Becquerel) กล่าวคือเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด นักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มให้ความสำคัญกับการประดิษฐ์และพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่ช่วงประมาณ พ.ศ. 2520 เนื่องจากวิกฤตการณ์น้ำมันโลกขาดแคลน สะท้อนให้เห็นว่าแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลนั้นเริ่มหมดลงทุกวัน นอกจากนี้ปัญหาก็เกี่ยวกับความแห้งแล้ง ยังส่งผลให้น้ำที่ใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า เริ่มขาดแคลนส่งผลให้โรงงานผลิตไฟฟ้าไม่สามารถผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของประชากรที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นได้ อีกทั้งพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ยังเป็นพลังงานสะอาด ไม่สร้างมลภาวะ และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดีจะมีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำในระยะยาวอีกด้วย

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) เป็นอีกหนึ่งแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อสนองตอบต่อความต้องการพลังงานในอนาคต เมื่อปี พ.ศ. 2503 ไวฟล์ (Walf M.) ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ขึ้นเป็นคนแรก [1] โดยเสนอให้ใช้วัสดุที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่างกันมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงได้มีผู้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ขึ้นอีกหลายๆ ระบบด้วยกัน

ในปี พ.ศ. 2497 เรโนลด์ (D.C. Reynolds) ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ Cu_2S กับ CdS ขึ้นเป็นครั้งแรก และได้ประสิทธิภาพสูงถึง 6% [2] นอกจากนั้นยังเป็นที่แรกที่มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอีกด้วย ในปีต่อมาสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ให้เพิ่มขึ้นเป็น 10% แต่หลังจากที่นำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ไปใช้งานพบปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของทองแดงจากชั้น Cu_2S ไปยังชั้น CdS เมื่อความชื้นสูงคืออุณหภูมิสูงกว่า $60^\circ C$ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงอย่างรวดเร็วทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์สั้นจึงไม่คุ้มค่ากับการผลิตขึ้นใช้ในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงเกือบ 20% ในอีก 20 ปีต่อมา

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่เด่นและน่าสนใจมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ มี 2 ชนิด คือ CdS/CIGS และ CdS/CdTe โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdS/CdTe ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรก ในปี พ.ศ. 2515 โดยโบเน็ต (Bonnet) และสามารถประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdS/CdTe ได้ ประสิทธิภาพ 5-6%[3] จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในปัจจุบัน 16.2%[4] และยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพได้อีกมากเนื่องจากประสิทธิภาพในเชิงทฤษฎีของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมากกว่า 28% เซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในปัจจุบันที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้วคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdS/CIGS ที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย เวคเนอร์ (S. Wagner) ในปี พ.ศ. 2517 ได้ประสิทธิภาพสูงถึง 12 % [5] และในปี พ.ศ. 2519 คาร์เมอสกี้ (Kazmerski) ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdS/CuInSe₂ ชนิดฟิล์มบางได้ประสิทธิภาพ 4-5 % [7] และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถใช้ได้ในเชิงพาณิชย์โดยห้องปฏิบัติการ พลังงานทดแทนแห่งชาติ (the National Renewable Energy Laboratories : NREL) ประเทศ สหรัฐอเมริกา และโดยสมาคมยุโรปซีไอเอส (the EuroCIS consortium) ในยุโรป และปี พ.ศ. 2541 บริษัทซีเมนส์โซลาร์ (Siemens Solar) สามารถพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CuInSe₂ เข้าสู่ ตลาดในเชิงพาณิชย์ได้เป็นครั้งแรกโดยมีประสิทธิภาพในเบื้องต้นสูงถึง 10%

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียม และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnO₂ ฟิล์มบาง CdTe และฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อใช้สำหรับการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe ชนิดฟิล์มบาง สิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้มีต้นทุนต่ำ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยาก และสามารถผลิตให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ โครงสร้างของเซลล์ใช้ ฟิล์มบาง SnO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (anti reflection) และเมื่อทำการเจือฟลูออไรด์สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ จะลดลงมากจึง สามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (TCO) เพื่อทดแทนขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (front contact) จาก โลหะได้อีกด้วย ใช้ฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) ทดแทนฟิล์มบาง CdS เนื่องจากฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS มีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่า CdS จึงสามารถส่งผ่านแสงได้ช่วง กว้างกว่า นอกจากนั้นยังพบว่าในกรณีที่มีปริมาณ Zn=40% ผิวหน้าของฟิล์มบางจะมีลักษณะ เป็นแบบเทคเจอร์ (textured surface) สม่่าเสมอ [7] ทำให้การดูดแสงดีขึ้น และสามารถดูดกลืน แสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดี นอกจากนั้นเป็นการลดปริมาณการใช้แคดเมียมลงอีกด้วย [8, 9] การเตรียมฟิล์ม Cd_{1-x}Zn_xS โดยวิธีการออบสารละลายเคมีมีกระบวนการเตรียมไม่ซับซ้อน ฟิล์มมี คุณภาพดี ทำได้ครั้งละหลายๆ เหมาะสำหรับการใช้เป็นกระบวนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdTe และ SnO₂ บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Thermal Evaporation : TE) โดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี X=0.4 บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition : CBD)
- 1.2.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnO₂, CdTe และ Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี X=0.4 ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
- 1.2.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdTe ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.5 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง SnO₂, CdTe และ Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี X=0.4 เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.6 ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂, CdTe และ Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี X=0.4 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้นต่างๆ ที่เหมาะสมในการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการเตรียมที่เหมาะสมคือมีวิธีการเตรียมไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตต่ำ และให้ประสิทธิภาพสูง เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe ชนิดฟิล์มบาง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงหลักการ และวิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 , CdTe บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงหลักการ และวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnO_2 , CdTe และ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติการส่งผ่านทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ที่เหมาะสมกับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe
- 1.4.4 ทำให้ได้ข้อมูลนำไปปรับปรุงและพัฒนากระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น
- 1.4.5 นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ไปช่วยพัฒนาการสร้างแหล่งพลังงานทดแทนที่ปราศจากมลพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

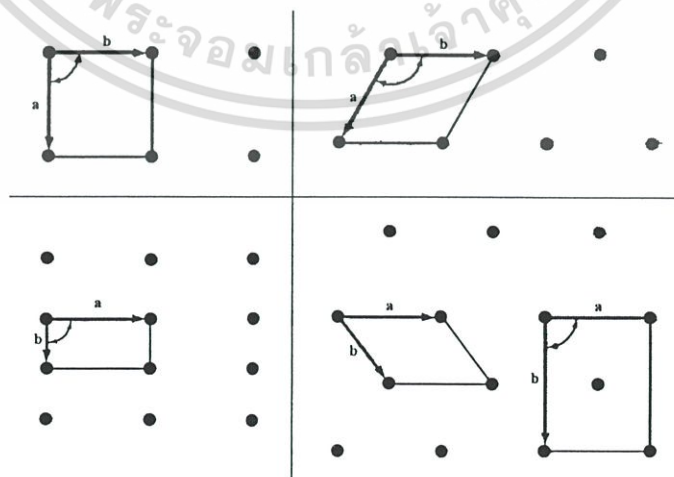
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

เซลล์แสงอาทิตย์ CdTe ชนิดฟิล์มบางประดิษฐ์ขึ้นจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกันออกไปตามหน้าที่ต่างๆ เช่นฟิล์มบางที่เหมาะสมกับการใช้เป็นชั้นหน้าต่างจะต้องสามารถส่งผ่านแสงได้ในช่วงกว้าง เป็นต้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางชั้นต่างๆ ก่อนนำมาพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe ชนิดฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด เนื้อหาในบทที่ 2 เป็นทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นชั้นต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe

2.1 โครงสร้างผลึก[10,11]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุด ที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูงตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


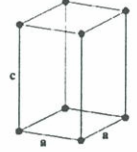
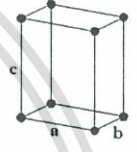

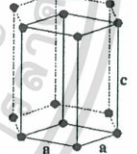
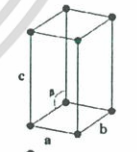
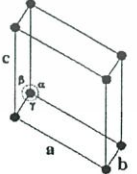
ในระบบสองมิติแลตทิซพารามิเตอร์ ได้แก่ เวกเตอร์ \bar{a} และ \bar{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของแลตทิซที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แลตทิซพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ[10,11]

ชนิดของแลตทิซสองมิติ	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)	$a \neq b$	ไม่มีข้อ กำหนด

ในระบบ 3 มิติ แลตทิซพารามิเตอร์ ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \bar{a}, \bar{b} และ \bar{c} และ มุม α, β และ γ ที่เป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 โดยสามารถจัดแบ่งรูปแบบแลตทิซ ขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ และจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนอล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และเฮกซะโกนอล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ[10,11]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก[12]

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุให้แน่ชัดว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ โดยจะกล่าวถึง ตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

1. การระบุตำแหน่ง

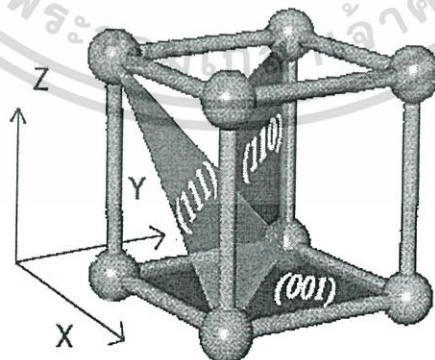
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น x,y,z เช่น จุด 1,2,3 หมายความว่าคือเป็นตำแหน่งที่พิกัด $x=1$, $y=2$ และ $z=3$

2. การระบุทิศทาง

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

3. การระบุระนาบ

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $(h\ k\ l)$ ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์(miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่นระนาบ(010) จะตัดแกน $x\ y\ z$ ที่จุด $\infty, 1, \infty$ (ระยะอนันต์หมายถึงไม่ตัดกับแกนนั้น) รูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

- สำหรับระบบเอ็กซ์เทนซันจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hkil) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ที่เพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

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

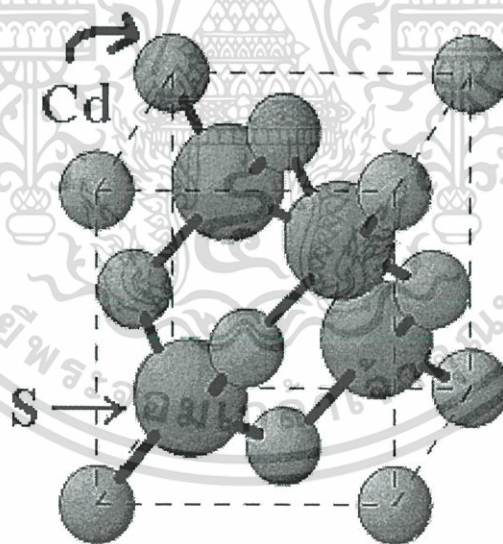
- ในระบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีเหมือนกัน นั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ[10,11]

โครงสร้างแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ เรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน ทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ต่างกัน เช่น สมบัติทางแสง ช่องว่างแถบพลังงาน สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์(zincblende structure)[10,11]

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่(binary compound semiconductor) ได้แก่ สารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่กลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่กลุ่ม II-VI เช่น CdS, CdTe เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่ โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงสร้างผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิด แต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่น ใน CdS อะตอมของ Cd จะอยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ 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 และมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า โครงสร้างผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.3 สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น โดยโครงสร้างผลึกแบบนี้เหมาะสำหรับใช้เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญในการนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

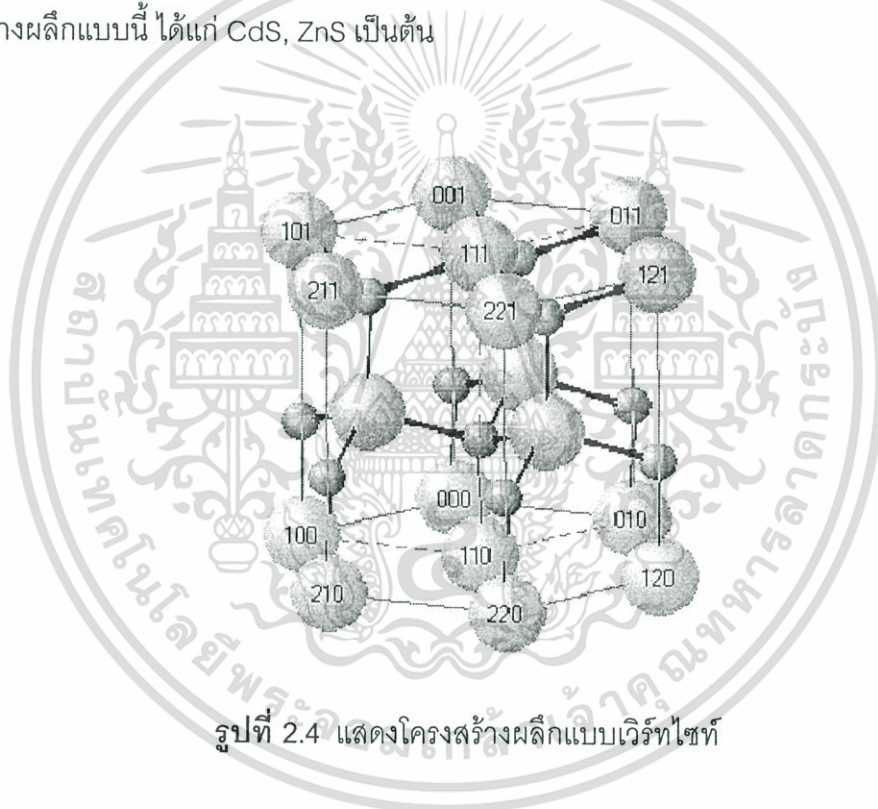


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

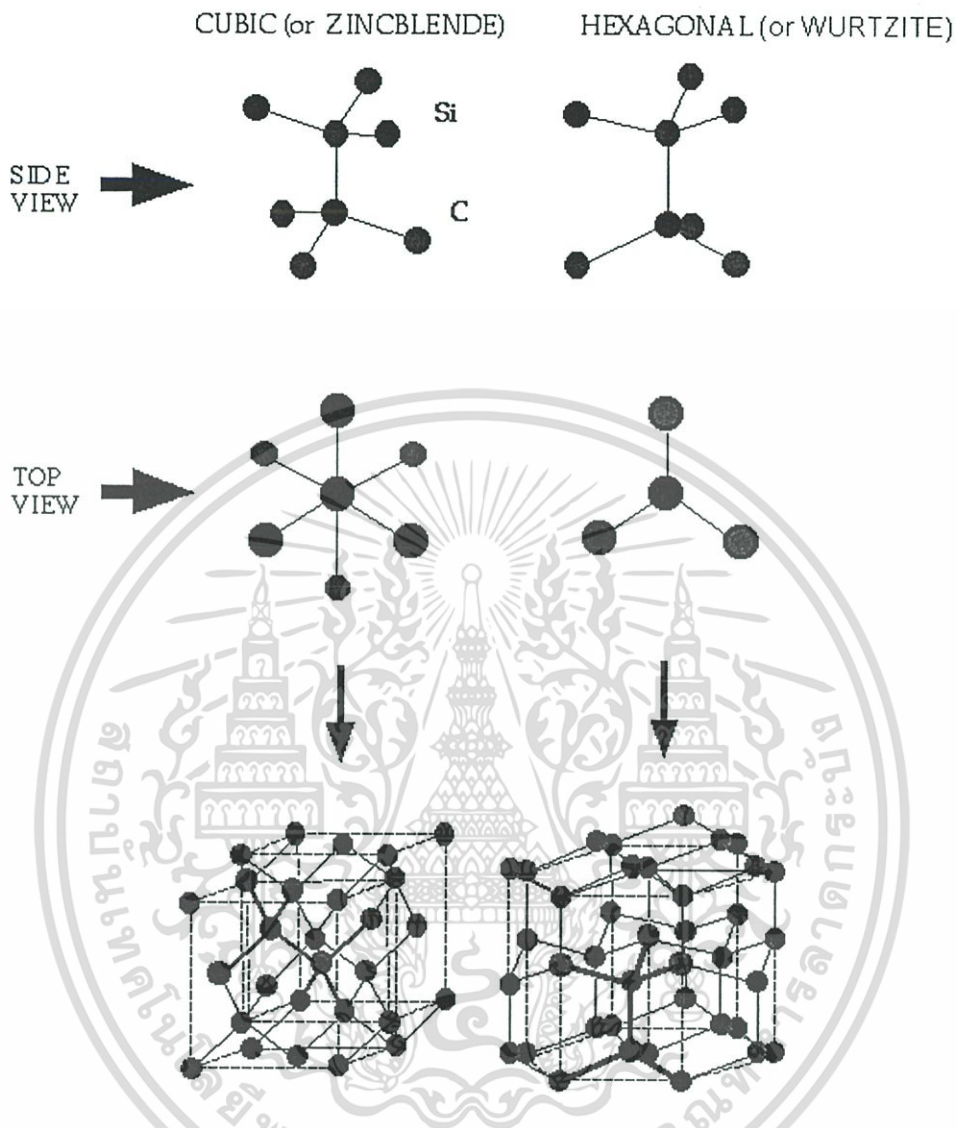
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ดังรูปที่ 2.4 โดยเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ อยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์จะมีแปดอะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่สี่อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอลแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์



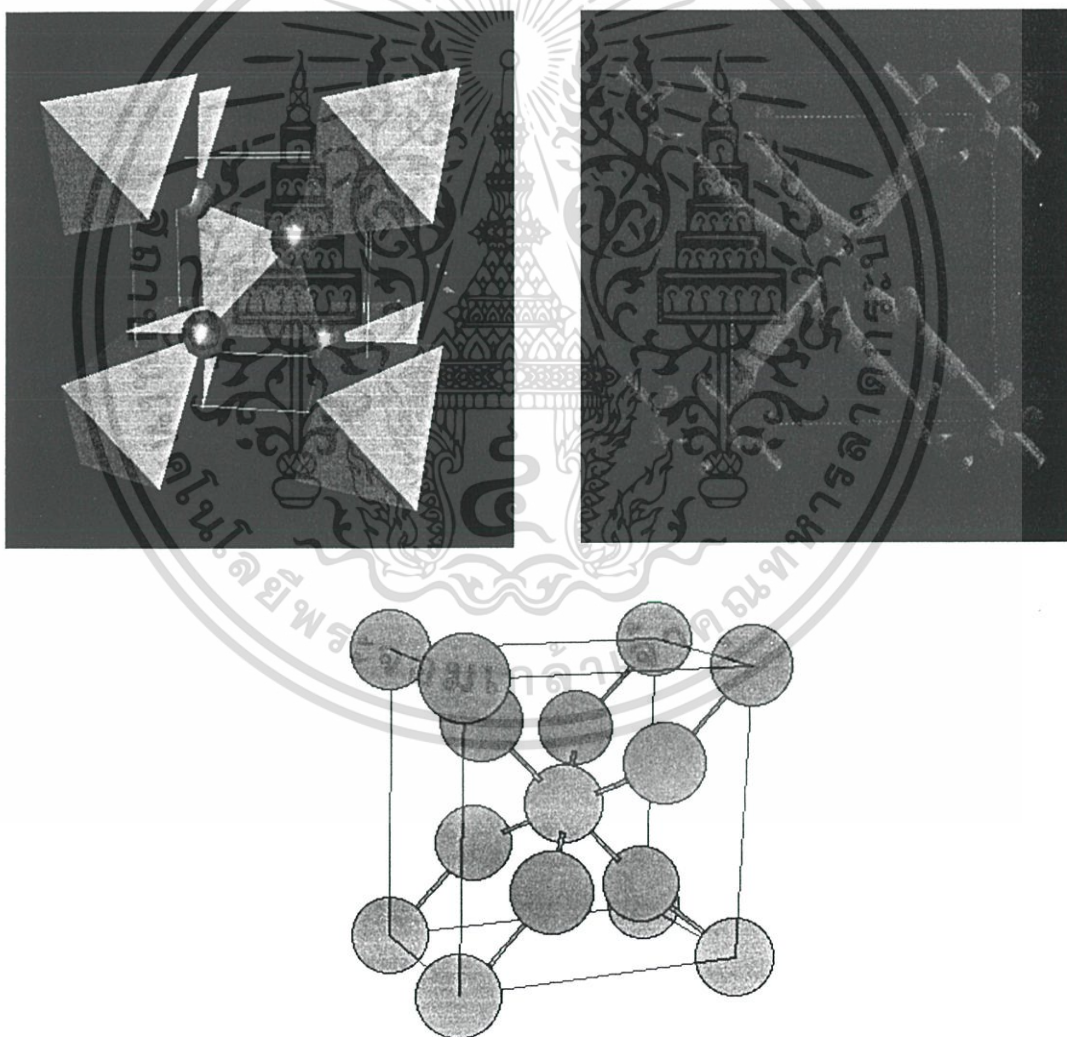
รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์กับแบบซิงค์เบลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (rutile structure) [13,14]

โครงสร้างแบบรูไทล์ (AO_2 : โดยที่ A ได้แก่ Ti, Ge, Sn เป็นต้น) สามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ตัวอย่างเช่นในกรณีของ SnO_2 ตำแหน่งของ Sn อยู่ที่แต่ละมุมของเซลล์ และ Sn ที่เป็นอะตอมกลางจะสร้างพันธะกับออกซิเจน 6 อะตอมแบบออกตะฮีดรอล (octahedral) ที่บิดเบี้ยวอยู่ตรงกลาง สำหรับออกตะฮีดรอลดังกล่าว ไอออนของ Sn แต่ละไอออนจะล้อมรอบด้วยไอออนของออกซิเจนที่ใกล้ที่สุด 4 ไอออน และอยู่ห่างออกไปอีก 2 ไอออน ไอออนของ Sn อยู่ในหน่วยเซลล์เตตระโกนอลที่ตำแหน่ง 000 , $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ และไอออนของออกซิเจนอยู่ที่ตำแหน่ง $x,x,0$; $-x,-x,0$; $\frac{1}{2}+x, \frac{1}{2}-x, \frac{1}{2}$; $\frac{1}{2}-x, \frac{1}{2}+x, \frac{1}{2}$

สารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์มีหลายสารประกอบ เช่น TiO_2 , GeO_2 , IrO_2 , MoO_2 , NbO_2 , PbO_2 , RuO_2 , TiO_2 , SiO_2 , TeO_2 , SnO_2 เป็นต้น

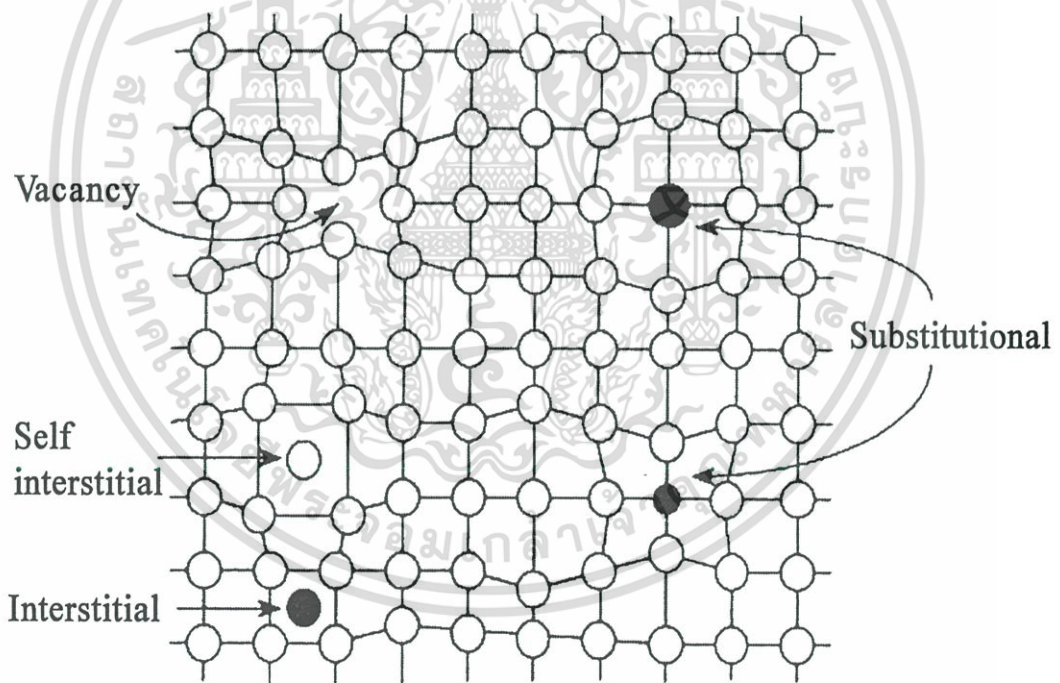


รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ข้อบกพร่องผลึก [10,11]

การเกิดข้อบกพร่องผลึก (defect crystal) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ในผลึกจริงจะมีข้อบกพร่องผลึกหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นข้อบกพร่องที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดไปจากโครงผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.7 ข้อบกพร่องผลึกแบบซัปสติติวชันนัล (substitutional defect) เป็นข้อบกพร่องที่มีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) เป็นข้อบกพร่องแบบที่มีอะตอมไปแทรกในบริเวณที่ควรเป็นที่ว่างของผลึก เป็นต้น ข้อบกพร่องแบบเชิงเส้น (line defect) เช่น สลิป (slip) เป็นข้อบกพร่องที่ระนาบของอะตอมเลื่อนไถลไป ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocation) เป็นข้อบกพร่องที่มีระนาบของสลิปตั้งฉากกับทิศทางการไถลของสลิป ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocation) คือข้อบกพร่องผลึกแบบที่ระนาบสลิปขนานกับทิศการไถลของสลิป



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบต่างๆ

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์[10,11]

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้รังสีเอกซ์ ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบสารตัวอย่างที่อาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่าง จะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

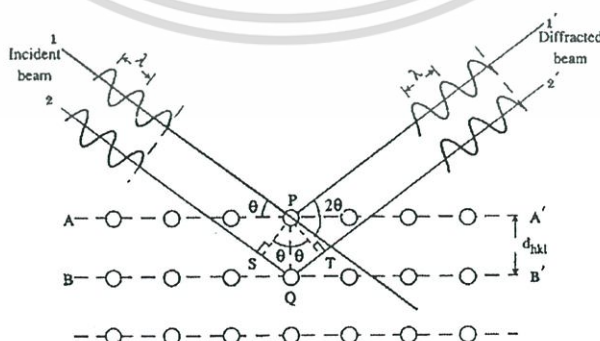
ในปี พ.ศ. 2455 แบรกก์ได้เสนอแนวคิดว่า สามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ(plane) ของอะตอมที่สามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบ เท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าว จะมีความเข้มสูงและ แทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน(path difference) ของคลื่นที่สะท้อน จากระนาบที่อยู่ข้างเคียง จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการ

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

เมื่อ

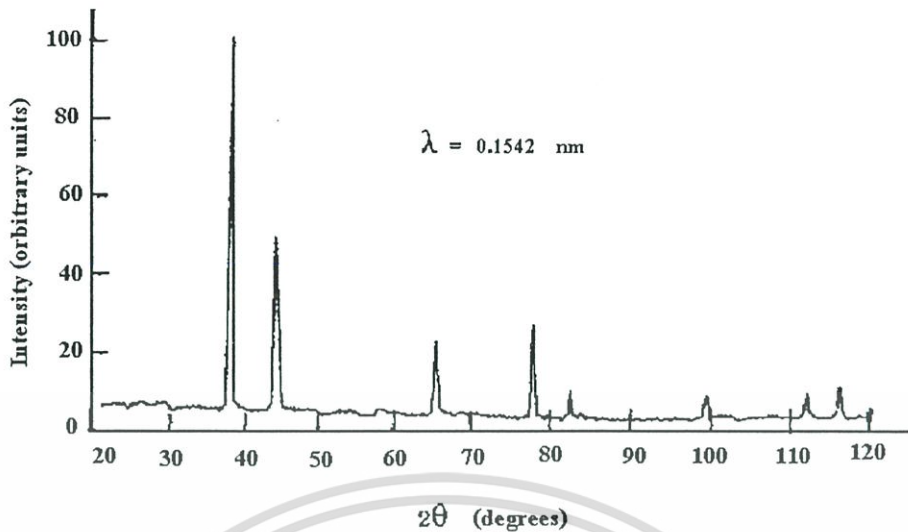
d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก
 n คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,...
 λ คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบ แล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์(Bragg plane) และ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) โดยมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

รูปที่ 2.9 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) สำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน โดยสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

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

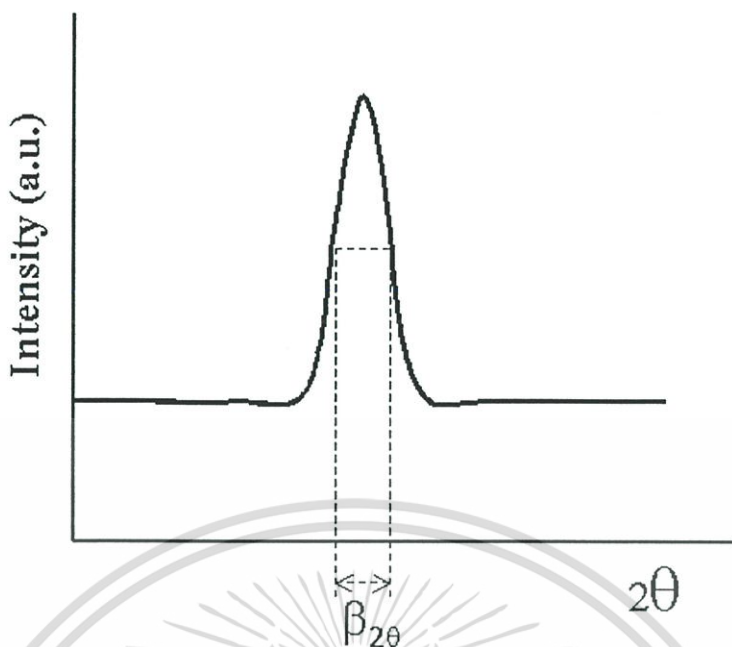
และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลคือ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ระนาบของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

พิจารณารูปที่ 2.10 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ [8,15]

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

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 K คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะเวลากว้างของพีคที่ความเข้มมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด
 (FWHM : Full Width at Half-Maximum of the diffraction peak)

นอกจากนั้นยังสามารถหาค่าความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain) ได้จากสมการ

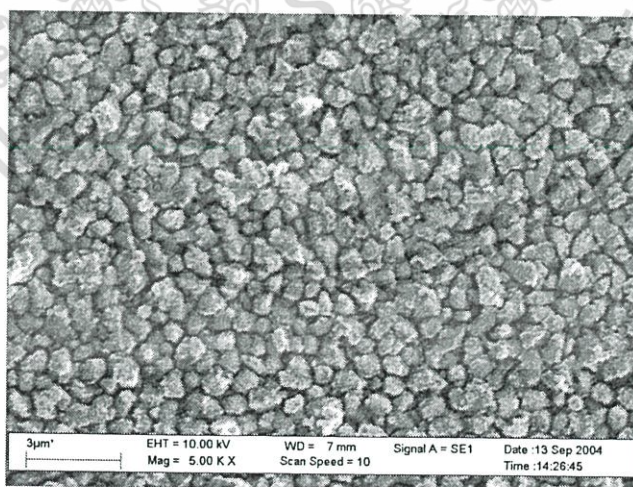
$$\varepsilon = (\beta_{2\theta} \cos \theta) / 4 \quad (2.6)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดระดับจุลภาค

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[8,16]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope : SEM) ที่ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทำงานคือใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจจแจงรายละเอียดต่ำ (lower solution) ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพรมัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็ก และระบบภาพ มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

ภาพถ่ายผิวหน้าที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถใช้ประกอบการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคได้เนื่องจากสามารถนำขนาดของเกรนที่ปรากฏขึ้นบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำไปเปรียบเทียบกับขนาดของเกรนที่คำนวณได้จากค่า FWHM นอกจากนี้บางกรณียังสามารถทำนายโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ ได้จากภาพถ่ายผิวหน้าที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกด้วย



รูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

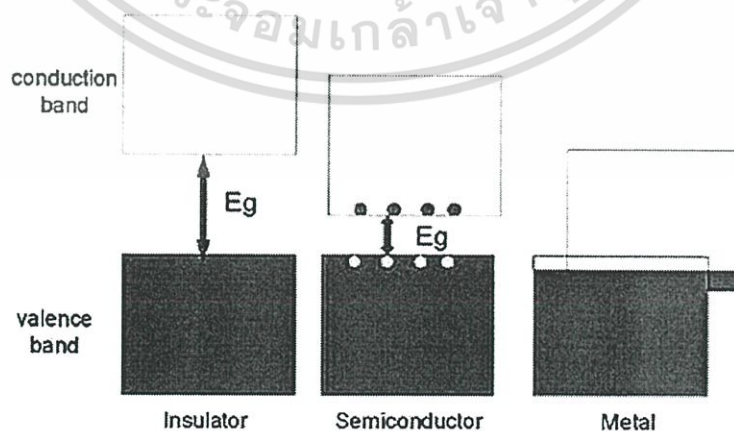
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ[8,10,11]

การศึกษาสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การเกิดสีของผลึก การส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

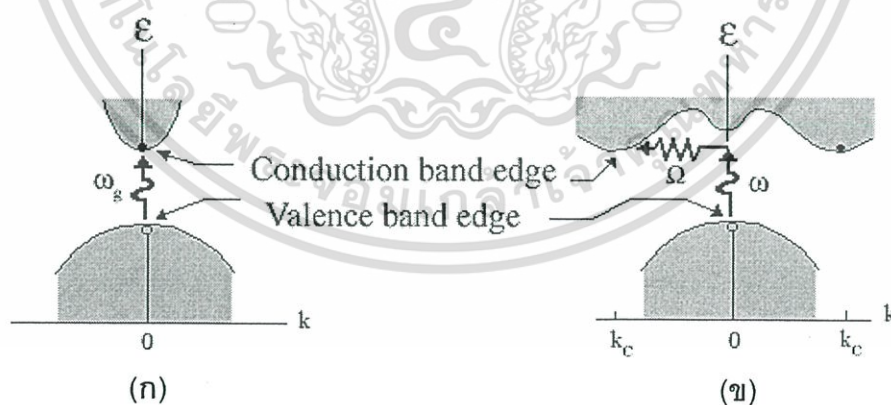
โดยทั่วไปนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินซิก (intrinsic) ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ ลักษณะของโครงสร้างพลังงานแบบง่ายแสดงดังรูป 2.12 ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำ (conduction band) สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และมีแรงทางไฟฟ้าสถิตยึดเหนี่ยวอะตอมเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย ในส่วนของแถบนำจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ สำหรับตัวนำจะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บางส่วนแล้วระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลย จึงเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณต้องห้าม หรือแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) โดยจะเรียกความกว้างของช่องนี้ว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะถูกนำมาใช้แบ่งแยกชนิดสารต่างๆ คือ ฉนวนมี $E_g > 3\text{eV}$ สารกึ่งตัวนำมี $E_g < 3\text{eV}$ และตัวนำไม่มีค่า E_g เพราะมีค่าแถบวาเลนซ์ และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ถูกเรียกว่า ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ที่สามารถบอกขนาดด้วยค่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอน และโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้าง หรือทำลายโฟนอน ดังรูปที่ 2.13(ก) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.14(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟนอน ที่มีความมากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ที่มีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอน และโฮลอิสระ (E_{vert}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังรูปที่ 2.13(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังรูปที่ 2.14(ข)

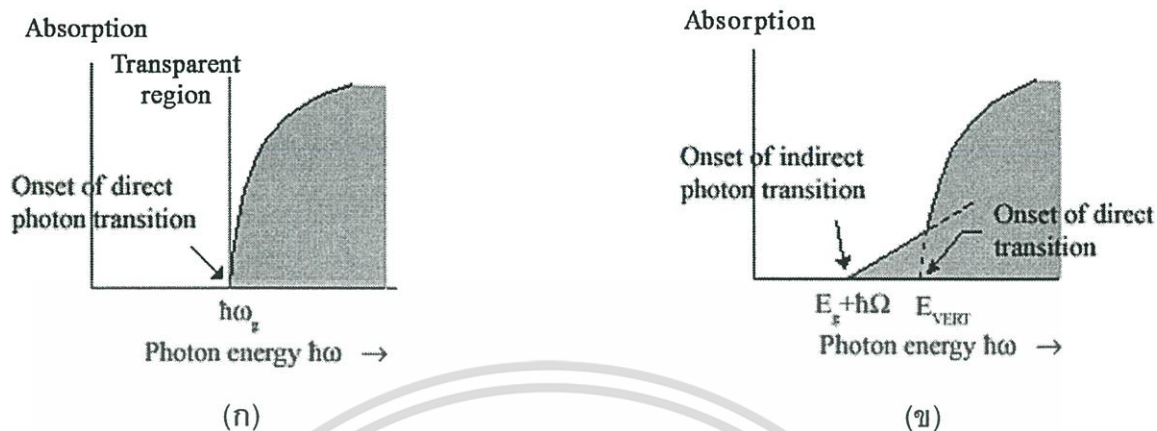


รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

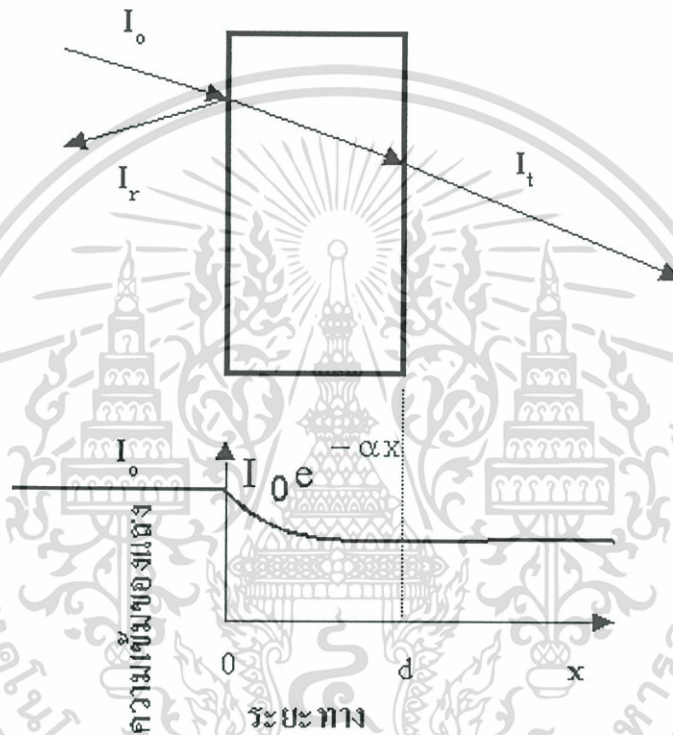
2.4.2 การเกิดสีของผลึก[10,11]

นอกจากนี้ค่าช่องว่างแถบพลังงานยังเป็นตัวกำหนดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของสารตลอดจนการเกิดสีของผลึกอีกด้วย การเกิดสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่พลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน ($h\omega \leq E_g$) ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmitted) ออกจากผลึก เราจึงเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdZnS จะมีสีเหลืองส้ม เนื่องจากมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.7 eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจนถึงสีน้ำเงินหรือเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาหมด และเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับสีเหลืองส้ม จึงสังเกตเห็นผลึก CdZnS มีสีเหลืองส้มเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การส่งผ่านแสง[10,11]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อน และการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

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

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	I_0 คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	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

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

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

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

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.4.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืน และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมามีรูปที่ 2.15 โดย

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

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

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

ค่าดัชนีหักเหของผลึก $n_c = n - iK$ (2.14)

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
 K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงควรมีค่าน้อยที่สุด

2.4.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง[10,11]

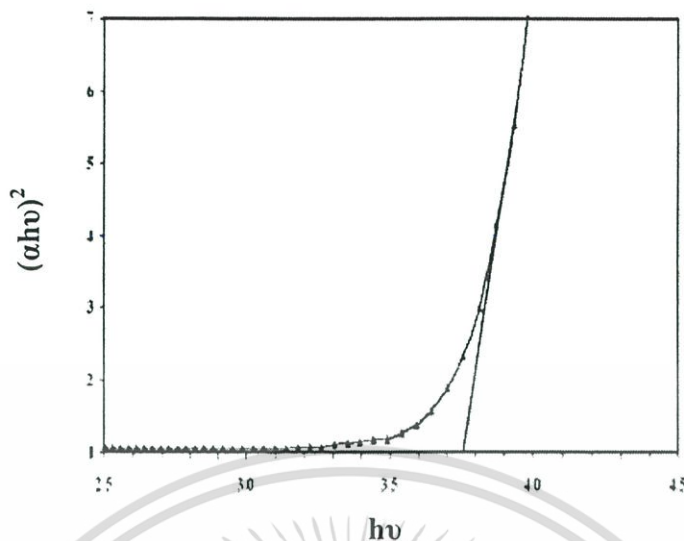
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับ ผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง จากรูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปจะไม่คิดค่าการสะท้อน เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่จะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนแสงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.17)$$

$$(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.18)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่

และสมการที่ (2.17) ใช้กับสารกึ่งตัวนำที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

สมการที่ (2.18) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ[11,17-19]

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้าม และแถบนำ สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 eV ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอน และโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

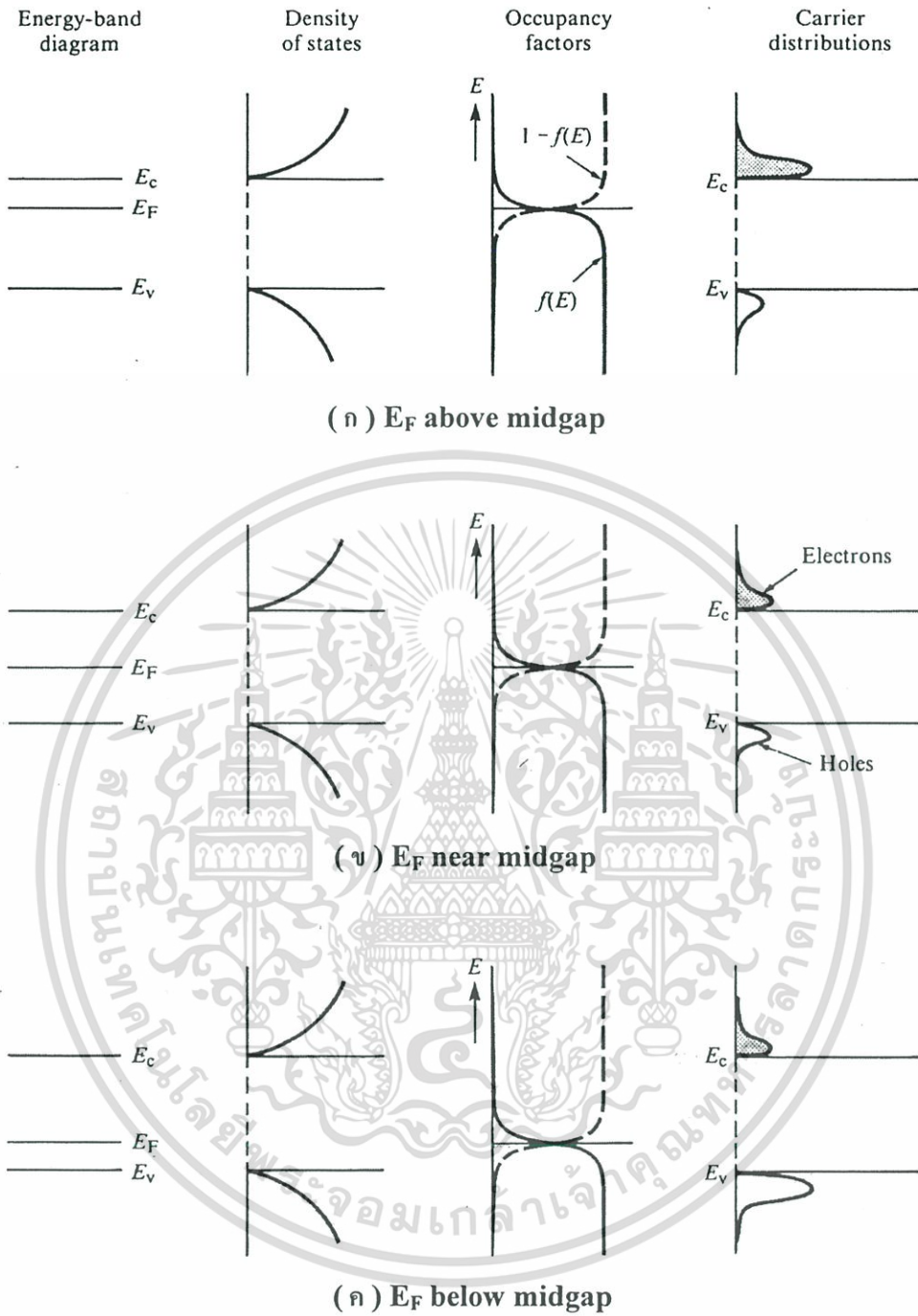
2.5.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุล[11,17-19]

การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับปริมาณพาหะอิสระ กล่าวคืออิเล็กตรอน และโฮล เมื่ออิเล็กตรอนในแถบนำ หรือโฮลในแถบวาเลนซ์เพิ่มขึ้น สารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของผู้ให้ (N_D) ความหนาแน่นของผู้รับ (N_A) และอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ โอกาสที่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนที่สภาวะสมดุลโดยทำนายได้จากฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi - Dirac Distribution function) [11,18]

$$f(E) = \frac{1}{\exp((E - E_F) / kT) + 1} \quad (2.19)$$

เมื่อ $f(E)$ คือ โอกาสที่อิเล็กตรอนจะอยู่ได้ที่ระดับพลังงาน E
 k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzmann Constant)
 T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
 E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

ระดับพลังงานเฟอร์มี หมายถึง ระดับพลังงานที่กำหนดสภาวะเชิงความร้อนของระบบ ระดับพลังงานเฟอร์มีนอกจากจะขึ้นกับอุณหภูมิของระบบแล้ว ยังขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนทั้งหมดในระบบอีกด้วย



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะ ฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มิ-ดิแรกและความหนาแน่นของพาหะอิสระ ตามลำดับ

- (ก) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก
- (ค) สารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล[10,11,17,20]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะได้รับแรงกระตุ้นจากสนามไฟฟ้า และเกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์มจะได้ว่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไป จะได้

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2.20)$$

$$J = nqV_d \quad (2.21)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
 q คือ ประจุของอิเล็กตรอน
 V_d คือ ความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) ของอิเล็กตรอน

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำ คือ

$$\sigma = nq\mu_n \quad (2.22)$$

จากความสัมพันธ์ของสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility)

$$\mu = \frac{V_d}{E}$$

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากโฮลในแถบวาเลนซ์ คือ

$$\sigma = pq\mu_p$$

เมื่อ p คือ ความหนาแน่นของโฮล

μ_p คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของโฮล

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอน และโฮลในแถบวาเลนซ์ คือ

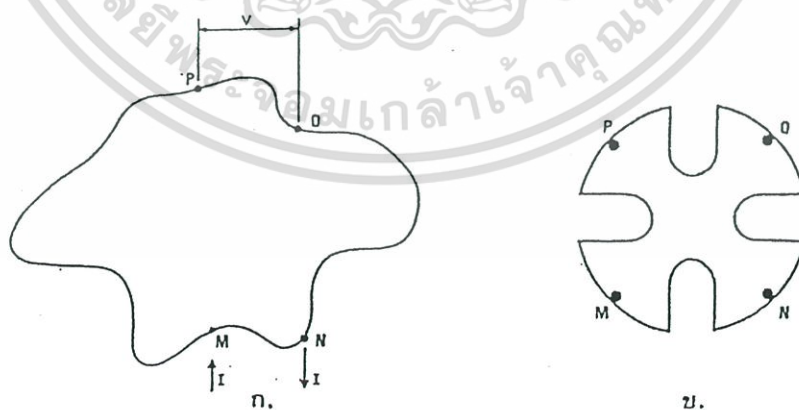
$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

จากความสัมพันธ์สภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity : ρ) มีค่าเป็น $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจึงเป็นไปตามสมการ

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.23)$$

2.5.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า[8,21-23]

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำมีหลาย เช่น วิธีวัดโดยตรง (Direct method) วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two point probe method) วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (Linear four-point probe method) วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน (Non-collinear probe spacing method) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์พาว์ (Van der Pauw method) โดยเป็นส่วนหนึ่งของวิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เนื่องจากวิธีแวนเดอร์พาว์เป็นที่ยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact)



รูปที่ 2.18 (ก) แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง

(ข) การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.18 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{MN} ผ่านเข้าทางจุด M ออกทางจุด N จากนั้นทำการวัดความต่างศักย์ $V_{PO} = V_P - V_O$ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$R_{MN,PO} = \frac{V_P - V_O}{I_{MN}} \quad (2.24)$$

เมื่อเปลี่ยนกระแสให้ไหลเข้าทางจุด N ออกทางจุด O จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} \quad (2.25)$$

ทั้งสมการที่ (2.24) และ (2.25) จะปรากฏในความสัมพันธ์ดังนี้

$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{MN,OP}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{NO,PM}\right) = 1 \quad (2.26)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง
สมการที่(2.26) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\rho = \frac{\pi d (R_{MN,OP} + R_{NO,PM})}{\ln 2} f\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right) \quad (2.27)$$

เมื่อ f คือ ฟังก์ชันของ $\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right)$ เรียกว่าแฟกเตอร์แก้ (correcting factor)

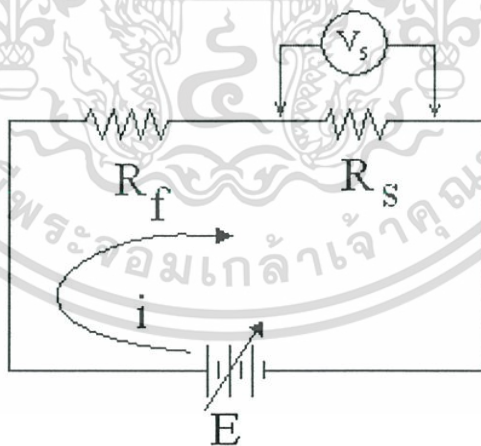
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์พาว์จะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ขั้วไฟฟ้าต้องมีสมบัติที่ดี เพื่อลดปัญหาเรื่องความต้านทานบริเวณรอยต่อ และไม่ให้เส้นสมศักย์ (equipotential line) บิดเบี้ยว (distorted) โดยรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี
2. ความหนาของสารตัวอย่างจะต้องมีความสม่ำเสมอตลอด และเนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรอยแตกหรือเป็นรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้วไฟฟ้าต้องสัมผัสที่ขอบของสารกึ่งตัวนำและต้องมีขนาดเล็กมากๆ เมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าคิดว่าสารตัวอย่างเป็นแบบกึ่งอนันต์ (semi-infinite) คือ ให้กระแสที่ไหลและค่าความต่างศักย์บนพื้นสารตัวอย่างเสมือนอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน
4. ไม่ควรออกแรงกดขั้วสัมผัสแรงเกินไป เพราะอาจทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหายแตกร้าวได้
5. ไม่ควรใช้กระแสไฟฟ้าสูงเกินไป เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะเกิดความร้อนทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์(impedance) สูงๆ ด้วย
6. การเพิ่มความยาวเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำ จะช่วยลดปัญหาความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ดังรูป 2.18(ข)

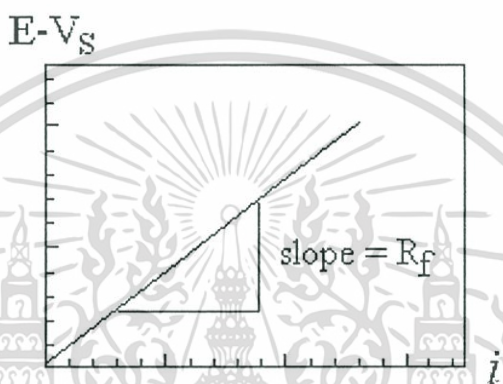
ในกรณีที่ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงๆ เช่น ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีการเจือสังกะสีมากๆ และฟิล์มบาง $CdTe$ ที่ไม่มีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศของ $CdCl_2$ กรณีเหล่านี้ไม่สามารถวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์พาว์วได้ เนื่องจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงเกินไป จึงเลือกใช้วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง[8]



รูปที่ 2.19 วงจรการวัดการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) ผ่านวงจรที่มีความต้านทานสองค่าคือความต้านทานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ (R_f) และความต้านทานจากตัวต้านทานมาตรฐาน (R_s) ขนาด 5000Ω จากนั้นทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานมาตรฐาน (V_s) เพื่อหากระแสในวงจรจาก $i = \frac{V_s}{5000}$ และทำการหาความต่างศักย์คร่อมฟิล์มบางได้จาก $E - V_s$ จากนั้นทำการเปลี่ยนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอีก 5 ค่า บันทึกค่ากระแสในวงจร และความต่างศักย์คร่อมฟิล์มบาง ($E - V_s$) สุดท้ายนำผลการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า i และ ค่า $E - V_s$ เพื่อทำการหาความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 2.20 แสดงการหาค่าความต้านทานของฟิล์มบาง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในวงจรกับความต่างศักย์คร่อมฟิล์ม

2.6 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสามารถจำแนกได้เป็น 2 วิธี ตามลักษณะการเตรียมคือ การเตรียมด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ และการเตรียมด้วยวิธีการทางเคมีโดยแต่ละวิธี จะมีจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไปดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการทางฟิสิกส์ และวิธีการทางเคมี

ลักษณะ	วิธีการเตรียมฟิล์มบาง	
	วิธีการทางฟิสิกส์	วิธีการทางเคมี
1. คุณภาพของฟิล์ม	<ul style="list-style-type: none"> - ได้คุณภาพของฟิล์มที่ดี-ดีมาก - เนื้อฟิล์มยึดติดกับฐานรองรับได้ดี - มีสิ่งเจือปนน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - คุณภาพของฟิล์มพอใช้-ดี - ในบางกรณีเนื้อฟิล์มยึดติดกับฐานรองรับดีไม่ตีนก - มีสิ่งเจือปนมาก
2. อุปกรณ์การเตรียมฟิล์ม	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมือที่ใช้เตรียมฟิล์มมีระบบที่ซับซ้อนและมีราคาสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมือที่ใช้เตรียมฟิล์มเป็นระบบที่ง่ายและมีราคาถูก
3. การเตรียมฟิล์มบาง	<ul style="list-style-type: none"> - เตรียมในระบบสุญญากาศ - อุณหภูมิที่ให้กับฐานรองรับไม่สูงมากนัก 	<ul style="list-style-type: none"> - เตรียมได้ที่ความดันปกติ - ในบางกรณีต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยา
4. สารตั้งต้น	<ul style="list-style-type: none"> - สารตั้งต้นเป็นผลึกหรือผงที่นำมาอัดเม็ด 	<ul style="list-style-type: none"> - สารตั้งต้นเป็นสารละลายเคมีและต้องจุ่มฐานรองรับลงในสารละลายเคมี
5. ความหนา	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุมความหนาได้ขณะทำการเตรียมฟิล์ม 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถควบคุมความหนาขณะทำการเตรียมฟิล์มได้จึงต้องมีการทดลองก่อน
6. ฐานรองรับ	<ul style="list-style-type: none"> - ถูกจำกัดด้วยขนาดของห้องระเหยสาร(chamber) 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ฐานรองรับได้ขนาดใหญ่ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการทางฟิสิกส์นั้นมีความบริสุทธิ์สูงจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำฟิล์มบางที่ได้มาศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง เพื่อให้เข้าใจถึงธรรมชาติของฟิล์มบางชนิดนั้นมากยิ่งขึ้น แต่การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการทางฟิสิกส์นั้นอาจไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ในเชิงพาณิชย์เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ค่อนข้างซับซ้อนและมีต้นทุนสูงเกินไป ทำให้วิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการทางเคมีได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากมีต้นทุนค่อนข้างต่ำแต่คุณภาพของฟิล์มมิได้ลดลงไปตามราคา จึงมีแนวโน้มที่จะนำไปประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.6.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [24-27]

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation) นั้นเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} torr วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.6.1.1 อัตรการระเหยสาร (the physics and chemistry of evaporation) [24-27]

จากการทดลองของเฮิร์ต (Hertz) [24-27] พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 * 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุล} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.28)$$

เมื่อ	Φ_e	คือ	ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
	P_e	คือ	ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
	M	คือ	มวลโมเลกุลของอะตอมหรือโมเลกุล
	T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยเคลวินของสารที่ระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 * 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-2} \quad (2.29)$$

เมื่อ Γ_e คือ มวลของการระเหยสาร

ที่ความดัน 10^{-2} torr ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$ ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เนื่องจากมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.6.1.2 ความดันไอของธาตุ(vapor pressure of the elements) [24-27]

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.30)$$

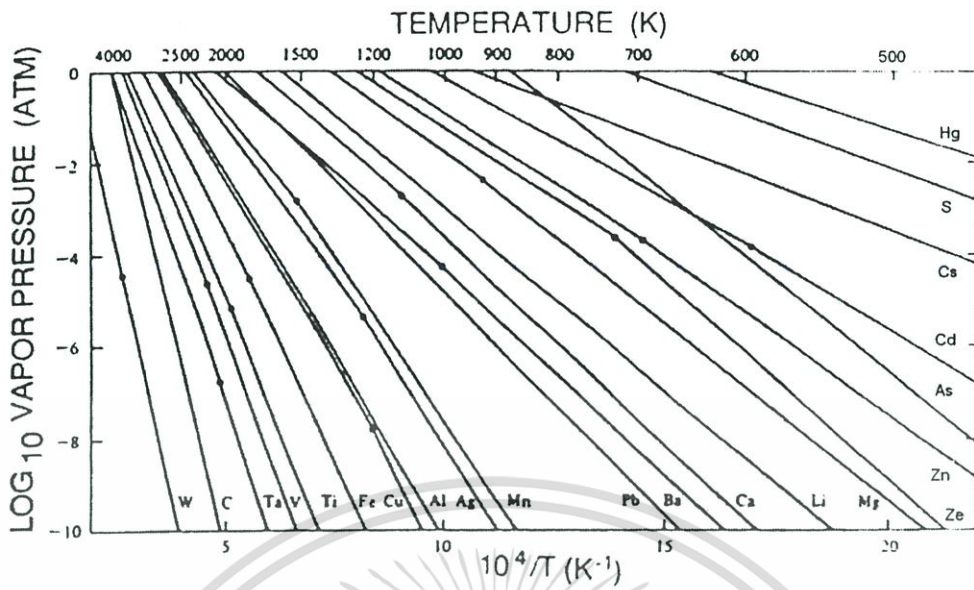
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อก๊าซนี้เป็นก๊าซในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.30) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.31)$$

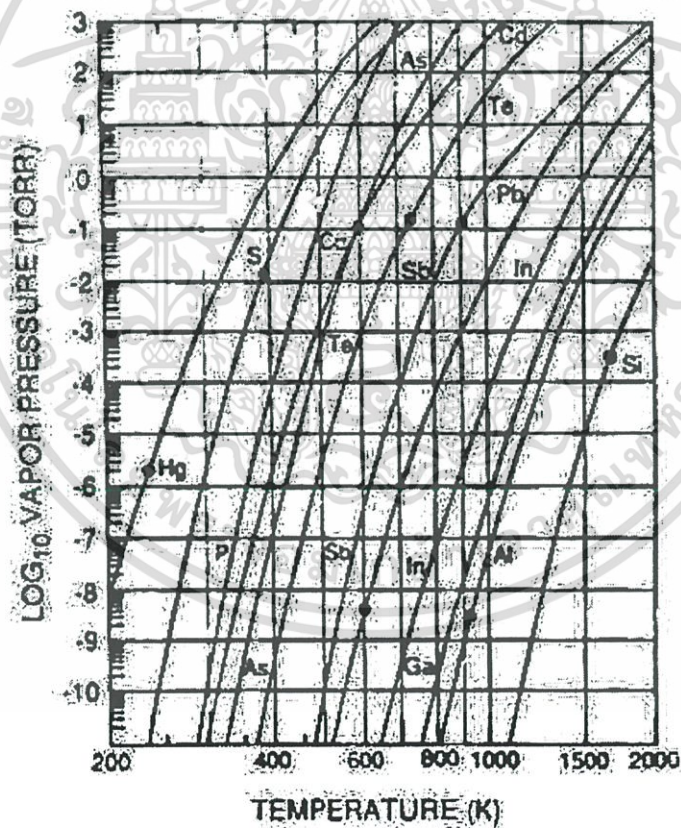
ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad (2.32)$$

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



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)[24-27]

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อระเหิดกลายเป็นไอแล้วส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5 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 2.5 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

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

M = โลหะ, X = อโลหะ

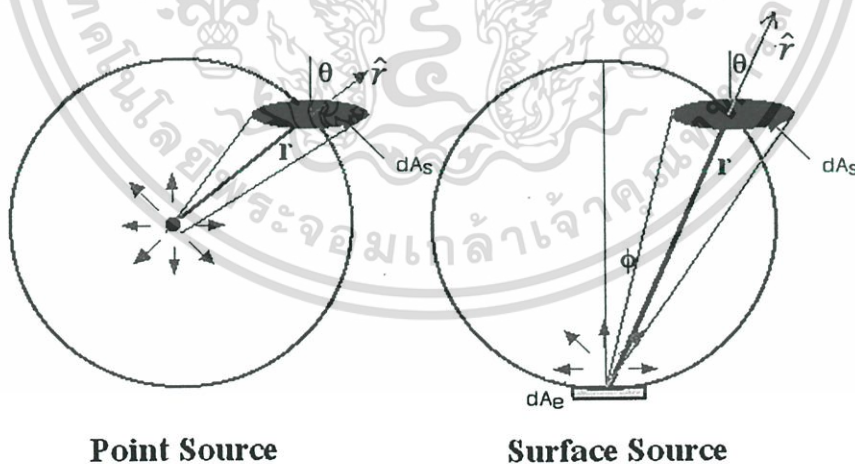
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์ม ด้วยวิธีการระเหยสาร(deposition geometry) [24-27]

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองที่จะตอมของสารจะมากดกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด(point source) มวลรวมการระเหยของสาร(total evaporation mass : \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว(surface source) มวลรวมการระเหยของสารหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.33)$$

เมื่อ Φ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
 N_A คือ เลขอาโวกาโด
 Γ_e คือ มวลของอัตราการระเหยสาร
 t คือ เวลาที่ใช้ในการระเหยสาร



รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A_e คือ พื้นที่ผิวของสารที่แผ่ระเหย ปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.23 dA_s คือ พื้นที่ผิวของฐานกรวย จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.34)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบลงบนพื้นที่น้อยยิ่ง dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

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

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

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

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

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.35)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

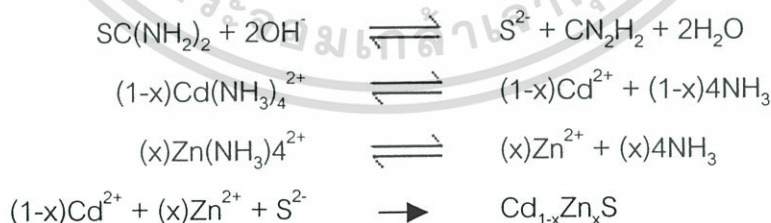
$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.36)$$

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

2.6.2 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี[8,10,28-36]

2.6.2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา[10,28-36]

การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีใช้สารตั้งต้นที่เป็นสารละลายเคมีประกอบด้วย ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) เกลือแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) เกลือซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ซึ่งจะให้ไอออนของซัลเฟอร์ (S^{2-}) ไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) และไอออนของซิงค์ (Zn^{2+}) ตามลำดับ ในการเตรียมฟิล์มค่า pH ของสารละลายในอ่างมีค่าประมาณ 10.6 – 11.8 ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางจะเกิด Cd^{2+} , Zn^{2+} อย่างช้า ๆ โดย Zn^{2+} จะเข้าไปแทน Cd^{2+} ทำให้เกิดฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้



จากปฏิกิริยาดังกล่าวสรุปได้ว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์[8,10,28-36]

ในการตกผลึกของ CdS และ ZnS ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product ; K_{sp}) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant ; K_e) ทั้งของ CdS และ ZnS มีค่าแตกต่างกันดังนั้น อัตราเร็วในการตกผลึกของ ZnS จึงช้ากว่าของ CdS ดังนั้นในการตกผลึกจึงเกิดกลไกได้ 2 แบบด้วยกันดังนี้ คือ

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous precipitation) หรือกลไกการจับตัวกันแบบกลุ่มก้อนต่อกกลุ่มก้อน (cluster by cluster) ซึ่งจะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของแผ่นรองรับดังรูปที่ 2.24
2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ เรียกว่า การตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous precipitation) หรือ กลไกการจับตัวแบบไอออนต่อไอออน (ion by ion) โดยไอออนอิสระ Cd^{2+} หรือ Zn^{2+} จะไปจับกับ OH^- กลายเป็น $Cd(OH)_2$ หรือ $Zn(OH)_2$ แล้วก็จะเกิดการเปลี่ยนไอออนระหว่าง $Cd(OH)_2$ หรือ $Zn(OH)_2$ กับ $SC(NH_2)_2$ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง

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

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้น 3 ชนิดคือ ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ด้วยวิธีการออบสารละลายเคมี ฟิล์มบาง SnO_2 และ $CdTe$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ และการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการแวนเดอร์พาว์ และวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง[8] เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นชั้นต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด $CdTe$

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 การทำความสะอาดกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ

1. กระจกสไลด์ขนาด $12 \times 25 \text{ mm}^2$
2. เครื่องอัลตราโซนิก
3. เครื่องชั่ง
4. เต้าอบ
5. นาฬิกาจับเวลา
6. สารเคมี
 - น้ำยาอิกวินอค
 - น้ำปอดประจุ
 - TCE
 - อะซิโตน
 - เอทานอล
 - HF 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

1. อ่างน้ำปรับอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิได้
2. บีกเกอร์ขนาด 150 ml
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. แท่นเสียบฐานรองรับ (substrate holder)
5. ชุดกวนสารเคมี อัตราเร็วคงที่ 60 รอบต่อนาที
6. เต้าแอมป์
7. สารเคมี
 - เกล็ดแคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4)
 - เกล็ดซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4)
 - ไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$)
 - แอมโมเนีย (NH_3)
 - ไฮดราซีน ($\text{N}_2\text{H}_4\text{OH}$)

3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

1. เครื่องระเหยในระบบสุญญากาศ (evaporator)
2. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
3. เต้าแอมป์
4. สารเคมี
 - ดีบุกออกไซด์ (SnO)
 - แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F)
 - แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe)

3.1.4 การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

1. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อ ฟิลิปป์ PW1830 ใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5418 \AA ความต่างศักย์ 30 kV และกระแสไฟฟ้า 25 mA
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
3. ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น UV-JUSCO 7600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วย
 - อิเล็กโตรมิเตอร์ รุ่น Keithley 610 CR
 - มัลติมิเตอร์
 - กาวเงินนำไฟฟ้า
 - สายไฟ

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

3.2.1 การเตรียมกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับ[10]

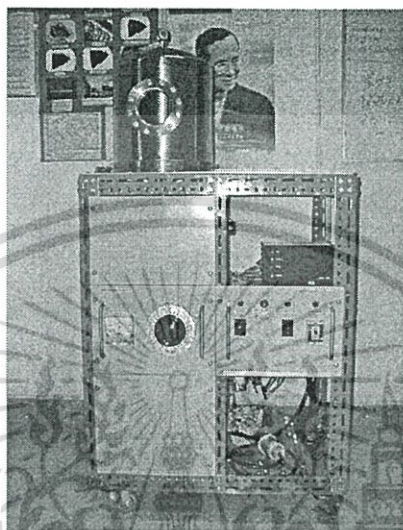
วิทยานิพนธ์นี้ได้เตรียมฐานรองรับขนาด $12 \times 25 \text{ mm}^2$ เพื่อใช้เป็นฐานรองรับสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง ในขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับนี้จะเป็นการทำทำความสะอาดและกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นฐานรองรับโดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยแช่ในน้ำยาอซิควินอค เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำปลอดประจุ
2. นำกระจกสไลด์ไปแช่ใน TCE เป็นเวลา 10 นาที
3. นำกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำกระจกสไลด์ไปแช่ในเอธานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. นำกระจกสไลด์ไปแช่ในน้ำปลอดประจุครั้งละ 10 นาที จำนวน 2 ครั้ง
6. กัดผิวหน้ากระจกด้วย HF ปริมาตร 10 cc. กับน้ำปลอดประจุ 100 cc. เป็นเวลา 10 นาที
7. ล้างกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุครั้งละ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง สำหรับขั้นตอนที่ 2-7 ใช้เครื่องอัลตราโซนิคเขย่าด้วยทุกครั้ง
8. อบกระจกสไลด์ที่ได้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที จะได้ฐานรองรับพร้อมนำมาใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 , CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$

ได้เตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีเตรียมฟิล์มบาง 2 วิธีคือ การระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และการอบสารละลายเคมี เพื่อความเหมาะสมในการประดิษฐ์เป็นชั้นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe



รูปที่ 3.1 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.2.2.1 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ

สารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 และ CdTe ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศใช้สารตั้งต้นที่เป็นผง SnO บริสุทธิ์ 99.999% และเจือด้วย NH_4F เพื่อให้ได้ ฟิล์มบาง SnO_2 ฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (5 at%) และ ฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (10 at%) ตามลำดับ สำหรับการเตรียมฟิล์มบาง CdTe นั้นใช้สารตั้งต้นเป็นผง CdTe บริสุทธิ์ 99.999% โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่ง SnO_2 หรือ CdTe บริสุทธิ์ให้ละเอียด นำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
2. นำสารตั้งต้นที่ชั่งแล้วมาบดผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำสารตั้งต้นที่เตรียมไว้ไปอัดเป็นเม็ด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ด้วยความดันประมาณ 3 mPa
4. นำเม็ดสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำเม็ดสารมาตัดให้ได้ขนาดพอดีกับภาชนะระเหยสาร จากนั้นนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการระเหยสารต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงน้ำหนักของสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบาง SnO₂ และ CdTe

Sample	SnO ₂ (g)	NH ₄ F (g)	CdTe (g)
SnO ₂	1.0000	-	-
SnO ₂ :F (5 at%)	1.8909	0.0273	-
SnO ₂ :F (10 at%)	1.8000	0.0549	-
CdTe	-	-	1.0000

หมายเหตุ : ถ้าทำการอัดเม็ดสารทิ้งไว้นาน ก่อนทำการระเหยควรจะทำกรอบเม็ดสารก่อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

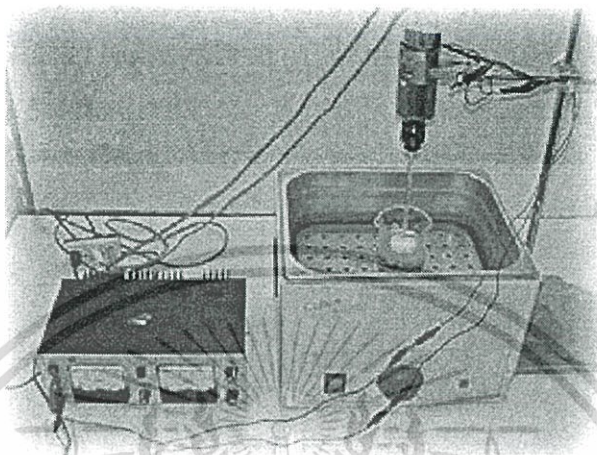
การเตรียมฟิล์มบาง SnO₂ และ CdTe

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่น สิ่งสกปรกต่างๆ และคราบไขมัน ด้วยอะซิโตน และเอทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำเม็ดยา SnO₂ หรือ CdTe บริสุทธิ์บรรจุลงในภาชนะระเหยสารที่เป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำกระจกใสที่เตรียมเอาไว้แล้ววางลงบนหน้าฉากที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. เปิดปั๊มกลโรตารีประมาณ 2 นาที จากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดัน 3×10^{-3} mbar เปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการ ในการทดลองนี้ใช้ ความดันช่วง 5×10^{-5} - 2×10^{-6} mbar
7. เริ่มทำการระเหยสารเพื่อเคลือบบนฐานรองรับที่กระจกใส โดยการเปิดสวิตช์ แอร์แอกแล้วเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 100-130 A แล้วแต่กรณี เมื่อมวลเม็ดยาตั้งต้นเริ่มลดลงแล้วเริ่มทำการเปิดฉากกัน (shutter)
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดฉากกัน และปิดแอร์แอก
9. ให้ระบบทำงานเป็นเวลาประมาณ 45 นาที แล้วปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วเปิดวาล์วสุบอากาศ และปั๊มกลโรตารี
10. เปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ
11. นำกระจกใสที่เคลือบแล้วออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 การเตรียมสารที่ใช้ในการอบสารละลายเคมี

การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ใช้สารตั้งต้นเป็นเกลือ $CdSO_4$ เกลือ $ZnSO_4$ เกลือ $SC(NH_2)_2$ แอมโมเนีย และไฮดราซีน



รูปที่ 3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ [8,10,28-36]

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็น เกลือ $CdSO_4$ เกลือ $ZnSO_4$ เกลือ $SC(NH_2)_2$ แอมโมเนีย และไฮดราซีน ตามที่คำนวณไว้ ดังตารางที่ 3.2
2. ละลายเกลือ $CdSO_4$ และเกลือ $ZnSO_4$ เข้าด้วยกันในน้ำปอดประจุ 10 ml ที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายเกลือ $SC(NH_2)_2$ ในน้ำปอดประจุ 10 ml เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง
4. นำกระจกไลต์ที่ยึดด้วยเทฟลอนที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอดประจุอยู่ประมาณ 100 ml ที่แช่อยู่ในอ่างปรับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$
5. เปิดสวิทช์มอเตอร์ให้หมุนแท่นยึดแผ่นรองรับตลอดเวลา ด้วยอัตราเร็วประมาณ 60 รอบ/นาที
6. เติสารละลายแอมโมเนีย ตามด้วย $CdSO_4 \cdot 8/3 H_2O$ และ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 10 ml จากนั้นเทไฮดราซีน และไทโอยูเรีย ที่เตรียมไว้ลงไป ในบีกเกอร์อย่างรวดเร็วตามลำดับ สุดท้ายเติมน้ำปอดประจุจนสารละลายในบีกเกอร์มีปริมาตรโดยประมาณเป็น 150 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x = 0.4$

Precursor (ml)	$CdSO_4$ (g)	$ZnSO_4$ (g)	$SC(NH_2)_2$ (g)	NH_3 (ml)	N_2H_3OH (ml)
150	0.2308	0.1725	0.5709	16.8400	27.3000
300	0.4616	0.34 50	1.1418	33.6800	54.6000

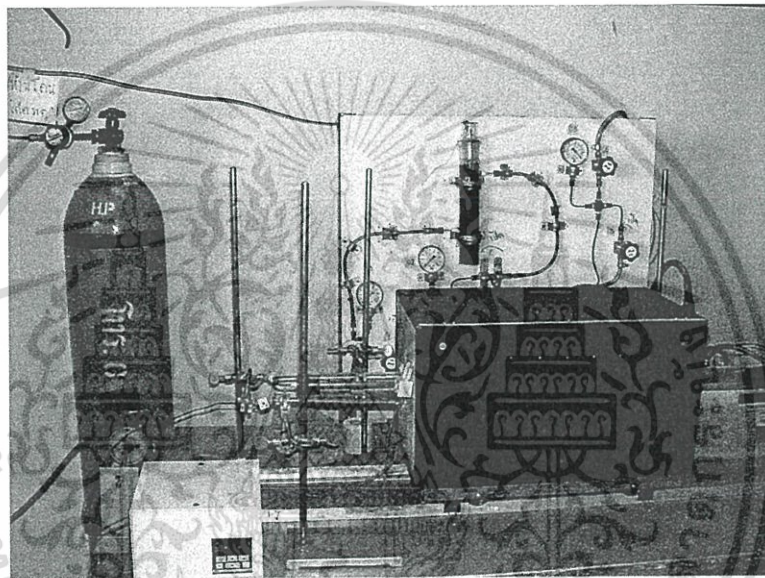
7. เมื่อสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี ให้วัดค่า pH ของสารละลายในบีกเกอร์ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 11.6 จากนั้นรอเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง โดยระหว่างรอให้คอยควบคุมอัตราการหมุนของแท่นยึดแผ่นสไลด์ และอุณหภูมิของอ่างน้ำให้คงที่อยู่เสมอ นอกจากนี้ต้องคอยเติมน้ำในอ่างปรับอุณหภูมิให้มีปริมาณเท่ากับสารละลายในบีกเกอร์อยู่เสมอ
9. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ให้นำแท่นจับแผ่นรองรับออกจากตู้ทดลองจะเห็นฟิล์มบางเคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ นอกจากนี้พบว่ามีการคอลลอยด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง และตกตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์
9. นำแผ่นรองรับที่เคลือบฟิล์มบางใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุอยู่ประมาณ 200 ml แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที แล้วเปลี่ยนน้ำในบีกเกอร์ทำการเขย่าอีก 2 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที เพื่อขจัดคอลลอยด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางออกจากฟิล์มบางให้หมด
10. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเคลือบอีก 5 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-9 ตามลำดับ หลังจากเคลือบครบ 6 ครั้งแล้ว นำฟิล์มบางมาเป่าให้แห้งด้วยความร้อนจากไดร์เป่าผม
11. เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 1-10 ให้ได้ประมาณ 120 ชิ้น เพื่อยืนยันผลการทดลอง
12. นำฟิล์มบาง ที่เตรียมได้มาทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400, 500 °C ตามลำดับภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีชั่งน้ำหนัก[27]

ความหนาที่แตกต่างกันของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการเตรียม หากใช้เวลามากขึ้นฟิล์มก็จะมีค่าความหนามากขึ้น ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมดังวิธีนี้ สามารถหาได้โดยประมาณจากมวลของสารที่เกาะบนฐานรองรับ ซึ่งหาได้จากผลต่างของน้ำหนักฐานรองก่อนและหลังขบวนการระเหยสาร โดยความหนาของฟิล์มจะประมาณได้จากสมการ

$$\text{ความหนา}(t) = \text{มวลสาร} / (\text{พื้นที่หน้าตัดของฐานรอง} \times \text{ความหนาแน่นของสาร}) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.3 แสดงระบบการแอนนูลฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำในภายใต้บรรยากาศต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

1. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ ฟิลิปป์ รุ่น PW1830 ใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5418 \AA ความต่างศักย์ 30 kV และกระแสไฟฟ้า 25 mA
2. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อจัสโก้ 7800 (UV/visible spectrometer JUSCO 7800) โดยใช้ความยาวคลื่น 300-1300 nm เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
3. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มบางด้วยวิธีแวนเดอร์พาว์ และวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง[8]



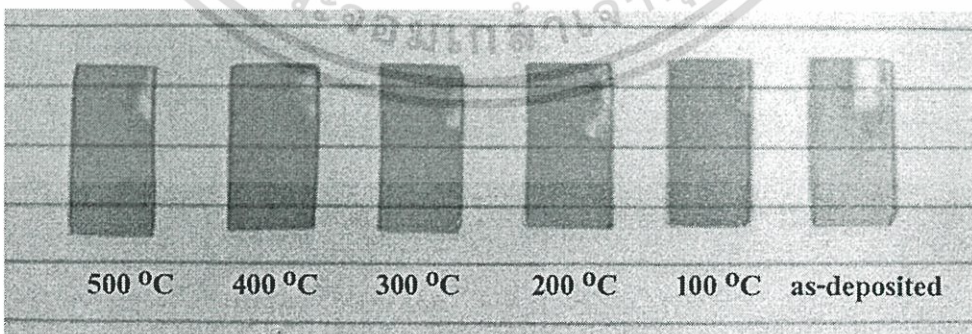
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ได้เตรียมขึ้นด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีและวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe เนื้อหาในบทที่ 4 แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เพื่อใช้สำหรับเป็นชั้นหน้าต่าง ฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at% เพื่อใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนและขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง และฟิล์มบาง CdTe เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสง

4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$

ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการอบสารละลายเคมี มีคุณภาพของฟิล์มดีเนื่องจากฟิล์มสามารถยึดติดฐานรองรับได้ดีและมีความเรียบสม่ำเสมอ ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมฟิล์มพบว่า เมื่อสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้นทั้งหมดรวมตัวกัน สารละลายที่ได้จะมีสีขาวขุ่น และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในเวลาต่อมา โดยสารละลายดังกล่าวมี pH ประมาณ 11.4 เท่าเดิมทุกครั้ง หลังจากเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงนำฐานรองรับที่ผ่านการเคลือบไปเขย่าด้วยเครื่อง อัลตราโซนิกเพื่อให้ตะกอนที่มีลักษณะคล้ายฝุ่นผงที่ติดบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางหลุดออกไป ตะกอนเหล่านี้ได้มีการศึกษาพบว่าเป็นตะกอนของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เกิดจากกระบวนการไฮโมจีเนียส และมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก[10]



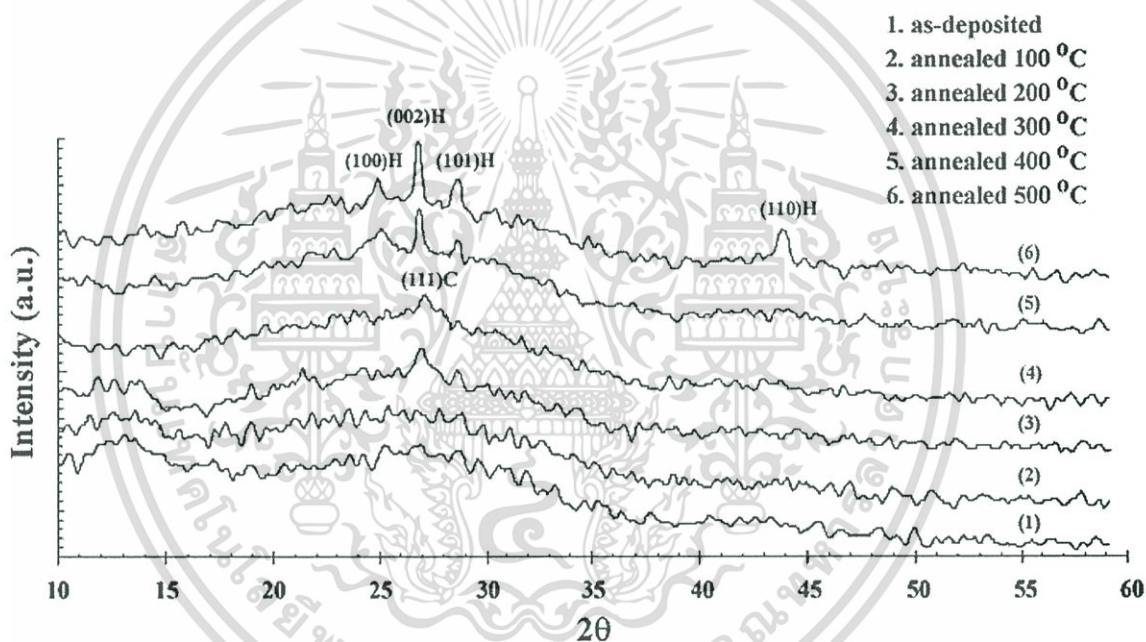
รูปที่ 4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X = 0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนیلและเมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่เตรียมได้ ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500°C ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิการแอนนัล ส่งผลให้ให้สีของฟิล์มบางเข้มขึ้น แต่มีความมันวาวลดลง ดังรูปที่ 4.1 สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว[10, 28-37]

4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$

การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที



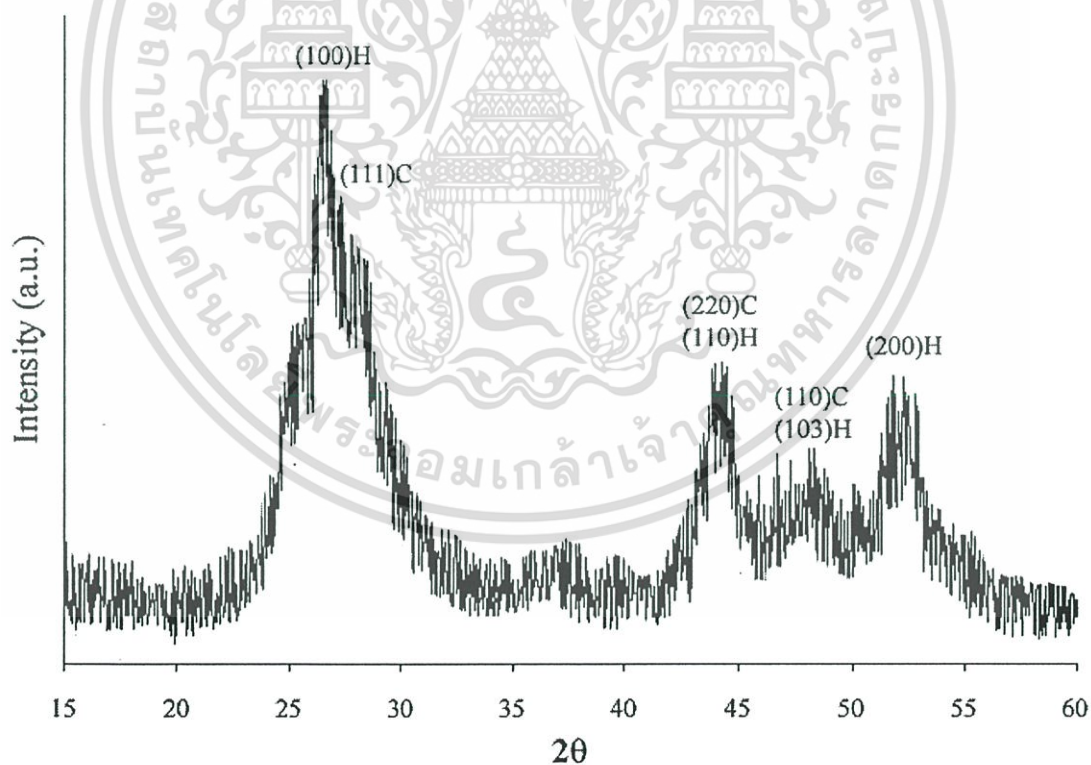
รูปที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลจะไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบน แสดงถึงความเป็นอะมอร์ฟัส(amorphous) แต่เมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลอยู่ในช่วง 100-300°C มีพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 27 องศา สามารถระบุได้ว่าเป็นการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (111)C และพีคจะมีความเข้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการแอนนัลสูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการที่ระนาบ (111)C มีแนวโน้มขนานกับผิวหน้า

ของฐานรองรับ[33] และเมื่ออุณหภูมิในการแอนนีย์ลอยู่ในช่วง 400-500°C พิคจะปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 25, 27 และ 29 องศา โดยระบุได้ว่าเป็นพิกของระนาบการเลี้ยวเบน (100)H, (002)H และ (101)H ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบพิกการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 45 องศา สามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิการแอนนีย์ลต่ำกว่า 400°C โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เป็นแบบคิวบิก แต่เมื่ออุณหภูมิในการแอนนีย์ลสูงกว่า 400°C อะตอมของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ จะมีการจัดเรียงตัวใหม่ส่งผลทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นแบบเฮกซะโกนอล

เมื่อนำคอลลอยด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เป็นตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์ที่ใช้เตรียมฟิล์มมาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบว่าพิกที่ได้เกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างพิกของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และแบบเฮกซะโกนอลจึงทำให้พิกที่ได้มีความคมชัดลดลง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถระบุได้ว่าคอลลอยด์ที่ได้หลังจากการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเป็นเฟสผสมระหว่างคิวบิกและเฮกซะโกนอล ดังรูปที่

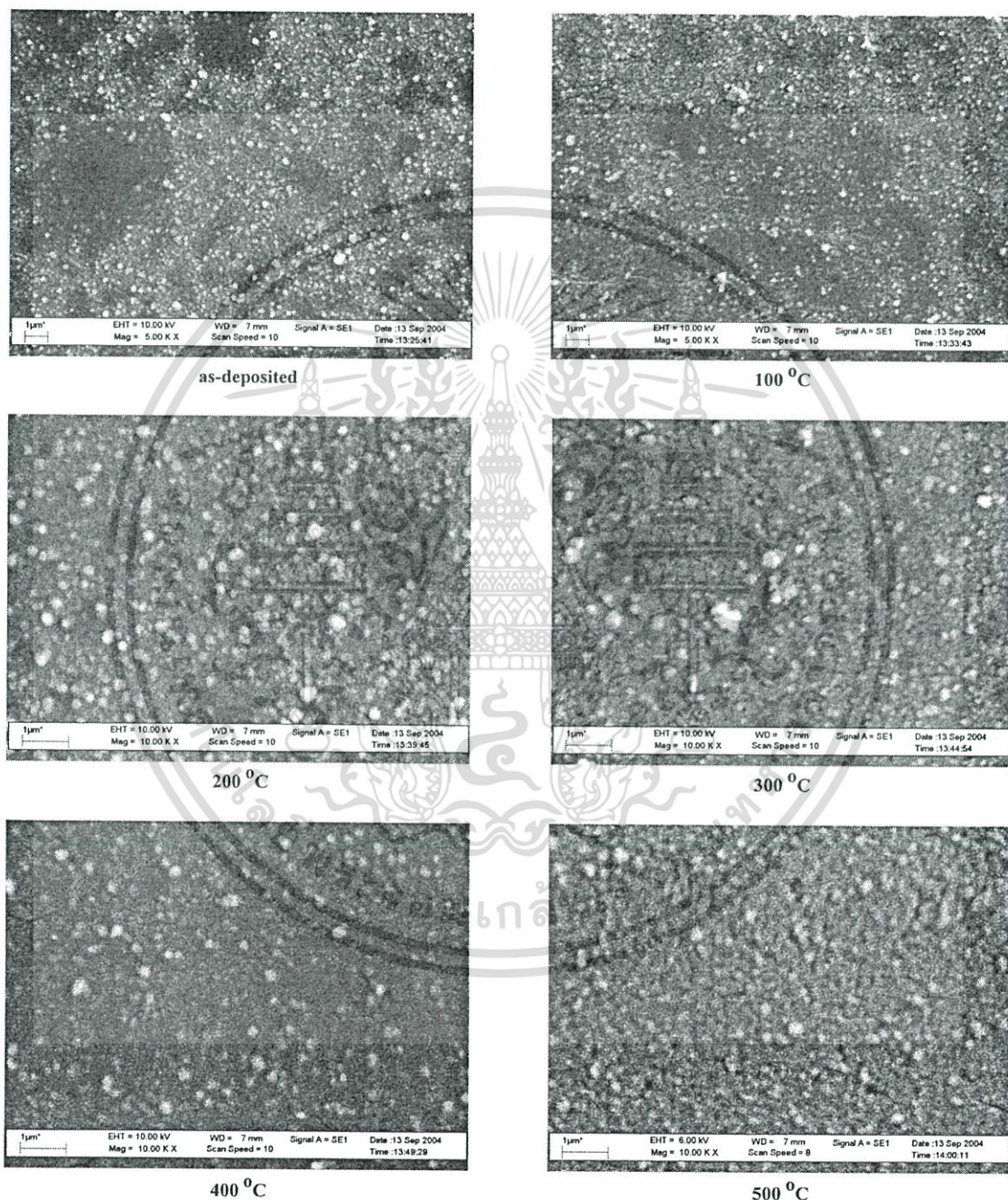
4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากคอลลอยด์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$

ได้ใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและที่มีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิการแอนนีสล่งผลให้ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นและการจัดเรียงตัวของเกรนมีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขนาดของเกรนที่ได้จากการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีความสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังตารางที่ 4.1

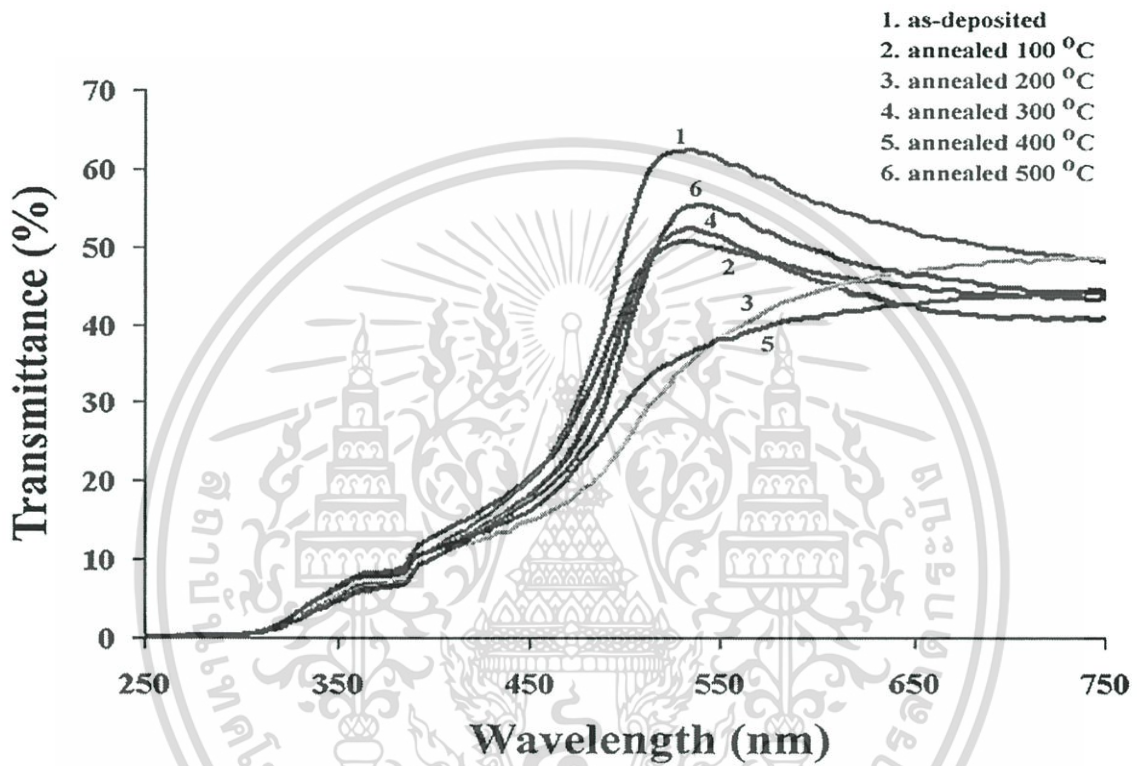
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

T_{anneal} ($^{\circ}\text{C}$)	Grain Size (nm)	
	XRD	SEM
As-deposited	120	100
100	180	150
200	200	200
300	230	250
400	250	300
500	260	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$

ได้ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที โดยวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ในช่วงความยาวคลื่น 250-750 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ รุ่น 7800

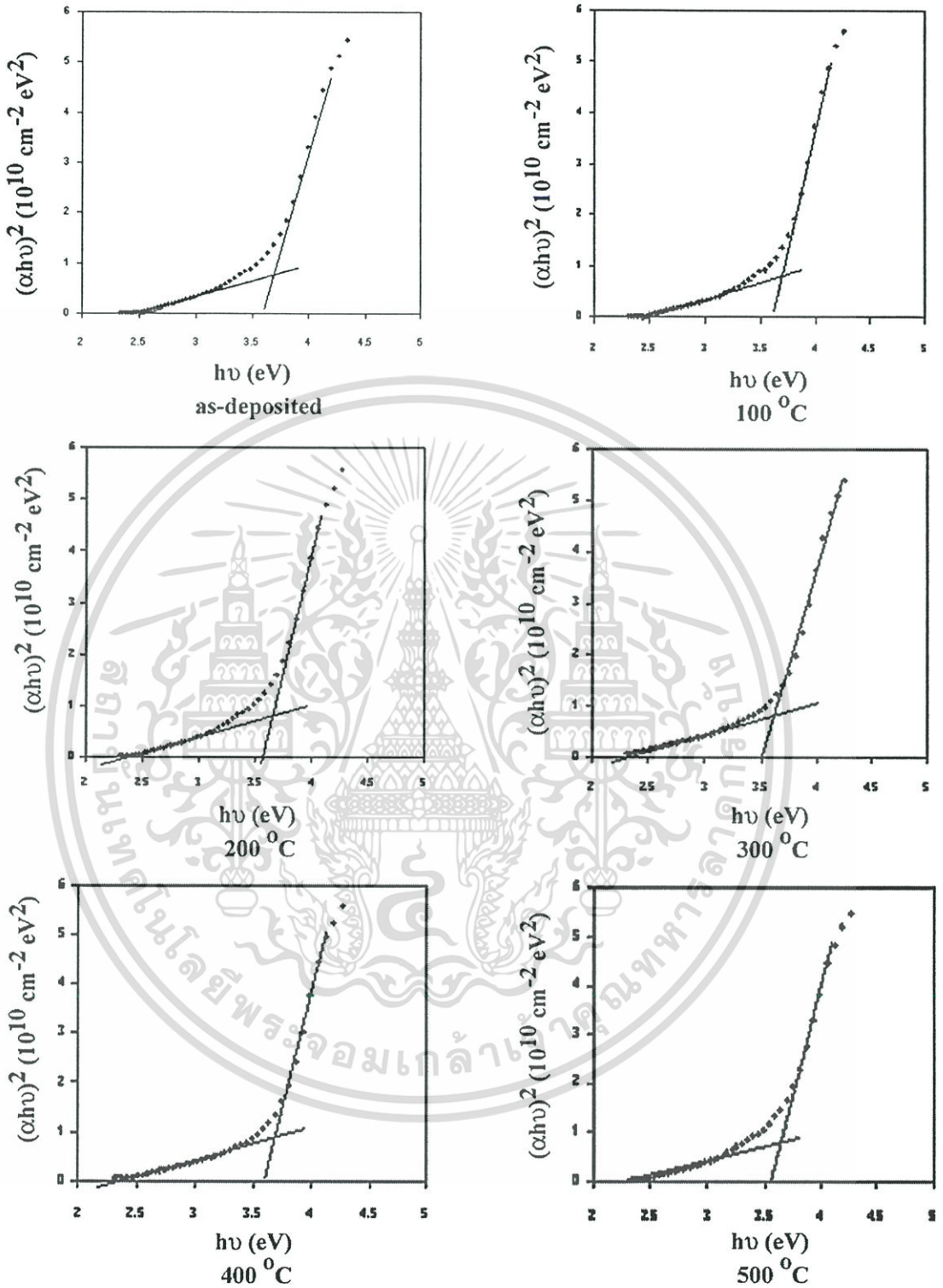


รูปที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.5 เมื่ออุณหภูมิการแอนนีสของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ อยู่ในช่วง 100-300°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน(absorption edge) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิการแอนนีสสูงกว่า 300°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ จะเลื่อนกลับมาทางความยาวคลื่นที่สั้นลง กราฟการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ จะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(α) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสอง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน(hv) เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ได้ โดยทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย(extrapolation) ของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง และระบุได้ว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเป็นแบบตรง(direct gap)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



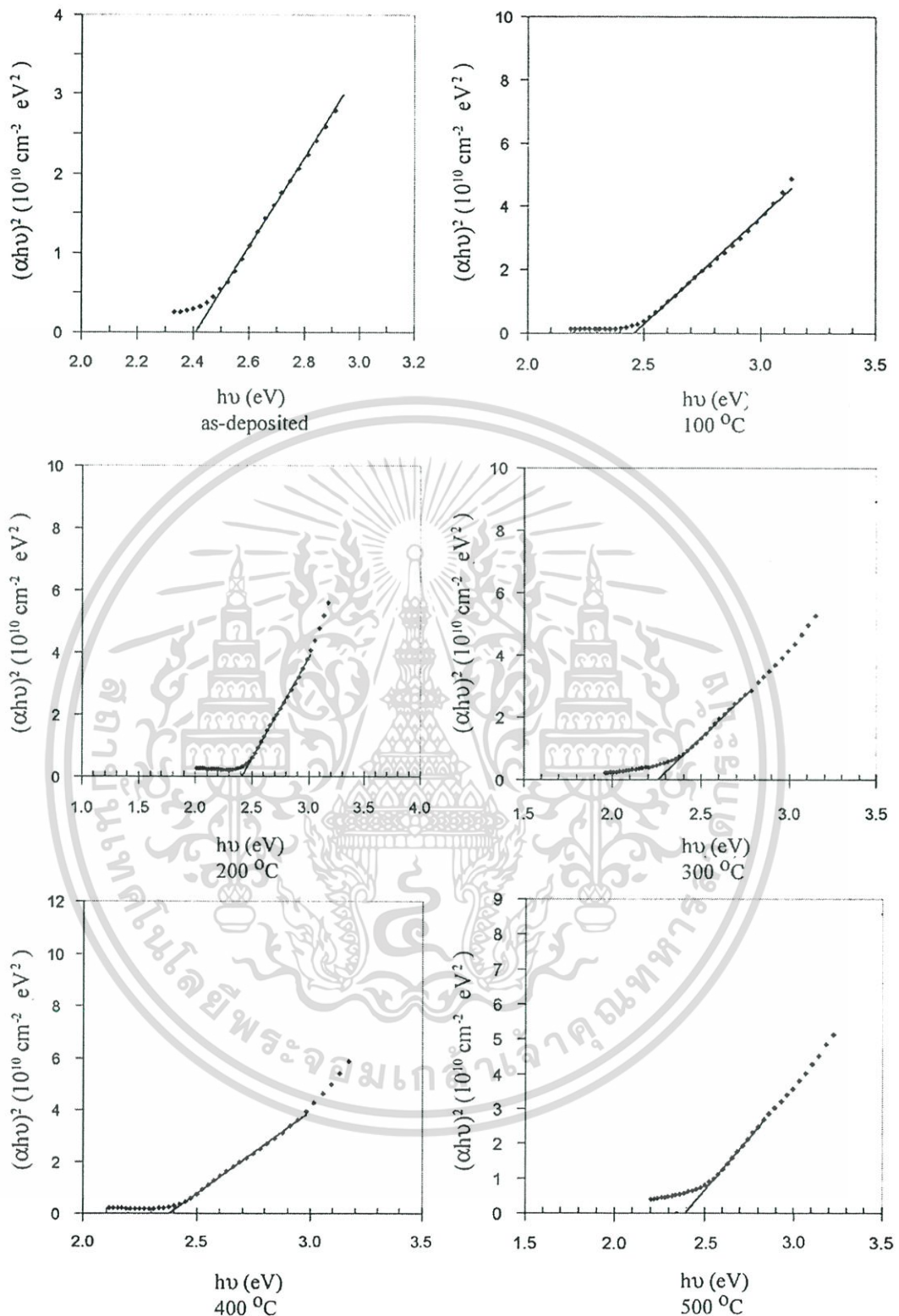
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอน เมื่อไม่มีการแอนนีล และเมื่อมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที จากรูปที่ 4.6 พบว่ากราฟมีส่วนที่เป็นเชิงเส้นอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน เมื่อลากเส้นตรงหาค่าคาดหมายจากส่วนที่เป็นเชิงเส้นนี้ไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ทำให้ทราบว่ามีความถี่ของแสงที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีสองค่า คือในช่วงประมาณ 2.2-2.4 eV และในช่วงประมาณ 3.6 eV ดังนั้นการแยกหาค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นสองส่วนคือ E_{g1} และ E_{g2} จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่หาได้มีค่าถูกต้องยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เสนอเผยแพร่มาแล้ว ระบุว่าการศึกษาที่สามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้สองค่าเนื่องจากฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x=0.4$ ที่เตรียมได้มีเฟสของ CdS ปนกับเฟสของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ [29,37] สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g1} มีค่าใกล้เคียงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdS ชนิดผลึกเดี่ยว และค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g2} มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างคงที่โดยน่าจะเป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $Cd_{1-x}Zn_xS$

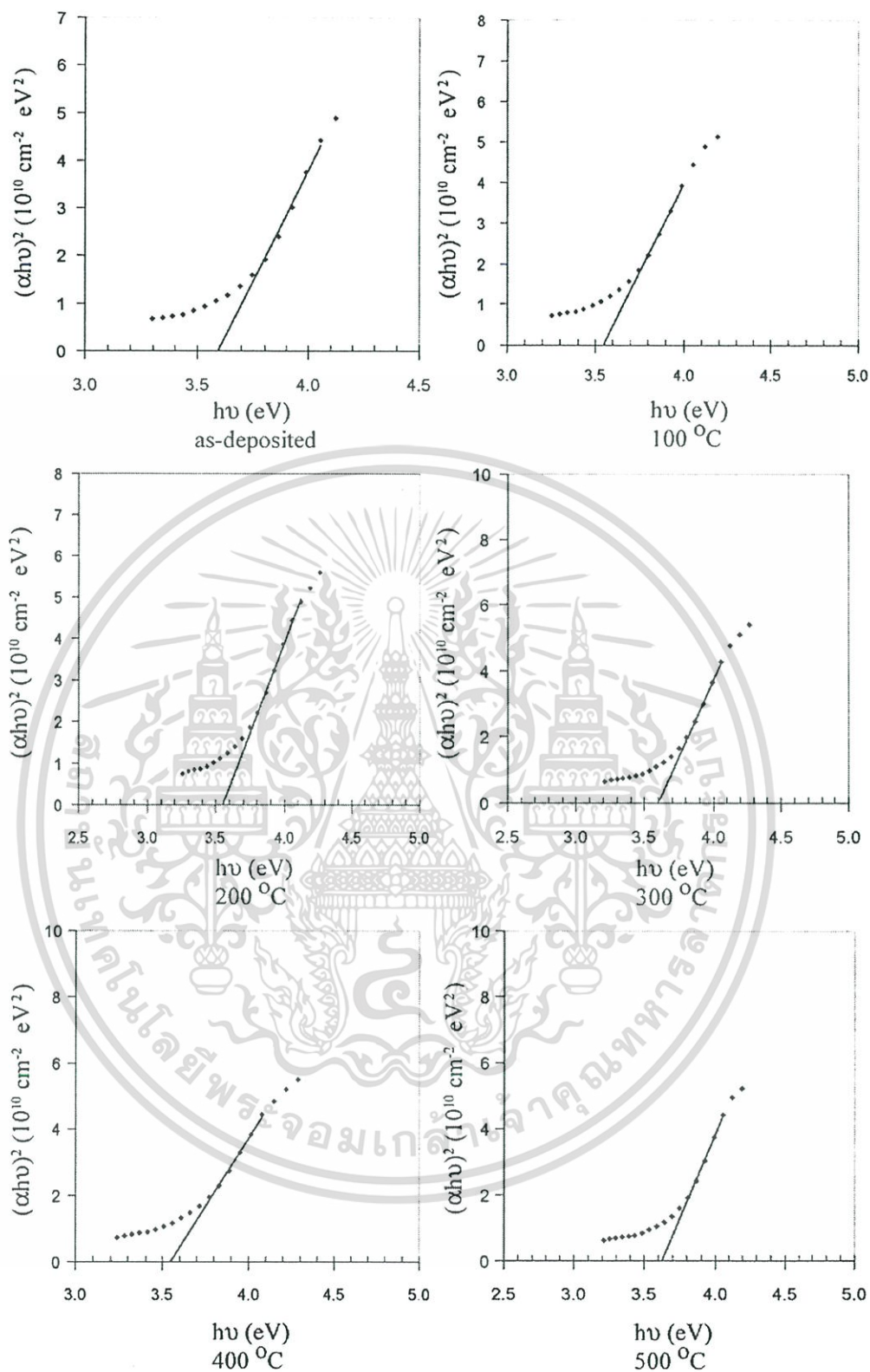


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100-500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

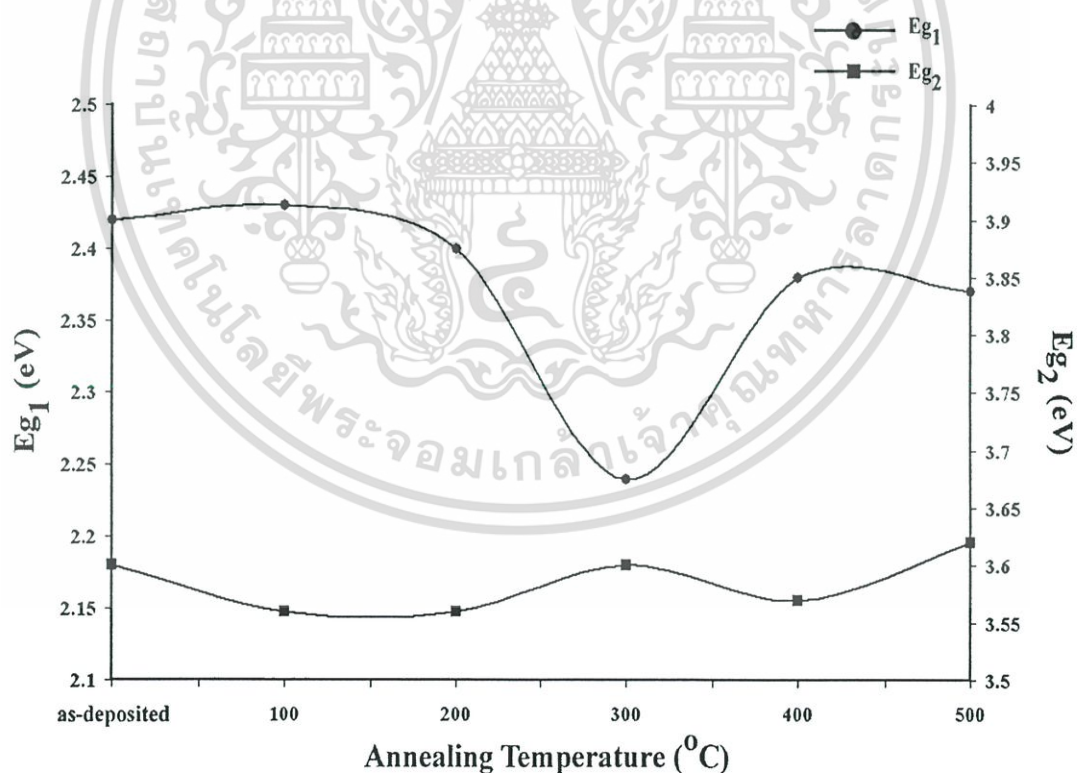


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g2} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานและลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

T_{anneal} (°C)	Energy Gap (eV)	
	E_{g1}	E_{g2}
As-deposited	2.42	3.60
100	2.43	3.56
200	2.40	3.56
300	2.24	3.60
400	2.39	3.55
500	2.40	3.64



รูปที่ 4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g1} และ E_{g2} ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอุณหภูมิการแอนนัลต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g ที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในหัวข้อ 4.1.1 โดยเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100-200°C ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าประมาณ 2.4 eV สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และเมื่ออุณหภูมิแอนนีกัล 300°C ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้มีค่า 2.24 eV โดยน่าจะเป็นผลมาจากโครงสร้างผลึกจะเริ่มเปลี่ยนจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล เนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลมีค่าประมาณ 2.24 eV จากนั้นเมื่ออุณหภูมิการแอนนีกัลอยู่ในช่วง 400-500°C ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้น



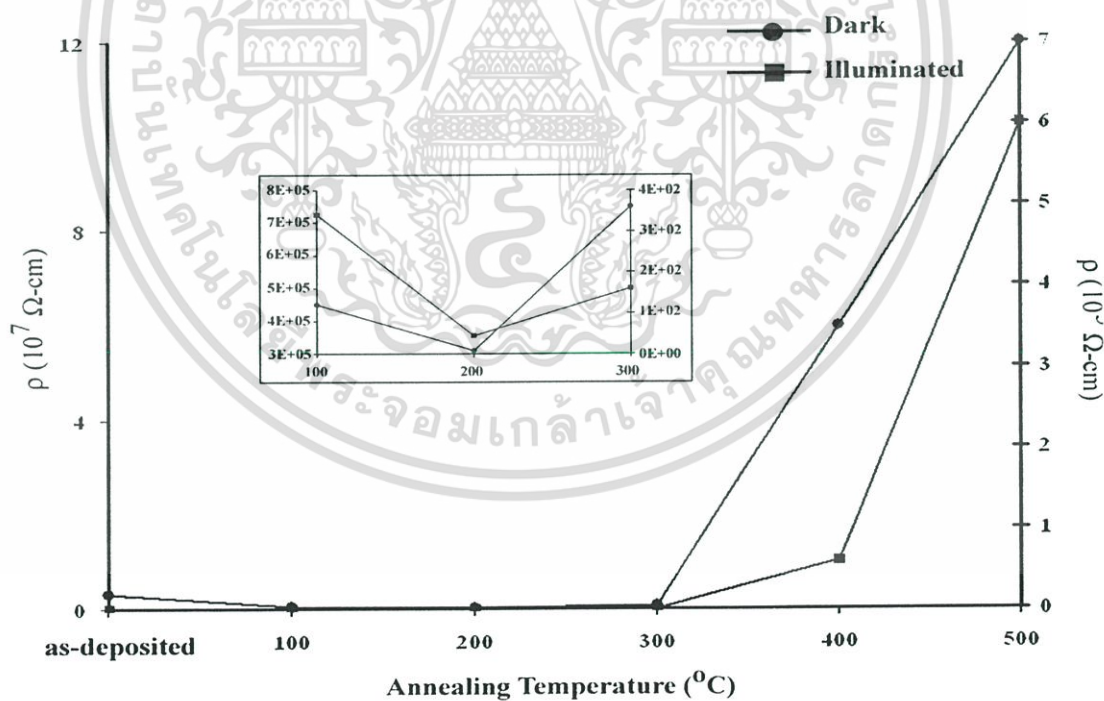
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$

ได้ทำการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ด้วยวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง[8] ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยหลอด ELH ที่ความเข้มแสง 100 mW/cm^2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ อยู่ในช่วง $100-200^{\circ}C$ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะลดลงตามอุณหภูมิการแอนนีสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้จำนวนขอบของเกรนลดลง ทำให้กระแสไหลผ่านได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 และเมื่ออุณหภูมิในการแอนนีสอยู่ในช่วง $300-500^{\circ}C$ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแอนนีส เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะตอมในฟิล์มบางเป็นระเบียบมากขึ้น ปริมาณของอะตอม Cd และ S ใกล้เคียงความเป็นสัดส่วนทางเคมี แสดงให้เห็นถึงสมบัติความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคข้างต้น เมื่อฉายแสงจากหลอด ELH ที่ความเข้มแสง 100 mW/cm^2 อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำ ส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางลดลง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีไม่มีการฉายแสง และมีการฉายแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

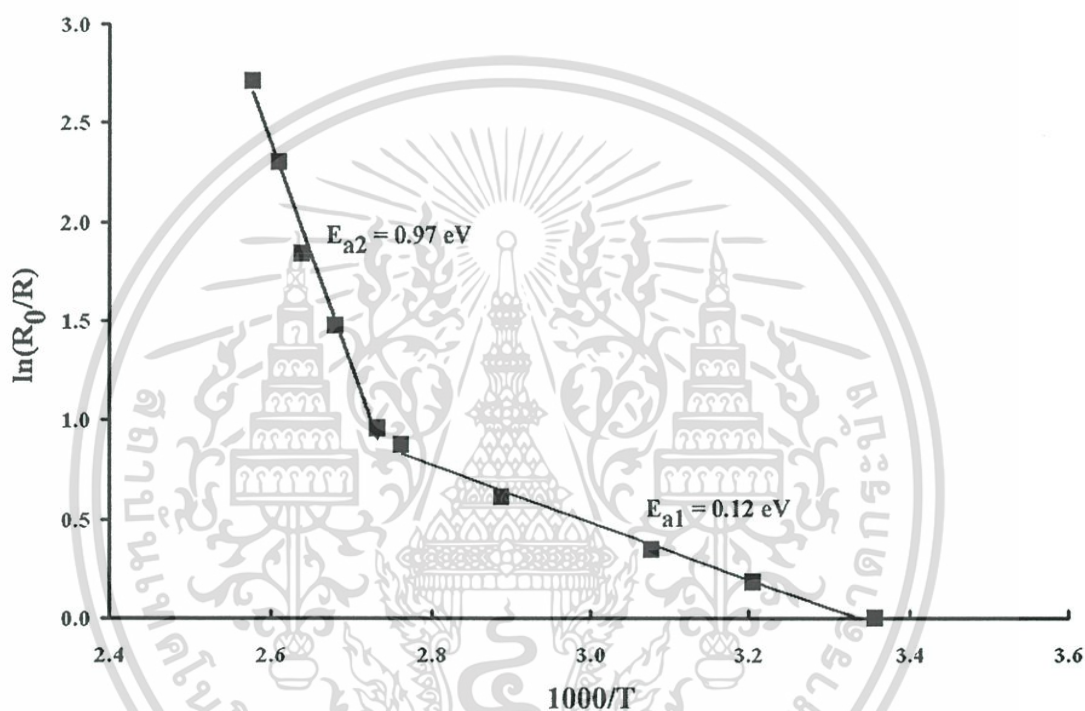
T_{anneal} (°C)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	
	Dark	Illuminated
As-deposited	3.0×10^6	6.0×10^2
100	4.5×10^5	3.4×10^2
200	3.1×10^5	4.4×10^1
300	7.5×10^5	1.6×10^2
400	6.0×10^7	6.0×10^4
500	1.2×10^8	6.0×10^5



รูปที่ 4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ในกรณีที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ยังสามารถนำมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางได้ ในการทดลองนี้ ใช้ช่วงอุณหภูมิ 30-150°C ในการวัดค่าพลังงานกระตุ้น โดยเพิ่มความร้อนขึ้น 10°C ทุกๆ 5 นาที เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ จากนั้นนำค่าความชันของกราฟที่ได้ไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น โดยนำค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์คูณกับค่าความชันของกราฟ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x=0.4$ เป็นไปดังรูปที่ 4.11

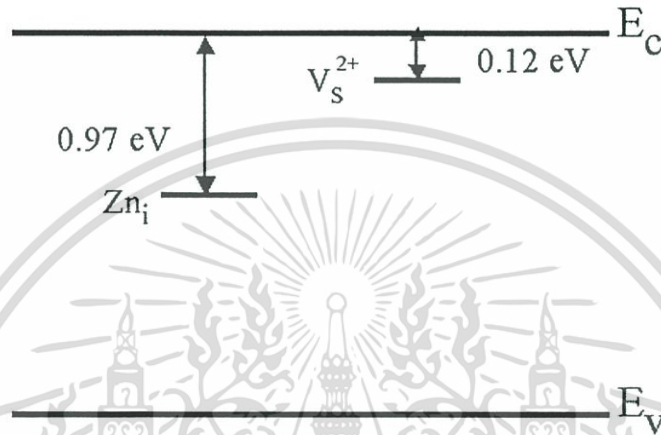


รูปที่ 4.11 แสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x=0.4$

จากรูปที่ 4.11 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $x=0.4$ มีค่าพลังงานกระตุ้นสองค่า โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ค่าพลังงานกระตุ้นที่วัดได้ทำให้ทราบว่ามีการมีระดับพลังงานผู้ให้ที่บริเวณระดับพลังงานตื้น (shallow level) โดยแสดงพฤติกรรมเป็นระดับพลังงานผู้ให้ระดับพลังงานนี้เกิดจากการหลุดหายไปของอะตอมซัลเฟอร์ ทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้ว ที่อธิบายว่าเป็นระดับพลังงานที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซีของซัลเฟอร์ (V_S^{2+}) [38,39] และที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ค่าพลังงานกระตุ้นที่วัดได้แสดงให้เห็นว่ามีระดับพลังงานย่อยเกิดขึ้นบริเวณระดับพลังงานลึก (deep level) และน่าจะเป็นผลมาจากเฟสของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีอะตอมของแคดเมียมหรือสังกะสีไปแทรกบริเวณที่ว่างในโครงผลึก จนเกิดเป็นข้อบกพร่องผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้เอาไปใช้ประโยชน์ใดๆ ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

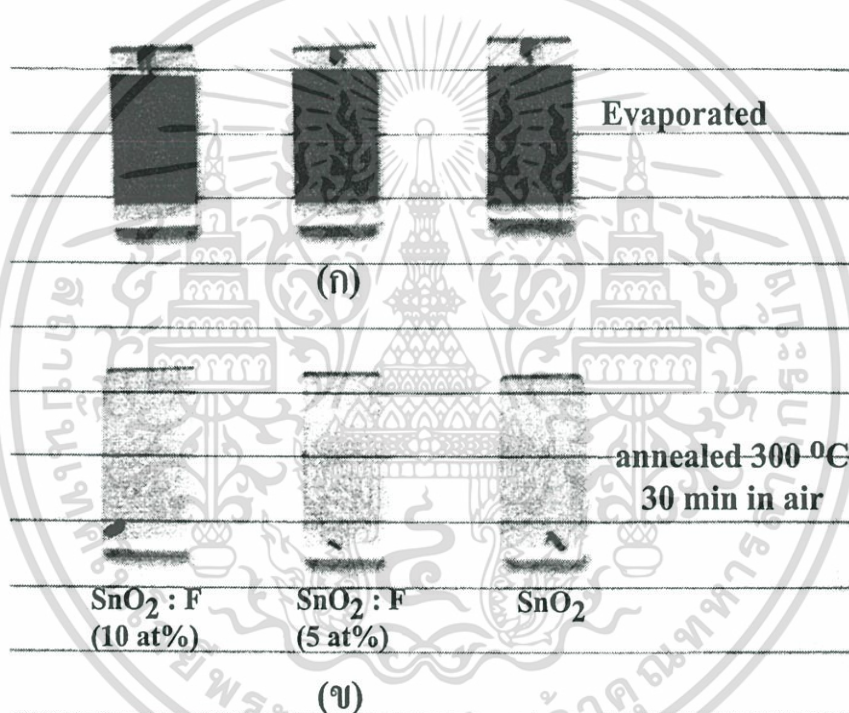
แบบอินเทอร์สตีเชียลของแคดเมียม หรือของสังกะสี (Cd , หรือ Zn_i) และจากผลการศึกษาที่ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้วระบุว่า เมื่อปริมาณการเจือสังกะสีในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าสูงขึ้น[8] ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า $100^\circ C$ จึงน่าจะเกิดจากอิทธิพลของข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สตีเชียลของสังกะสี มากกว่าที่จะเกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สตีเชียลของแคดเมียม โดยสามารถแสดงแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงแบบจำลองระดับพลังงานย่อยของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$

4.2 พิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

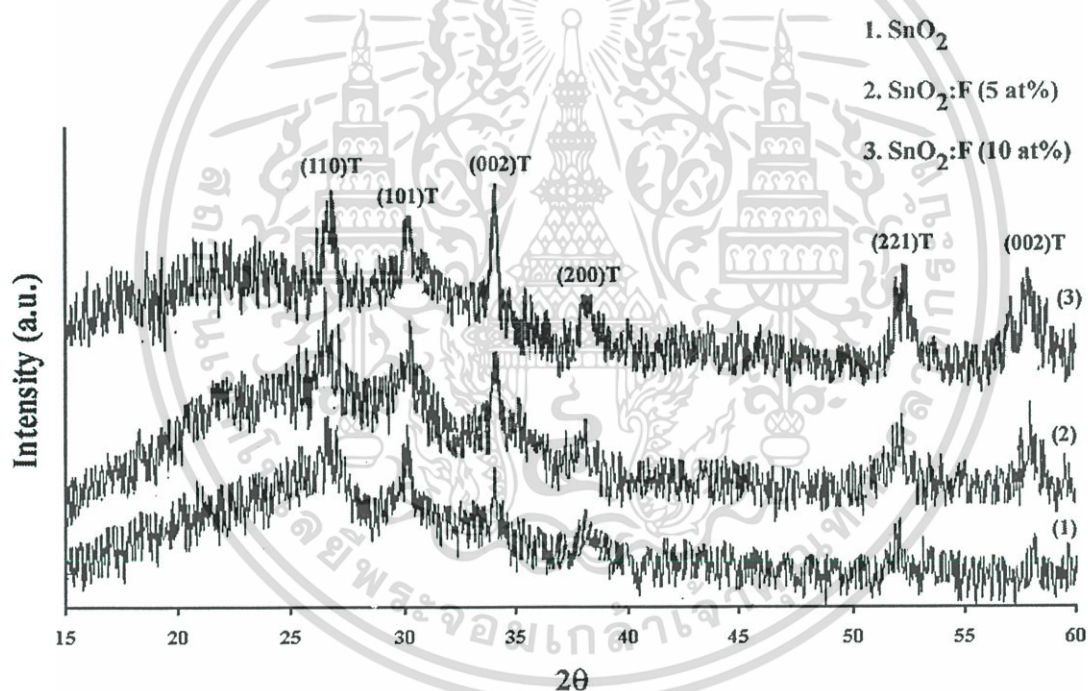
ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $\text{F}=10, 5$ และ $0 \text{ at}\%$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยระเหยสารตั้งต้นเป็น SnO ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ ไปเคลือบบนฐานรองรับที่เป็นกระจก ที่ความดัน $4.5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ จะได้ฟิล์มบาง SnO สีดำ ดังรูปที่ 4.13 (ก) จากนั้นนำฟิล์มบาง SnO สีดำไปแอนนัลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มบางจะมีสีขาวขุ่นไปจนถึงใสโปร่งแสง ดังรูปที่ 4.13 (ข) พบว่าเนื้อฟิล์มยึดติดกับฐานรองรับได้ดี และมีความเรียบสม่ำเสมอ แม้ไม่ได้ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับในขั้นตอนการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $\text{F}=10, 5$ และ $0 \text{ at}\%$

4.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

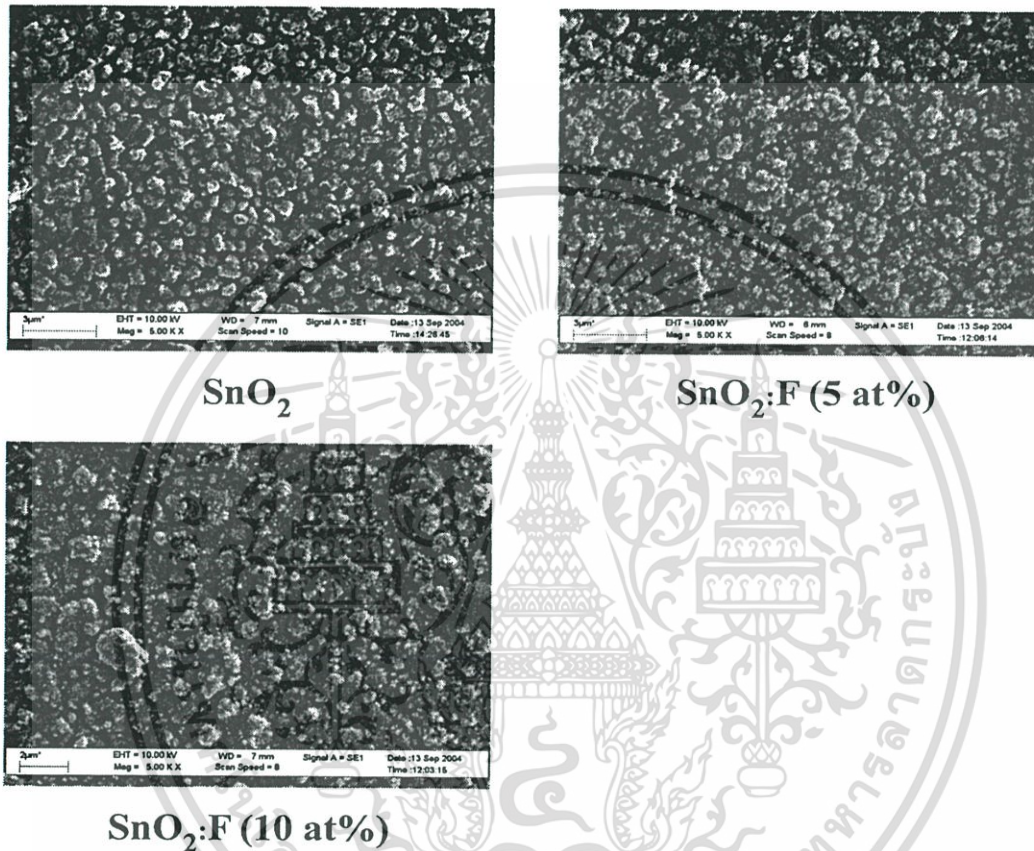
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $\text{F}=0, 5$ และ $10\text{at}\%$ โดยใช้วิธีการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าการเจือฟลูออไรด์ลงไปใน SnO_2 ส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึก โดยพบพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 27, 30, 34, 38, 52 และ 58 องศา ในฟิล์มบางตัวอย่างทุกกรณี และสามารถระบุได้ว่าเป็นพีคของระนาบการเลี้ยวเบน (110)T, (101)T, (002)T, (200)T, (221)T และ (002)T ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 แต่จากผลการศึกษาที่ได้จากการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้ว[40, 41] พบว่าพีคที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ที่ 30 องศา เป็นระนาบการเลี้ยวเบนที่ (101)T ของ SnO จึงสามารถอธิบายได้ว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $\text{F}=0, 5$ และ $10\text{at}\%$ ที่เตรียมได้น่าจะมีเฟสผสมระหว่าง SnO_2 กับ SnO



รูปที่ 4.14 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $\text{F}=0, 5$ และ $10\text{at}\%$

4.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10at% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10at% เป็นไปดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10at%

จากรูปที่ 4.15 พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10 at% ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีลักษณะของเกรนที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบและมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ เมื่อทำการเจือด้วยฟลูออรีนลงไปจะทำให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น ส่งผลให้จำนวนขอบของเกรนลดลง และมีฟลูออรีนแทรกอยู่ในโครงผลึก และบริเวณขอบของเกรน นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเกรนที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคให้ผลในการทำงานเดียวกันกับการคำนวณหาขนาดของเกรนจากค่า FWHM ที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

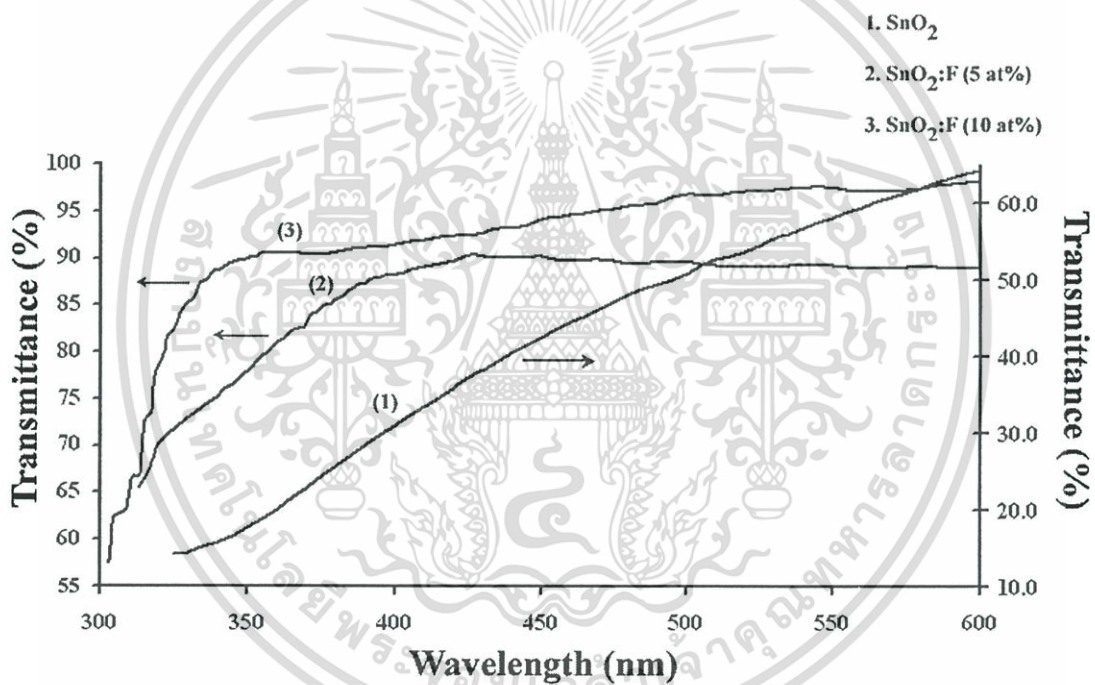
Sample	Grain Size (μm)	
	XRD	SEM
SnO_2	1.8	1.5
$\text{SnO}_2:\text{F}$ (5at%)	2.9	3.0
$\text{SnO}_2:\text{F}$ (10at%)	2.3	2.5



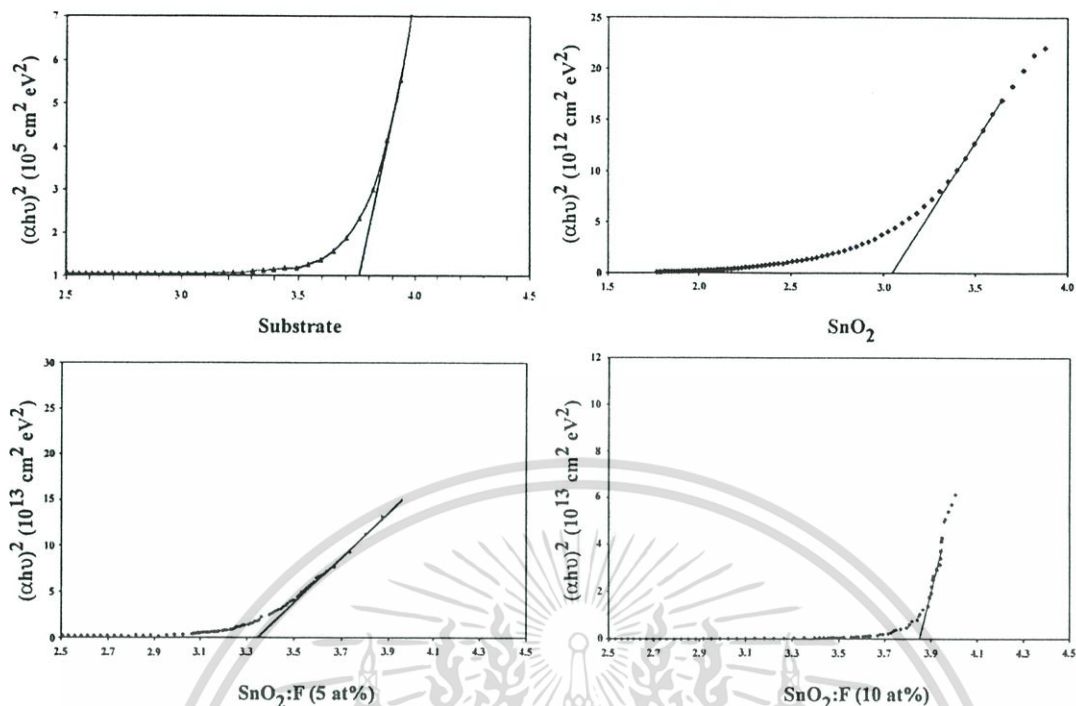
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

ได้ทำการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10 at% เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิด ดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้รุ่น 7800 ในช่วงความยาวคลื่น 300-600 nm พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10 at% ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศส่งผ่านแสงได้ไม่ดึ้นัก แต่เมื่อทำการเจือด้วย F ฟิล์มบางสามารถส่งผ่านแสงได้มากกว่า 90% ดังรูปที่ 4.16 จากนั้นทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอน พบว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10 at% เป็นแบบตรง ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี F=0, 5 และ 10 at%



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฐานรองรับ และฟิล์มบาง SnO₂:F ที่มี F=0, 5 และ 10 at%

จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าช่องแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnO₂ มีค่า 3.04 eV และค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นเป็น 3.35 และ 3.85 eV เมื่อมีการเจือฟลูออไรด์ 5 และ 10 at% ตามลำดับ จากการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฐานรองรับสามารถยืนยันได้ว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้เป็นเป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานที่แท้จริงของฟิล์มบาง SnO₂ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnO₂:F ที่มี F=0, 5 และ 10 at%

Sample	Energy Gap (eV)
Substrate	3.75
SnO ₂	3.04
SnO ₂ :F (5at%)	3.35
SnO ₂ :F (10at%)	3.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

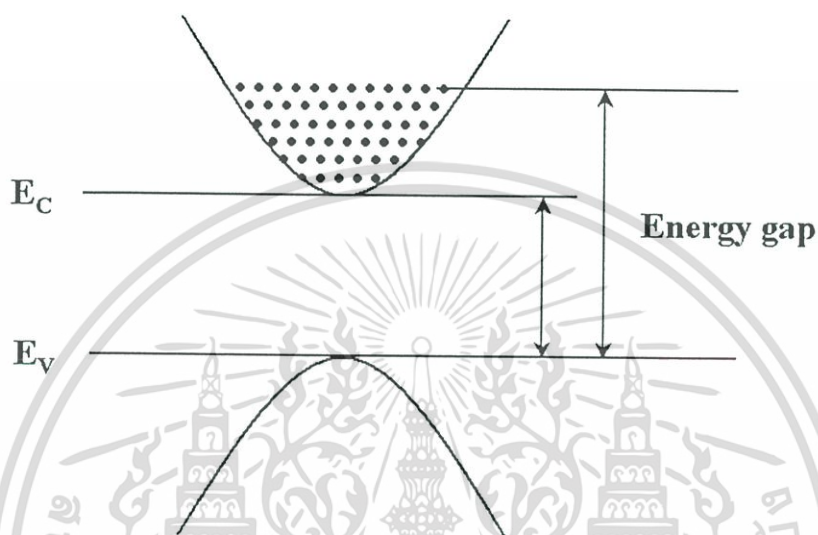
ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at\% ด้วยวิธีการแวนเดอร์พาว์ พบว่าฟิล์มบาง SnO_2 ที่ยังไม่ได้เจือฟลูออไรด์ มีสภาพต้านทานไฟฟ้า $9.46 \Omega\text{-cm}$ เมื่อทำการเจือฟลูออไรด์ พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (5 at\%) มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ $1.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ แต่เมื่อมีการเจือฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 at\% สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $2.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ สำหรับการเจือฟลูออไรด์ 5 at\% จำนวนขอบของเกรนจะลดลงเนื่องจากขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น ส่งผลให้การกระเจิงของพาหะอิสระมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือฟลูออไรด์ พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (10 at\%) จะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอะตอมในฟิล์มบางเริ่มไม่เป็นระเบียบ สอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 การที่อะตอมจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบนี้เองเป็นสาเหตุให้เกิดการกระเจิงพาหะอิสระมาก จึงทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้ว[42-45]

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at\%

Sample	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)
SnO_2	9.5×10^1
$\text{SnO}_2:\text{F}$ (5 at\%)	1.3×10^{-3}
$\text{SnO}_2:\text{F}$ (10 at\%)	2.3×10^{-3}

เมื่อพิจารณาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at\% กับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอน พบว่าไม่สามารถใช้ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานพื้นฐานในการแยกชนิดของสารว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำ หรือตัวนำได้ เนื่องจากฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเกินกว่า 3 eV แต่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำจึงต้องอธิบายโดยใช้ทฤษฎีแบบจำลองของเบิร์นสไตน์-มอส (Burstein-Moss model)[11, 46] คือในกรณีที่มีการเจือฟลูออไรด์มากๆ (very high dopant) ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางค่าพลังงานสูงขึ้น ในกรณีฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at\% มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมาก และเมื่อมีการเจือฟลูออไรด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ๆ พหุข้างมากเหล่านี้จะเข้าไปครอบครองสถานะพลังงานในแถบนำตามฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac Distribution Function) [11, 46-47] ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำจะต้องมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จึงเสมือนกับว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (5 at%) และ $\text{SnO}_2:\text{F}$ (10 at%) มีค่าเพิ่มขึ้น

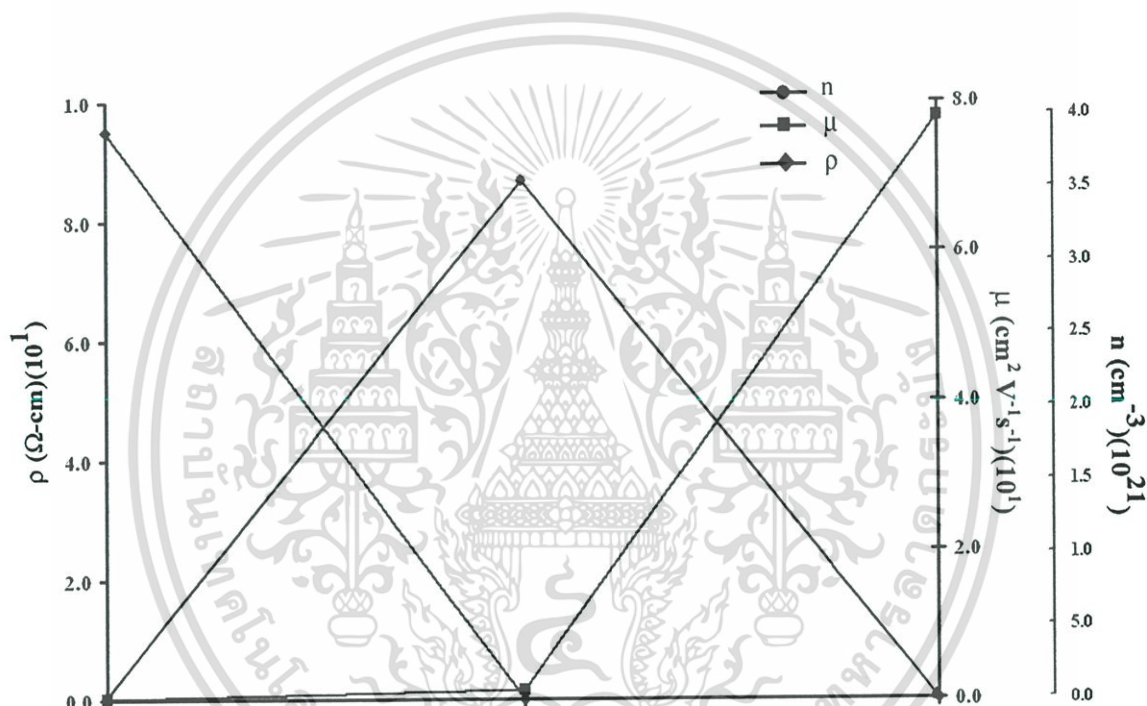


รูปที่ 4.18 แสดงแบบจำลองการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากขอบล่างสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

ฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่มี $F=0, 5$ และ 10 at% ที่ได้ทำการต่อขั้วแบบแวนเดอพาเวร์ไว้แล้ว ยังนำไปทำการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะอิสระและสภาพคล่องตัวของพาหะ พบว่าฟิล์มบาง SnO_2 ที่เตรียมได้มีความหนาแน่นของพาหะ $3.13 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และมีสภาพคล่องตัวของพาหะ $2.11 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ เมื่อทำการเจือ F พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (10 at%) ค่าความหนาแน่นพาหะจะลดลง ทำให้สภาพคล่องตัวมีค่ามากขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้ว [42-45]

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะและสภาพคล่องตัวของพาหะของฟิล์มบาง SnO₂:F ที่มี F=0, 5 และ 10 at%

Sample	Donor Concentration (cm ⁻³)	Mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)
SnO ₂	3.13x10 ¹⁹	2.11x10 ⁻¹
SnO ₂ :F (5at%)	3.61x10 ²¹	1.32x10 ⁰
SnO ₂ :F (10at%)	3.47x10 ¹⁹	7.79x10 ¹

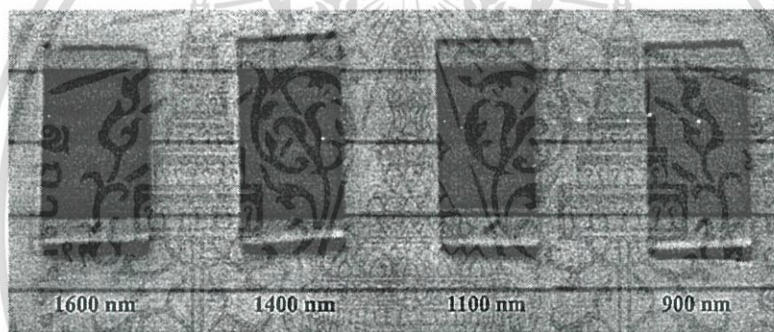


รูปที่ 4.19 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะ สภาพคล่องตัวของพาหะ และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂:F ที่มี F=0, 5 และ 10 at%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ฟิล์มบาง CdTe

การเตรียมฟิล์มบาง CdTe ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยใช้สารตั้งต้นเป็น CdTe ชนิดผงที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% มีลักษณะเป็นผงสีดำ นำมาขึ้นรูปเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm โดยอัดด้วยแรงขนาด 3.8 Mpa จากนั้นนำมาระเหยด้วยเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ความดันประมาณ 4.0×10^{-6} mbar โดยใช้ภาชนะระเหยสารเป็นทั้งสแตน จะได้ฟิล์มบางสีดำ-แดง ดังรูปที่ 4.20 พบว่าฟิล์มที่ได้จะยึดเกาะกับกระจกสไลด์ดี มีความเรียบสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแผ่น เนื้อฟิล์มมีสีดำ-แดง และจะเข้มขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มมากขึ้น จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าที่ความหนา 1600 nm ฟิล์มบาง CdTe จะมีสีดำ-แดงเข้มที่สุด และที่ความหนา 1400 และ 1100 nm สีดำ-แดงของฟิล์มจะอ่อนลงตามลำดับ และที่ความหนา 900 nm ฟิล์มบางจะมีสีดำ และค่อนข้างบาง โดยสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์

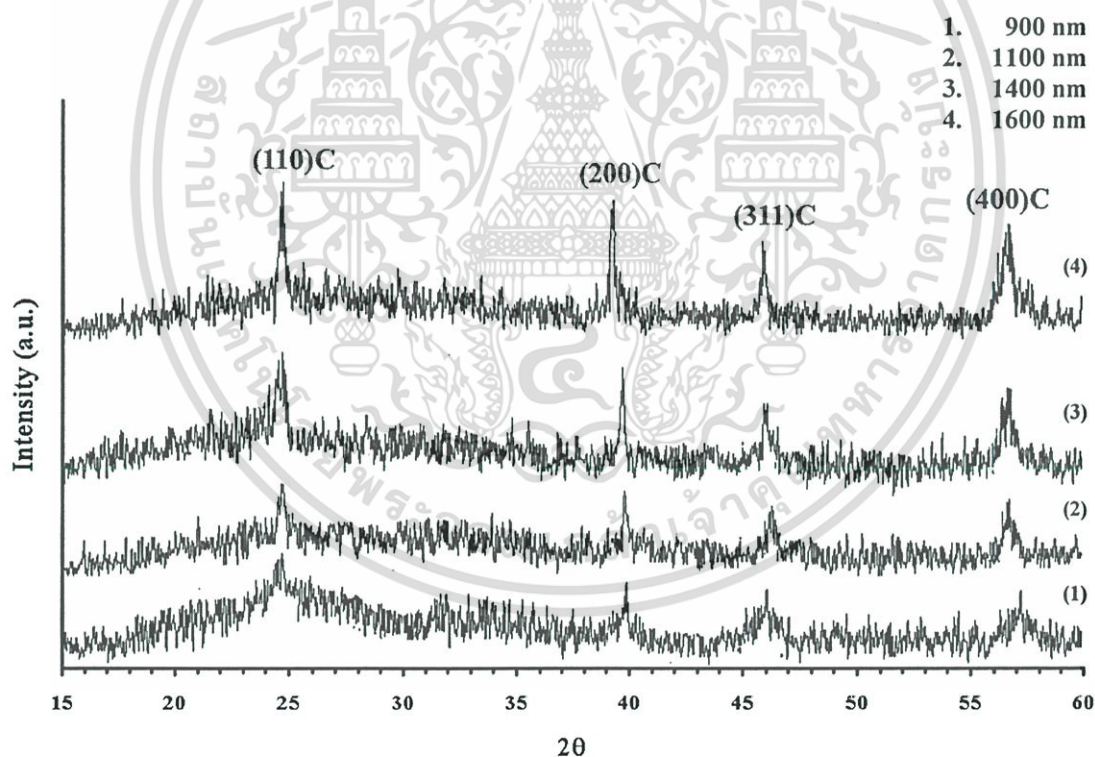


รูปที่ 4.20 ฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm

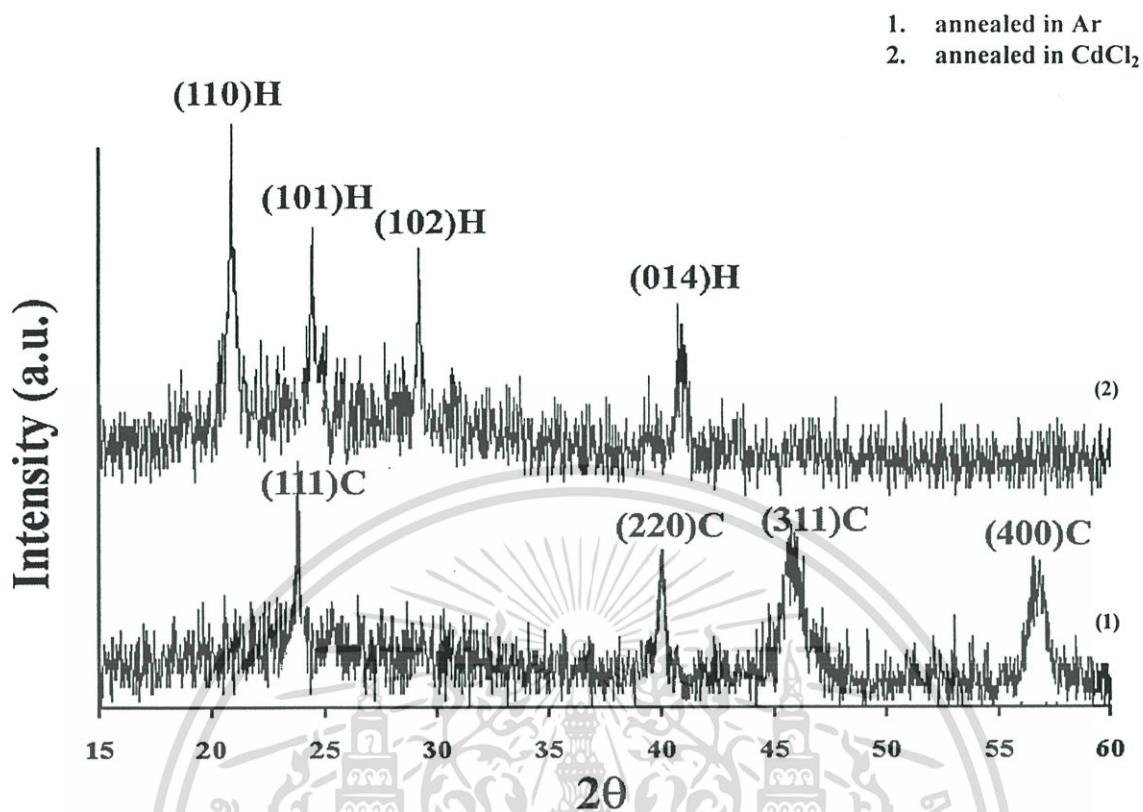
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdTe

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdTe ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของพีคที่ปรากฏขึ้น และนำไปเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์ม CdTe เพิ่มขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น และสมบัติความเป็นผลึกดีขึ้น สังเกตได้จากลักษณะของพีคที่มีความคมชัด และมีความคมชัดมากยิ่งขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างผลึกที่สังเกตได้จะมีพีคปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 24, 40, 46 และ 57 องศา ดังรูปที่ 4.21 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเทียบกับพีคมาตรฐานจึงสามารถระบุได้ว่าตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ที่ปรากฏ เป็นพีคของระนาบเลี้ยวเบน (111)C, (220)C, (311)C และ (400)C ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และฟิล์มบางของ CdTe ที่มีความหนา 1600 nm มีสมบัติความเป็นผลึกดีที่สุด



รูปที่ 4.21 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm

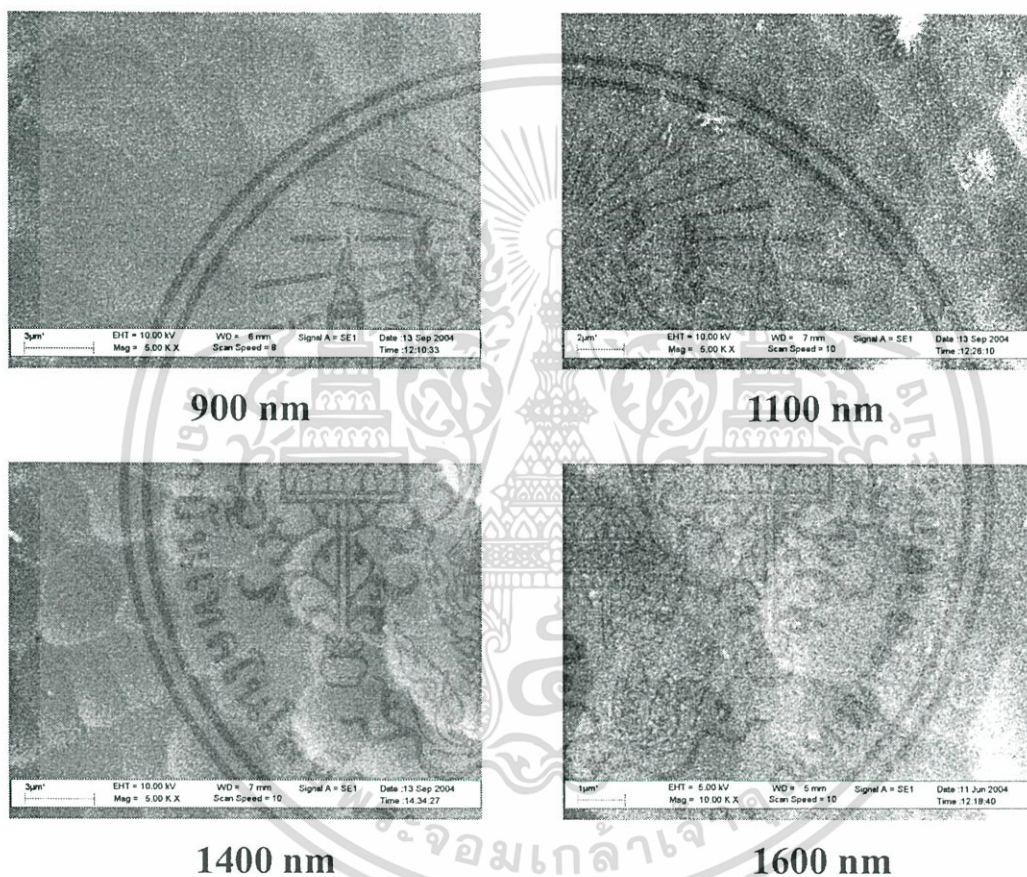


รูปที่ 4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.22 ที่แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการแอนนีสฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ พิกจะปรากฏที่ตำแหน่งเดียวกับในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสแต่ความเข้มของพิกจะสูงขึ้น และเมื่อทำการแอนนีสฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 โดยใช้ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์เป็นตัวพา CdCl_2 ที่ 400°C พบว่าพิกจะปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 23, 25, 29 และ 42 องศา โดยระบุได้ว่าเป็นพิกของระนาบการเลี้ยวเบน (100)H, (101)H, (102)H และ (014)H ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายได้ว่าการ แอนนีสฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 ที่อุณหภูมิ 400°C อะตอมของฟิล์มบาง จะมีการจัดเรียงตัวใหม่ ส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นแบบเฮกซะโกนอล

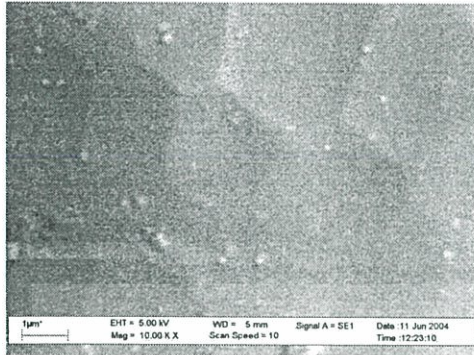
4.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdTe

โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 900, 1100, 1400 และ 1600 nm สามารถศึกษาได้โดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นและเกรนมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นดังรูปที่ 4.23

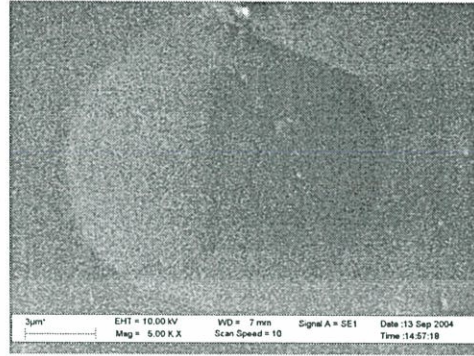


รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 900, 1100, 1400 และ 1600 nm

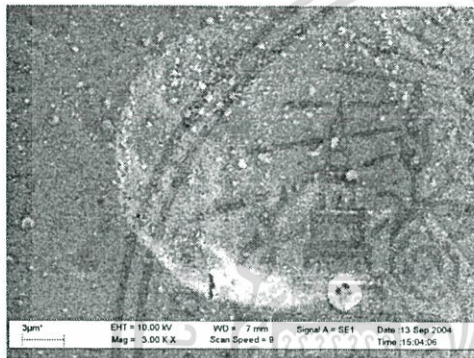
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



as-deposited



annealed in Ar

annealed in CdCl_2

รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และภายใต้บรรยากาศ ของ CdCl_2 เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.24 ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการแอนนีสส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น แต่ในกรณีที่แอนนีสภายใต้ บรรยากาศของ CdCl_2 บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe มีอะตอมของ CdCl_2 บางส่วนปกคลุม อยู่ นอกจากนั้นขนาดของเกรนที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสอดคล้องกับ ขนาดของเกรนที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในหัวข้อที่ 4.3.1 ดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

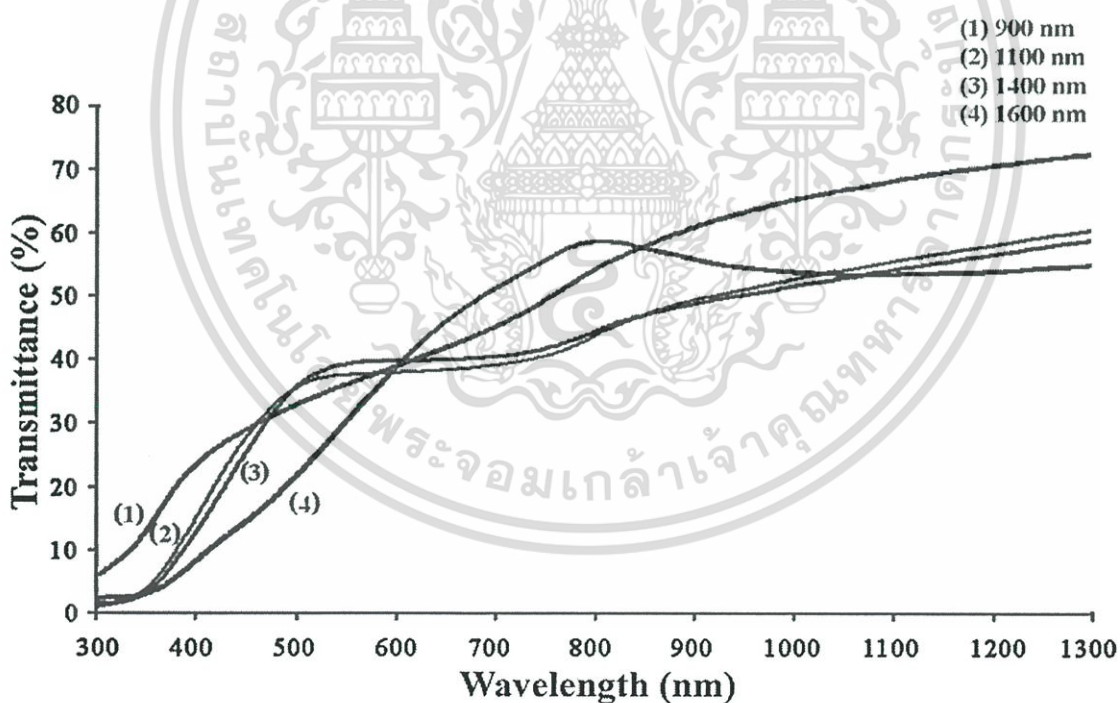
ตารางที่ 4.8 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่คำนวณได้จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และได้จากภาพถ่ายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

Sample	Thickness (nm)	Grain Size (μm)	
		XRD	SEM
As-deposited	900	2.0	2.0
As-deposited	1100	2.2	2.1
As-deposited	1400	2.6	2.5
As-deposited	1600	3.0	3.0
Annealed in Ar	1600	9.5	12.0
Annealed in CdCl_2	1600	9.5	12.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdTe

ในการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdTe ได้ทำการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ รุ่น 7800 ในช่วงความยาวคลื่น 300-1300 nm พบว่าเมื่อฟิล์มบาง CdTe มีความหนาเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนแสงพื้นฐานมีแนวโน้มที่จะเลื่อนไปยังทิศที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังรูปที่ 4.25 นอกจากนี้ ยังสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกำลังสองกับพลังงานโฟตอน สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบาง CdTe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 900 nm มีค่าเป็น 1.15 eV และเพิ่มขึ้นเป็น 1.25 และ 1.30 eV ที่ความหนา 1100 และ 1400 nm ช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe ชนิดผลึกเดี่ยว คือ 1.45 eV โดยประมาณ เมื่อฟิล์มบาง CdTe มีความหนา 1600 nm ดังตารางที่ 4.9 โดยผลการทดลองสอดคล้องกับ ผลการศึกษาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่ได้เคยตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้ว[9, 49-52]



รูปที่ 4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ความหนา 1600, 1400, 1100 และ 900 nm

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe

Sample	Thickness (nm)	Energy Gap (eV)
As-deposited	900	1.15
As-deposited	1100	1.25
As-deposited	1400	1.30
As-deposited	1600	1.45
Annealed in Ar	1600	1.60
Annealed in CdCl ₂	1600	1.49

นอกจากนั้นยังพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 1600 nm จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.60 eV เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที และเมื่อนำฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 1600 nm ไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเป็น 1.49 eV จึงสามารถสรุปได้ว่าการแอนนีสส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่แอนนีสภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่แอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ดังนั้นในกรณีที่มีการแอนนีสฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนจะส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนย้ายโฮลจากขอบล่างสุดของแถบนำไปยังแถบวาเลนซ์ แต่ในกรณีที่มีการแอนนีสฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้ไม่แตกต่างกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 1600 nm และจากผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์ และเผยแพร่มาแล้วระบุว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe มีค่าประมาณ 1.45-1.50 eV [49-52] จึงสรุปได้ว่าการแอนนีสฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ ไม่ส่งผลต่อค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe

4.3.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe

ได้ทำการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe ด้วยวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง[8] ที่อุณหภูมิห้องและในช่วงอุณหภูมิ 30-150°C

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง CdTe

Sample	Thickness (nm)	Resistivity (Ω -cm)
As-deposited	900	1.0×10^{11}
As-deposited	1100	5.5×10^{10}
As-deposited	1400	4.2×10^{10}
As-deposited	1600	2.3×10^{10}
Annealed in Ar	1600	2.0×10^{10}
Annealed in CdCl ₂	1600	1.0×10^8

จากตารางที่ 4.10 พบว่าที่อุณหภูมิห้องเมื่อความหนาของฟิล์มบาง CdTe เพิ่มขึ้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลง โดยที่ความหนา 900 nm จะมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 1.0×10^{11} Ω -cm และจะลดลงเป็น 5.5×10^{10} , 4.2×10^{10} และ 2.3×10^{10} Ω -cm เมื่อความหนาของฟิล์มเป็น 1100, 1400 และ 1600 nm ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางมักขึ้นอยู่กับสมบัติของเกรน กล่าวคือถ้าเกรนมีขนาดเล็กขอบของเกรนจะมีปริมาณมาก ดังนั้นพหุจะเกิดการกระเจิงที่ขอบของเกรนสูง ทำให้สภาพคล่องตัวของพาหะลดลง นอกจากนั้นที่ว่างระหว่างเกรนจะประพฤติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอน[8] สอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคที่พบว่า เมื่อความหนาของฟิล์มบาง CdTe เพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง เมื่อนำฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 1600 nm ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ทำให้อะตอมจัดเรียงตัวเป็นระเบียบยิ่งขึ้น สมบัติความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้น ขอบกพร่องผลึกจึงลดลงส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น แต่เมื่อนำฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 1600 nm ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าขนาดของเกรนใกล้เคียงกับการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน แต่สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลง จากผลการศึกษาที่ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว ระบุว่า เป็นผลมาจากอะตอมของแคดเมียม และคลอรีน ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการแอนนีสลายภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 [51-53]

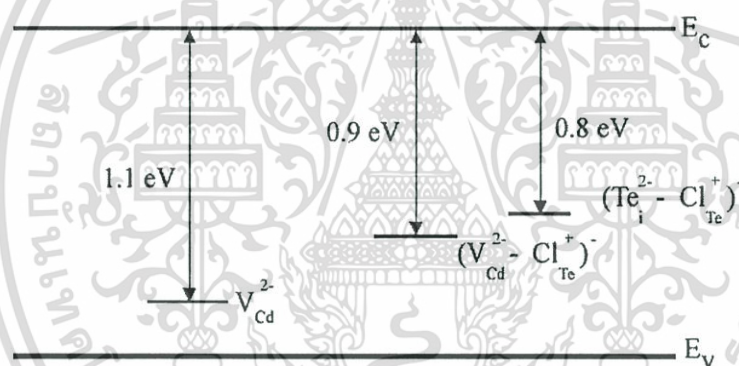
จากนั้นทำการศึกษาระดับพลังงานย่อยที่อยู่ในบริเวณช่องว่างแถบพลังงานโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อทำการคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ในการทดลองนี้ ใช้ช่วงอุณหภูมิ 30-150°C ในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเพิ่มความร้อนขึ้น 10°C ทุกๆ 5 นาที พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe เป็นไปดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิจากของฟิล์มบาง CdTe ที่มีการแอนนีสลายภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl_2 ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที

Sample	Thickness (nm)	Activation Energy (eV)
As-deposited	1600	1.1
Annealed in Ar	1600	0.9
Annealed in CdCl_2	1600	0.8

จากผลการทดลองพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้มีค่าแตกต่างกัน โดยในกรณีของฟิล์มบาง CdTe ที่ไม่ทำการแอนนีสลายมีค่าพลังงานกระตุ้น 1.1 eV ที่บริเวณระดับพลังงานลึก โดยระดับพลังงานดังกล่าวแสดงพฤติกรรมเป็นระดับพลังงานผู้รับ ระดับพลังงานนี้จะเกิดจากการหลุดหายไปของอะตอมแคดเมียม สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้วที่ระบุว่าพบระดับพลังงานผู้รับ บริเวณระดับพลังงานลึกที่ค่าพลังงานกระตุ้น 1.1 eV โดยระดับพลังงานนี้เกิดจากแวนแคนซีของแคดเมียม (V_{Cd}^{2-}) ส่งผลให้ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีมาก (high p-type conductivity) [51] จึงทำให้ฟิล์มบาง CdTe มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง แต่เมื่อมีการแอนนีสลายฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้มีค่า 0.9 และ 0.8 eV ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่ได้ตีพิมพ์ และเผยแพร่มาแล้วระบุว่า การแอนนีสลายฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนค่าพลังงานกระตุ้นจะมาจากผลของออกไซด์ที่อยู่ในก๊าซอาร์กอน หรือเกิดจาก TeO_2 ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยจะเกิดเป็นสารประกอบ CdTeO_3 , CdTe_2O_5 , CdO [52, 54-57] สารประกอบออกไซด์เหล่านี้จะส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซอาร์กอนมีค่าไม่แตกต่างจากในกรณีที่ไม่ทำการแอนนัล สำหรับการแอนนัลฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2 ระดับพลังงานย่อยที่ได้จากการวัดค่าพลังงานกระตุ้นน่าจะเกิดจากการที่อะตอมของเทลลูเรียมหลุดจากตำแหน่งเดิม และแพร่ไปแทรกบริเวณที่ว่างในโครงผลึก เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของเทลลูเรียมมีค่าสูงมาก จากการที่เทลลูเรียมหลุดออกจากตำแหน่งเดิมนั้นจะเกิดที่ว่างขึ้นในโครงผลึกของ CdTe ทำให้มีที่ว่างให้คลอรีนเกิดจาก CdCl_2 เข้าไปแทนที่ในที่ว่างดังกล่าว นอกจากนั้นยังอาจเกิดแวนแคนซีของแคดเมียมได้เช่นเดียวกับกรณีที่ยังไม่มีการแอนนัล สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้วระบุว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้เกิดจากระดับพลังงานผู้ให้ที่ซับซ้อน (acceptor complex) ของระดับพลังงานเกิดจากอันตรกิริยากันระหว่างข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซีของแคดเมียม กับข้อบกพร่องผลึกแบบซับซ้อนระดับพลังงานของคลอรีน $(V_{\text{Cd}}^{2-} - \text{Cl}_{\text{Te}}^+)^-$ หรือ ระดับพลังงานที่เกิดจากอันตรกิริยากันระหว่างข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียลของแคดเมียมกับข้อบกพร่องผลึกแบบซับซ้อนระดับพลังงานของคลอรีน $(\text{Te}_i^{2-} - \text{Cl}_{\text{Te}}^+)^-$ [51, 58-59]



รูปที่ 4.28 แสดงแบบจำลองระดับพลังงานย่อยของฟิล์มบาง CdTe หนา 1600 nm ที่ไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของ CdCl_2

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เป็นชั้นต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe โดยฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 3 ชั้น คือ ชั้นลดการสะท้อนแสง/ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ชั้นหน้าต่างรับแสง และชั้นดูดกลืนแสง

5.1.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้นลดการสะท้อนแสง/ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

ฟิล์มบาง SnO_2 มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เนื่องจากฟิล์มบาง SnO_2 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานกว้างกว่า 3 eV จึงสามารถส่งผ่านแสงได้ในช่วงกว้าง แต่ยังไม่สามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงได้ เนื่องจากสภาพต้านทานไฟฟ้ายังมีค่าสูง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้ความร้อนกับฐานรองรับ ใช้ SnO ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ เป็นสารตั้งต้น หลังจากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จะได้ฟิล์มบางสีดำที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากนั้นนำฟิล์มบางสีดำที่ได้ไปแอนนัล ภายใต้อากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มบางสีดำจะเปลี่ยนเป็นสีใสโปร่งแสง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้วิธีการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบพีคระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ (100), (101), (002), (200), (211) และ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล(รูไทล์) พบว่าฟิล์มบาง SnO_2 ที่เตรียมได้เกิดจากเฟสผสมระหว่าง SnO และ SnO_2 และเมื่อเจือฟลูออไรด์ใน SnO_2 จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง SnO_2 โดยฟลูออไรด์ที่เจือใน SnO_2 จะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณโครงสร้างผลึก

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคพบว่าเมื่อทำการเจือฟลูออไรด์ใน SnO_2 ส่งผลในขนาดของเกรนโตขึ้น สอดคล้องกับขนาดของเกรนที่คำนวณได้จากค่า FWHM และพบว่าในกรณีที่เจือฟลูออไรด์ 5at% ขนาดของเกรนจะใหญ่ที่สุดคือมีขนาดประมาณ 3 μm

จากการศึกษาสมบัติทางแสงพบว่าเมื่อทำการเจือฟลูออไรด์ ฟิล์มบาง SnO_2 สามารถส่งผ่านแสงได้มากขึ้น จากนั้นทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่ากว้างขึ้น เป็น 3.35 และ 3.85 eV เมื่อเจือฟลูออไรด์ 5 และ 10 at% ตามลำดับ ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้มีค่าสูงใกล้เคียงกับวัสดุชนิดที่เป็นฉนวน แต่จากการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่อทำการเจือด้วยฟลูออไรด์ 5 at% ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงจาก $9.5 \times 10^1 \Omega\text{-cm}$ เป็น $1.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ แสดงให้เห็นว่าการเจือฟลูออไรด์ใน SnO_2 ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานกว้างขึ้น แต่สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเป็นไปตามทฤษฎีแบบจำลองของเบรินสไตน์-มอส และเมื่อเจือฟลูออไรด์ 10 at% ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น $2.3 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ เนื่องจากปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการกระเจิงของพาหะอิสระมีค่ามากขึ้น ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ดังนั้นฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ (5 at%) จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงและเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe

5.1.2 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชั้นหน้าต่าง

สารกึ่งตัวนำที่ได้รับความนิยมเลือกใช้เป็นชั้นหน้าต่างสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe คือฟิล์มบาง CdS และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีการเจือสังกะสีเข้าไปใน CdS เพื่อให้ชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถส่งผ่านแสงได้ช่วงกว้างขึ้น และเป็นการลดปริมาณการใช้แคดเมียมลงอีกด้วย โดยเลือกเงื่อนไขที่มีปริมาณสังกะสี 40% เนื่องจากมีรายงานระบุว่า $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ สามารถส่งผ่านแสงได้สูงเนื่องจากผิวหน้าของฟิล์มบางมีลักษณะพื้นผิวเป็นพืดหลายๆ พืด ที่มีความสูงใกล้เคียงกัน และกระจายกันอย่างสม่ำเสมอ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี โดยใช้สารตั้งต้นเป็นเกลือแคดเมียมซัลเฟต เกลือซิงค์ซัลเฟต และไทโอยูเรีย ใน ขั้นตอนการเตรียมสารละลายจะมีค่า pH ประมาณ 11.4 เท่าเดิมทุกครั้ง ในระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ จะใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์จุ่มในสารละลาย และทำการหมุนฐานรองรับในสารละลายด้วยความเร็วรอบประมาณ 60 รอบต่อนาที เพื่อเป็นการกวนสารละลายให้ทำปฏิกิริยากันได้ดีขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง นำฐานรองรับที่ผ่านการเคลือบไปเซย์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อให้ตะกอนบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางที่เกิดจากกระบวนการโฮโมจีเนียสหลุดออกจากผิวหน้าของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ ที่เตรียมขึ้นยึดติดกับฐานรองรับได้ดีมีความเรียบสม่ำเสมอและมีสีเหลืองอมส้ม เมื่อนำฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ ที่เตรียมได้ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $100\text{-}500^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $x=0.4$ จะมีสีเข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการแอนนัลสูงขึ้น

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้วิธีการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ กรณีที่ไม่มีการแอนนัลจะแสดงความเป็นอะมอร์ฟัส แต่เมื่อทำการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-300°C จะปรากฏพีคระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยพีคจะมีความเข้มสูงขึ้นและค่า FWHM ลดลง เมื่ออุณหภูมิการแอนนัลสูงขึ้น เนื่องจากระนาบ (111) มีแนวโน้มขนานกับผิวหน้าของฐานรองรับ เมื่ออุณหภูมิการแอนนัลสูงกว่า 300°C จะปรากฏพีคระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ(110), (002) และ (101) ของเฮกซะโกนอล จึงสามารถระบุได้ว่าที่อุณหภูมิการแอนนัลสูงกว่า 300°C โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ จะเริ่มเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคพบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ มีขนาดของเกรนเล็กมากคือมีขนาดเล็กกว่าประมาณ 300 nm อุณหภูมิการแอนนัลส่งผลให้ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น และการจัดเรียงตัวของเกรนมีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับขนาดของเกรนที่คำนวณได้จากค่า FWHM

จากการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ เมื่อมีการแอนนัลพบว่าขอบการดูดกลืนแสงพื้นฐานจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิการแอนนัลสูงกว่า 300°C ขอบการดูดกลืนแสงพื้นฐานจะเลื่อนกลับมาทางความยาวคลื่นที่สั้นลง เมื่อทำการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่เตรียมได้มี 2 ค่า โดย E_{g1} เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdS และ E_{g2} เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ พบว่าที่อุณหภูมิการแอนนัลที่ 300°C ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g1} จะเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล และเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้นขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้น แต่ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_{g2} ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะมีค่าค่อนข้างคงที่

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิการแอนนัล 200-300°C มีค่าต่ำที่สุด และจากการฉายแสง พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงประมาณ 10^4 - 10^3 เท่า เมื่อทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ มีค่าเป็น 0.12 eV และ 0.97 eV โดยระดับพลังงานดังกล่าวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบแวนเดอวาล์วและเกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียลของสังกะสี

ดังนั้นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่แอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 30 นาที จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นชั้นหน้าต่างให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe

5.1.3 फिल्मบางสารกึ่งตัวนำชั้นดุดกลินแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe จะใช้ฟิล์มบาง CdTe เป็นชั้นดุดกลินแสง โดยฟิล์มบาง CdTe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.45 eV โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdTe ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยใช้สารตั้งต้นเป็น CdTe ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ เมื่อทำการระเหยเคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 900 nm จะมีสีดำแต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นฟิล์มบาง CdTe จะมีสีดำ-แดง เมื่อนำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ ที่เตรียมได้ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และภายใต้บรรยากาศของ $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี $X=0.4$ จะมีสีดำเข้มขึ้น

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบพีคของระนาบเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ (111), (220), (311) และ (400) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นพีคจะมีความคมชัดเพิ่มขึ้น แต่ค่า FWHM จะมีค่าลดลง เมื่อทำการแอนนัลฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน จะไม่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึกแต่จะทำให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค และเมื่อทำการแอนนัลฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ $CdCl_2$ พบว่าขนาดของเกรนมีค่าใกล้เคียงกับการแอนนัลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนแต่โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอลโดยพบระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ (100), (101), (102) และ (014) ดังนั้นการแอนนัลจึงส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น และเกรนมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น แต่การแอนนัลภายใต้บรรยากาศของ $CdCl_2$ จะส่งผลให้เกรนมีการจัดเรียงตัวใหม่ส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นแบบเฮกซะโกนอล

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคพบว่าฟิล์มบาง CdTe มีขนาดของเกรนค่อนข้างใหญ่ และขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มบาง CdTe ที่มีความหนา 1600 nm จะมีขนาดของเกรนใหญ่ที่สุดคือประมาณ $3 \mu m$ และเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน และ $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาทีพบว่า ขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้นมากทั้งสองกรณีคือประมาณ $12 \mu m$ แต่ในกรณีที่แอนนัลภายใต้บรรยากาศของ $CdCl_2$ บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe มีอะตอมของ $CdCl_2$ บางส่วนปกคลุมอยู่ ขนาดของเกรนที่ได้มีค่าสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่คำนวณได้จากค่า FWHM

จากการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdTe พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นขอบการดูดกลืนแสงพื้นฐานมีแนวโน้มเลื่อนไปยังทิศที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น เมื่อดำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe พบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นค่าช่องว่างแถบพลังงาน

จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe ชนิดผลึกเดี่ยว คือ มีค่าประมาณ 1.45-1.50 eV และในกรณีที่มีการแอนนีกัลฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 1.60 eV แต่เมื่อแอนนีกัลฟิล์มบาง CdTe ภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่า 1.49 eV จึงไม่ส่งผลต่อค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe

จากการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe พบว่า เมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และเมื่อทำการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าไม่แตกต่างจากเมื่อไม่มีการแอนนีกัล เนื่องจากการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนทำให้อะตอมจัดเรียงตัวเป็นระเบียบยิ่งขึ้น สมบัติความเป็นผลึกสูงขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าจึงสูง แต่เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของ CdCl₂ พบว่าขนาดของเกรนจะใกล้เคียงกับการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนแต่สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าประมาณ 10² เท่า จากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1.1 eV เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซีของแคดเมียม และที่พลังงานกระตุ้นประมาณ 0.8-0.9 eV เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซีของแคดเมียมกับข้อบกพร่องผลึกแบบซับสติติวชันนัลของคลอรีน หรือ เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียลของแคดเมียมกับข้อบกพร่องผลึกแบบซับสติติวชันนัลของคลอรีน

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองค่าสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe

ชั้น	ลดการสะท้อนแสง/ ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง	หน้าต่าง	ดูดกลืนแสง
ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ	SnO ₂ :F (5 at%)	Cd _{1-x} Zn _x S ที่มี X=0.4	CdTe
ความหนา (nm)	300	200	1600
แอนนัล (30 นาที)	400 ^o C in O ₂	300 ^o C in N ₂	400 ^o C in CdCl ₂
โครงสร้างผลึก	rutile	wurtzite	wurtzite
ขนาดของเกรน (μm)	3.0	0.2	12.0
ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	3.35	2.27 /3.60	1.49
ชนิดการนำไฟฟ้า	n	n	p
สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ω.cm)	1.3x10 ⁻³	3.1x10 ⁵	1.0x10 ⁸

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ามีเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดียิ่งขึ้น และข้อเสนอแนะสำหรับผู้ทำวิจัยในโอกาสต่อไปมีดังนี้

- คุณภาพของฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับการกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ด้วยกรด HF เจือจาง ดังนั้นเมื่อกัดผิวหน้าต้องระวังไม่ให้กระจกสไลด์ซ้อนทับกันมิฉะนั้นกระจกสไลด์จะถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น
- กรณีของฟิล์มบาง SnO_2 ควรมีการศึกษาการเจือสารเจือชนิดอื่นๆ เช่น พลวง เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์
- กรณีของฟิล์มบาง SnO_2 ควรมีการศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นโดยใช้โฟโตลูมิเนสเซนซ์
- กรณีของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ ควรมีการนำตะกอนของ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่กั้นภาชนะ ไปเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมด้วยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นที่เป็น CdS และ ZnS บริสุทธิ์
- กรณีของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ ควรมีการศึกษาการเจือสารเจือบางชนิด เช่น โบรอน เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์
- กรณีของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี $X=0.4$ เนื่องจากเกรนมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร การศึกษาลักษณะผิวหน้าโดยใช้ AFM (Atomic Force Microscopy) จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า
- กรณีของฟิล์มบาง CdTe ควรศึกษาการเตรียมด้วยวิธีอื่นๆ เช่น CSS (Close-Speded sublimation) หรือ CBD เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- กรณีของฟิล์มบาง CdTe ควรมีการศึกษาผลกระทบต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdTe เมื่อใช้ก๊าซชนิดอื่นในการพา CdCl_2 แทนก๊าซอาร์กอน
- กรณีของฟิล์มบาง CdTe ควรมีการศึกษาการเจือ CdCl_2 ในขั้นตอนการแอนนیل ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การตกตะกอนในอ่างเมทานอล เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแอนนیلในบรรยากาศของ CdCl_2
- กรณีของฟิล์มบาง CdTe ควรมีการศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นโดยใช้โฟโตลูมิเนสเซนซ์ เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Walf M. Proc IRE, vol.48, 1960. Pp.1246.
- [2] D.C. Reynolds, G. Leies, L.L. Antes, and R.E. Marburger, *Physical Review*, vol.96, 1954. Pp.533–534.
- [3] A. M. Barnett, J. A. Bragagnolo, R. B. Hall, J. E. Phillips and J. D. Meakin, *Cof. Rec. 13th IEEE, Photovoltaic Spec. Conf.*, 1978. Pp.419.
- [4] P.L. Paulson and V. Dutta, "Study of in situ CdCl_2 treatment on CSS deposited CdTe films and CdS/CdTe solar cells" *Thin Solid Film*, vol.370, 2000. Pp.299.
- [5] S. Wagner, J. L. Shay, P. Migliorato, and H. M. Kasper, vol.25,1974. 434–435.
- [6] Kazmerski L.L., White F. R., and Morgan G.K., "Thin-film $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ heterojunction solar cells", *Applied Physics Letters*, vol.29, 1976. Pp. 268–270.
- [7] 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, 2003. 349-353.
- [8] วีรชัย ลิภา, "การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี", *วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2547.
- [9] M.A. Redwan, E.H. Aly, L.I. Soliman, A.A. El-Shazely and H.A. Zayed, "Characteristics of $n\text{-Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}/p\text{-CdTe}$ heterojunctions", *Vacuum*, vol.69, 2003. Pp. 545–555.
- [10] งามนิตย์ แก้วแดง, วิฐนัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์", *รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2545.
- [11] Kittel C., *Introduction to Solid State Physics*, 4th ED., John Wiley & Sons Inc., 1971.
- [12] บัญชา ธนบุญสมบัติ, "การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน", *สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)*, กรุงเทพฯ, 2544.
- [13] Galasso F.S., *Structure and Properties Inorganic Solids* 1st ED., Pergamon Press, 1970.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Suchet J.P., *Crystal Chemistry and Semiconduction in Transition Metal Binary Compound*, Academic Press, 1971.
- [15] Cullity B.D., *Elements of X-ray Diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1956.
- [16] Dieter K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, 1990.
- [17] กัลยา เขี้ยประเสริฐศักดิ์, "การศึกษารอยต่อแบบพี-เอ็นไอโมจังค์ชันของ คอปเปอร์อินเดียมไดซลีไนต์", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
- [18] Smith R.A., *Semiconductors*, Cambridge University Press, 2nd ED., 1978.
- [19] Sze S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 2nd ED., 1981.
- [20] สิงหนเดช แต่งจวง, "การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการเคลือบแบบออบสาร์ละลายเคมี", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [21] Runyan W.R., *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, McGraw-Hill, 1975.
- [22] ลีตินัย แก้วแดง, "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซลีไนต์ (CuInSe_2)", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [23] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซลีไนต์", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
- [24] Ohring M., *Materials Science of Thin Films Deposition and Structure*, 2nd ed., Academic Press, 2002.
- [25] McGuire G.E., *Semiconductor Materials and Process Technology Handbook*, Noyes, 1988.
- [26] Harris N.S., *Modern Vacuum Practice*, McGraw-Hill, 1989.
- [27] ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไนย, "ฟิสิกส์และเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2526.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] Yamaguchi T., Yamamoto Y., Tanaka T. and Yoshida A., "Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Film by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Device", *Thin Solid Films*, vol.343, 1999. Pp.516-519.
- [29] Dona J.M. and Herrero J., "Chemical Bath Co-deposited CdS-ZnS Film Characterization", *Thin Solid Films*, vol.268, 1995. Pp.5-12.
- [30] Yamaguchi T., Yamamoto Y., Tanaka T., Demizu Y. and Yoshida A., "(Cd,Zn)S Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Device", *Thin Solid Films*, vol.281-282, 1996. Pp.5-12.
- [31] O'Brien P. and Mcaliese J., "Developing an Understanding of the Processes Controlling the Chemical Bath Deposited of ZnS and CdS", *J. Matter. Chem.*, vol.8, 1998. Pp.2309-2314.
- [32] Al Kuhaimi S.A. and Tulbah Z., "Structural, Compositional, Optical and Electrical Properties of Solution-Grown $Zn_xCd_{1-x}S$ ", *J. Electro. Chem. Soc.*, vol.147, 2000. Pp.214-218.
- [33] Ichimura M. , Goto F. and Arai E. , "Structural and Optical Characterization of CdS Films Grown by Photochemical Deposition", *J. Appl. Phys.*, vol.85, 1999. Pp.7411-7414.
- [34] Zehe A. and Vazquez Luna J.G., "Magnetic Field Influenced Growth Kinetics in Chemical CdS Thin-Film Deposition", *Sol. Ener. Mater. Sol. Cell.* , vol.68 , 2001. Pp.217-226.
- [35] Ray S.C., Karanjai M.K. and Gupta D.D., "Deposited and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Film Prepared by the Dip Technique", *Thin Solid Films*, vol.322, 1998. Pp.117-112.
- [36] Tomas S.A. and Vigil O., "Influence of Thermal Annealing in Different Atmospheres on the Band-Gap Shift and Resistivity of CdS Thin Films", *J. Appl. Phys.* , vol.78 , 1995. Pp.2204-2207.
- [37] Oladeji I.O. and Chow L., "A Study of the Effects of Ammonium salt on Chemical Bath Deposition Zinc Sulfide Thin Films", *Thin Solid Films.*, vol.399, 1999. Pp.184-193

- [38] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภู่วรรักษ์เกียรติ, สุกฤษฏี เกิดแสง และพิมล ศิริพจนาวรรณ, "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ", วทท.29, 2546.
- [39] N. Gaewdang, T.Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and A. Nakaruk, "Characterization of CdS Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method", Cof. Rec. NCOA-1, 2003.
- [40] Dona J.M. and Herrero J., "Process and Film Characterization of Chemical Bath-deposition ZnS Thin Films", J. Electro. Chem. Soc., vol.141, 1994. Pp.205-210.
- [41] Izumi F., J. Solid State Chem., Vol.38, 1981. Pp.381.
- [42] Pramod S. Patil, "Versatility of Chemical spray pyrolysis technique", Mater. Chem. Phy., vol.59, 1999. Pp.185-198.
- [43] R. Ota, S. Seki, M. Ogawa, T. Nishide, A. Shida, M. Ide and Y. Sawada, "Fabrication of indium-tin-oxide films by dip coating process using ethanol solution of chlorides and surfactants", Thin Solid Films, vol.411, 2002. Pp.42-45.
- [44] D. Zaouk, Y. Zaatari, A. Khoury, C.Llinares, J.P. Charles and J. Bechara, "Fabrication of tin oxide(SnO_2) thin film by electrostatic spray pyrolysis", Microelectronic Engineering, vol.51, 2000. Pp. 627-631.
- [45] P. Veluchamy et al., "A pyrosol process to deposit large-area $\text{SnO}_2:\text{F}$ thin films and its use as a transparent conducting substrate for CdTe solar cells", Sol. Ener. Mater. Sol. Cell, vol.67, 2001. Pp.179-185.
- [46] H. J. Möller, Semiconductors for Solar Cells, Artech House Inc., 1993.
- [47] S. Ignatowicz and A. Kobendza, Semiconducting Thin Films of II-VI Compounds, 1990.
- [48] H. Martin and R. Esen, "Annealing studies on CBD grown CdS thin films", J. Crystal Growth., vol.258, 2003. Pp.141-148.
- [49] N. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham, "Growth and Some Properties CdTe Thin Films by Thermal Evaporation", Cof. Rec. MSAT-III, 2004.

- [50] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, สุกฤษฏี เกิดแสง, ปกรณ์ สิทธิเชตรกรณ์ และ ฐิติกร จรรย์ารม, "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ", วทท.30, 2547.
- [51] V. Valdna, F. Buschmann and E. Mellikov, "Conductivity conversion in CdTe layers", J. Crystal Growth, vol.161, 1996. Pp.164-167.
- [52] X. Mathew et al. "Shallow levels in the band gap of CdTe films deposited on metallic substrates", Sol. Ener. Mater. Sol. Cell., vol. 70, 2001. Pp.379-393.
- [53] Devid W. Niles, Donna Water and Dong Rose, "Chemical reactivity of CdCl₂ wet-deposited on CdTe films studied by X-ray photoelectron spectroscopy", Appl. Surf. Sci., vol.136, 1998. Pp.221-229.
- [54] L. I. Grossweiner, J. Appl. Phys., vol.24, 1953. Pp.1306.
- [55] V. P. Zayachkivskii et al., Sov. Phys. Semicond., vol.8, 1974. Pp.675.
- [56] G. M. Matin, E. Fogarassy and E. J. Fabre, J. Appl. Phys., vol.47, 1976. Pp.1020.
- [57] S.S. Ou et al., "Hole trap in p-type electrochemically deposited CdTe thin films", J. Crystal Growth, vol.117, 1992. Pp.660.
- [58] C. G. Morris and A. Tottszer, Mater. Forum, vol.15, 1991. Pp.157.
- [59] M. Laasch et al., "Characterization of cadmium telluride crystals grown by different techniques from the vapour phase", J. Crystal Growth, vol.146, 1995. Pp.125.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ SnO_2 และ $CdTe$ ที่ได้จากฐานข้อมูลมาตรฐาน
ฐาน JCPDS (The Joint Committee on Powder Diffraction standards)

Pattern : 40-835

Radiation = 1.540598

Quality : Not indexed

$Cd_{0.05}Zn_{1.95}S_{10}$		2 θ	I	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 $Cd(NO_3)_2$ containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C. GENERAL COMMENTS : 19.5 mole % ZnS. GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: $a=4.131-0.001314 P$; $s=0.003$, $c=6.173-0.00458 P$; $s=0.004$, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.</p>						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 85-423		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Sn O		2th	I	h	k	l
Tin Oxide		18.312	5	0	0	1
		29.875	100	1	0	1
		33.331	28	1	1	0
		37.115	10	0	0	2
		38.291	<1	1	1	1
		44.342	1	1	0	2
		47.854	14	2	0	0
		50.733	22	1	1	2
		51.656	1	2	0	1
		57.443	24	2	1	1
		62.066	7	2	0	2
		62.485	8	1	0	3
		67.281	<1	2	1	2
		67.683	1	1	1	3
		69.998	3	2	2	0
		73.057	<1	2	2	1
		77.570	<1	2	0	3
		77.926	4	3	0	1
		79.063	1	0	0	4
		79.772	3	3	1	0
		81.982	3	2	2	2
		82.357	6	2	1	3
		83.830	<1	1	0	4
		86.719	<1	3	0	2
		88.554	2	1	1	4
Lattice : Tetragonal S.G. : P4/nmm (129) a = 3.79860 c = 4.84080 Z = 2		Mol. weight = 134.69 Volume [CD] = 69.85 Dx = 6.404 V_{cor} = 15.21				
ICSD COLLECTION CODE : 015516 TEMPERATURE FACTOR : ITF						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *J. Solid State Chem., volume 38, page 381, (1981) : Izumi, F.						
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 1-657		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Sn O ₂		2th	l	h	k	l
		26.668	100	1	1	0
		33.929	63			
Tin Oxide		38.101	18	2	0	0
		52.230	63	2	1	1
		54.936	10	2	2	0
		58.357	5	0	0	2
		62.260	10	3	1	0
		64.678	10	1	1	2
		66.229	15			
		71.403	6	2	0	2
		79.079	10	3	2	1
		81.505	2	4	0	0
		84.107	6	2	2	2
		87.889	3	3	3	0
		89.934	8	3	1	2
		93.220	3	4	2	0
		95.577	2	3	3	1
		108.356	8	4	0	2
		111.845	1	4	1	2
		115.662	4	3	3	2
		122.170	4	4	2	2
		129.980	2	5	2	1
Lattice : Tetragonal S.G. : P42/ncm (138) a = 4.72000 c = 3.17000 Z = 2		Mol. weight = 150.69 Volume [CD] = 70.62 Dx = 7.086 Dm = 6.990				
DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS card 5-467 or 21-1250 and 41-1445. COLOR : Yellowish to reddish brown to black MELTING POINT : >1900 OPTICAL DATA : B=2.006, Q=2.0972, Sign=+						
*Anal. Chem., volume 10, page 475, (1938) primary reference : Hanawalt, et al. *Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., unit cell data :						
Radiation : MoK α 1 Lambda : 0.70900 SS/FOM : F20= 6(0.1020,35)		Filter : Not specified d-sp : Not given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-88		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Cd Te		2th	l	h	k	l
Cadmium Telluride		23.664	11	1	0	0
		25.221	3	1	0	1
		26.000	<1	0	0	3
		29.432	100	1	0	2
		35.441	1	0	1	3
		41.604	19	1	1	0
		42.608	33	0	1	4
		45.350	12	1	1	2
		48.420	9	2	0	0
		49.276	1	2	0	1
		49.718	1	1	1	3
		50.595	<1	0	1	5
		51.779	9	0	2	2
		53.474	5	0	0	6
		55.401	6	1	1	4
		55.774	2	2	0	3
		59.263	1	1	0	6
		61.069	5	2	0	4
		62.184	<1	1	1	5
		65.706	2	2	1	0
		66.411	2	1	2	1
		67.508	<1	0	2	5
		68.504	8	1	2	2
		69.944	6	1	1	6
		71.928	<1	1	2	3
		74.998	4	0	2	6
		75.922	1	3	0	0
		76.615	6	2	1	4
		78.564	3	3	0	2
		78.683	4	1	0	8
		81.833	1	3	0	3
		82.514	1	2	1	5
		83.531	<1	2	0	7
		84.885	<1	0	0	9
		86.368	2	0	3	4
		88.391	1	1	1	8
		89.622	2	2	1	6
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 240.01				
S.G. : P3121 (152)		Volume [CD] = 167.42				
a = 4.33800		Dx = 7.142				
c = 10.27300	Z = 3	l/cor = 13.39				
ICSD COLLECTION CODE : 067862 REMARKS FROM ICSD : REM PRE 2870. REMARKS FROM ICSD : REM RVP. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 48, page 16246, (1993) : McMahon, M.I., Nemes, R.J., Wright, N.G., Allan, D.R.						
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-89		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated	
	2 θ	I	h	k	l
Cd Te	23.769	9	1	0	0
	25.323	3	1	0	1
	26.020	<1	0	0	3
	28.527	100	1	0	2
	35.530	1	1	0	3
	41.796	22	1	1	0
	42.695	32	0	1	4
	*42.695	32	1	1	1
	45.535	9	1	1	2
	48.647	7	2	0	0
	49.500	1	2	0	1
	49.897	1	1	1	3
	50.683	<1	0	1	5
	52.001	10	0	2	2
	53.519	5	0	0	6
	55.575	5	1	1	4
	55.990	2	0	2	3
	59.354	1	1	0	6
	61.282	5	2	0	4
	62.356	<1	1	1	5
	66.032	2	2	1	0
	68.736	2	1	2	1
	67.720	<1	0	2	5
	68.827	8	0	2	2
	70.118	7	1	1	6
	72.250	<1	1	1	3
	75.212	3	2	0	6
	76.315	1	3	0	0
	76.937	6	2	1	4
	78.791	4	1	0	8
	78.791	4	1	1	7
	76.958	3	3	0	2
	82.229	1	3	0	3
	82.839	1	2	1	5
	83.751	<1	2	0	7
	84.968	<1	0	0	9
	86.768	2	0	3	4
	88.593	1	1	1	8
	89.956	1	1	1	6

<p>Mol. weight = 240.01</p> <p>Volume [CD] = 165.93</p> <p>Dx = 7.210</p> <p>I/ICor = 13.95</p> <p>Z = 3</p> <p>a = 4.31900</p> <p>c = 10.26500</p>	<p>ICSD COLLECTION CODE : 067863</p> <p>REMARKS FROM ICSD : REM PRE 3200.</p> <p>REMARKS FROM ICSD : REM RVP.</p> <p>TEST FROM ICSD : No R value given.</p> <p>TEST FROM ICSD : At least one TF missing.</p>
---	--

Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference :
 *Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 48, page 16246, (1993) :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>Pattern : 15-770</p> <p>Radiation = 1.540600</p> <p>Quality : Indexed</p>																																																																																	
<p>Cd Te</p> <p>Cadmium Telluride</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>I</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>23.759</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>39.312</td><td>60</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>46.434</td><td>30</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>56.821</td><td>6</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>62.353</td><td>10</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>71.216</td><td>10</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>76.300</td><td>4</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>84.469</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>89.412</td><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>97.443</td><td>4</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>102.400</td><td>2</td><td>5</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>110.837</td><td>1</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>116.146</td><td>2</td><td>5</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>123.593</td><td>4</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>131.817</td><td>4</td><td>7</td><td>3</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	2 θ	I	h	k	l	23.759	100	1	1	1	39.312	60	2	2	0	46.434	30	3	1	0	56.821	6	4	0	0	62.353	10	3	3	1	71.216	10	4	2	2	76.300	4	5	1	1	84.469	2	4	4	0	89.412	4	5	3	1	97.443	4	6	2	0	102.400	2	5	3	3	110.837	1	4	4	4	116.146	2	5	5	1	123.593	4	6	4	2	131.817	4	7	3	1
2 θ	I	h	k	l																																																																													
23.759	100	1	1	1																																																																													
39.312	60	2	2	0																																																																													
46.434	30	3	1	0																																																																													
56.821	6	4	0	0																																																																													
62.353	10	3	3	1																																																																													
71.216	10	4	2	2																																																																													
76.300	4	5	1	1																																																																													
84.469	2	4	4	0																																																																													
89.412	4	5	3	1																																																																													
97.443	4	6	2	0																																																																													
102.400	2	5	3	3																																																																													
110.837	1	4	4	4																																																																													
116.146	2	5	5	1																																																																													
123.593	4	6	4	2																																																																													
131.817	4	7	3	1																																																																													
<p>Lattice : Face-centered cubic</p> <p>S.G. : F-43m (216)</p> <p>a = 6.48100</p>	<p>Mol. weight = 240.01</p> <p>Volume [CD] = 272.22</p> <p>Dx = 5.856</p> <p>I/cor = 6.50</p>																																																																																
<p>Z = 4</p>	<p>COLOR : Black</p> <p>SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample was obtained from Semi-Elements Inc., Saxonburg, Pennsylvania, USA.</p> <p>ANALYSIS : Spectrographic analysis: 0.01-0.1% Si; 0.0001-0.001% each of Ba, Fe, and Pb.</p> <p>TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.</p>																																																																																
<p>CAS: 1306-25-8</p> <p>*Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 21, (1964) primary reference :</p>																																																																																	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสุกฤษฏี เกิดแสง เกิดเมื่อวันที่ 8 กันยายน 2520 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาเมื่อปี 2538 จากโรงเรียนเตรียมทหาร กรุงเทพฯ(ปัจจุบันย้ายไป จ.นครนายก) สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาครุศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 วิชาเอก ฟิสิกส์ จากสถาบันราชภัฏพระนคร เมื่อปี 2545 และเข้าศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปี 2545 ในระหว่างศึกษาได้นำเสนอผลงานวิชาการออกสู่สาธารณะชนโดยวิธีการนำเสนอแบบปากเปล่า และนำเสนอแบบโปสเตอร์แล้วทั้งสิ้น 4 เรื่อง นอกจากนี้ยังได้รับรางวัลผลงานวิชาการยอดเยี่ยมระดับนักศึกษาจากองค์กรOSA ในการนำเสนอผลงานวิชาการในรูปแบบปากเปล่า เรื่อง "Characterization of CdS Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method"

ปัจจุบันผู้เขียนทำงานเป็นอาจารย์สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และกำลังสนใจการเตรียมและการศึกษาสมบัติของวัสดุทุกชนิดที่สามารถนำมาประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงแต่ต้นทุนต่ำ