

ผลของการเจือด้วยอะตอมของธาตุ In ที่มีต่อสมบัติทางแสงและ  
สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd(S,Se)

EFFECT OF In DOPING ON OPTICAL AND ELECTRICAL  
PROPERTIES OF Cd(S,Se) THIN FILMS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

EFFECT OF In DOPING ON OPTICAL AND ELECTRICAL  
PROPERTIES OF Cd(S,Se) THIN FILMS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** ผลการเจือด้วยอะตอมของธาตุ In ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd(S,Se)  
Effect of In Doping on Optical and Electrical Properties of Cd(S,Se) Thin Films

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวสุภัทสร พรหมบุตร รหัสนักศึกษา 58051164




**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2561

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาวิทย์ กรรมการ	
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลการเจือด้วยอะตอมของธาตุ In ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd(S,Se)
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุภัทสร พรหมบุตร รหัสนักศึกษา 58051164
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ CdSe โดยจะทำการระเหยสารเคมีภายใต้ความดัน  $3-4 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ เมื่อระเหยสารเรียบร้อยแล้วจึงทำการแอนนิลต่อภายในระบบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล ที่มีพีคของระนาบ (002) ปรากฏอย่างโดดเด่นกว่าระนาบอื่นๆ นำมาตรวจสอบผิวหน้าของผลึกด้วยเทคนิค FESEM สังเกตได้ว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางมีขนาดเล็กลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภาพถ่ายจาก AFM ทำให้ทราบว่าที่  $x=0.03$  มีความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุด ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.85 อิเล็กตรอนโวลต์ และคงที่ที่ 2.00 อิเล็กตรอนโวลต์ ( $x=0.03-0.05$ ) ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงที่สอดคล้องกับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆที่สำคัญได้ เช่น ค่าดัชนีหักเหของแสง สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง พลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) ค่าไดอิเล็กตริก รวมไปถึงสมบัติทางไฟฟ้าจากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และที่  $x=0.03$  เป็นฟิล์มที่นำไฟฟ้าได้ดีที่สุดซึ่งได้จากการวัดสภาพต้านทานเชิงแสง

**คำสำคัญ:** ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ซีลีไนด์ที่เจือด้วยอินเดียมซัลไฟด์, วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ, พารามิเตอร์ทางแสง, สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ, การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, ปรากฏการณ์ฮอลล์

<b>Title</b>	Effect of In Doping on Optical and Electrical Properties of Cd(S,Se) Thin Films
<b>Students</b>	Miss Supatsorn Prombut Student ID 58051164
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang

### Abstract

In this special project,  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) thin films have been prepared on slide glass substrate by thermal evaporation in vacuum using of CdS and CdSe powder at pressure  $3-4 \times 10^{-5}$  mbar. After finishing evaporation process then the annealing is continued within the system at  $100^\circ\text{C}$  for 30 min. The X-ray diffraction patterns showed that the crystal structure is hexagonal with the plane (002) preferred orientation. From FESEM micrographs, the grain size decreased when the  $\text{In}_2\text{S}_3$  content increased, In addition, from AFM images the surface roughness is biggest for  $x=0.03$ . The energy gap value increased from 1.85 eV and was constant at 2.00 eV (for  $x=0.03-0.05$ ). The dependence of the reflective index on the wavelength obeys the single oscillator model, from which the important parameters such as reflective index, extinction coefficient, oscillator energy ( $E_0$ ), dielectric constant were evaluated. Including electrical properties the Hall effect measurements were performed. The films with  $x=0.03$  is the best conductive films obtained from photoconductivity measurements.

**Keyword:**  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  Thin Films, Thermal evaporation method, Optical parameters, XRD, FESEM, Transient Photoconductivity, Hall effect

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ และอาจารย์ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนในการวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมาและได้ปลูกฝังสิ่งดีงาม คุณธรรม จริยธรรม ให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ นายมนตรี หาญไถ่ย์ นักศึกษาปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำทั่วไปรวมถึงคำแนะนำในการเตรียมฟิล์มบาง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตา ประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้การอบรมสั่งสอน และเป็นพี่พี่ ตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกคนที่ให้การอุปการะทุนการศึกษา เล่าเรียนและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุภัทสร พรหมบุตร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>6</b>
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ .....	6
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซร์ท .....	7
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ .....	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก .....	8
2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ .....	8
2.3 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก .....	11
2.3.1 การระบุตำแหน่ง .....	11
2.3.2 การระบุทิศทาง .....	11
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ .....	11
2.4 ข้อบกพร่องผลึก .....	12
2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด .....	12
2.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น .....	13
2.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ .....	14
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ .....	15
2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก .....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การหาขนาดของเกรน .....	17
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	18
2.7 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	22
2.7.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง .....	22
2.7.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	23
2.7.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน .....	24
2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง .....	25
2.8.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ .....	25
2.8.2 สภาพนำไฟฟ้า .....	27
2.8.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า .....	27
2.8.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง .....	28
2.8.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์ .....	29
2.8.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว .....	30
2.8.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) .....	31
2.8.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ .....	36
2.9 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ....	39
2.9.1 อัตราการระเหยสาร .....	39
2.9.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า .....	39
2.9.2.1 แหล่งกำเนิดทั้งสแตน .....	40
2.9.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป .....	40
2.9.3 ความดันไอของธาตุ .....	41
2.9.4 การระเหยสารประกอบ .....	42
2.9.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วย วิธีการระเหยสาร .....	43
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	45
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>48</b>
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย .....	48
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ .....	48

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ .....	48
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	48
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ .....	49
3.1.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	49
3.1.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) .....	49
3.1.4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) .....	50
3.1.4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	51
3.1.4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์หอนักประกอบทางโครงสร้างเคมีของสาร โดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FTIR) .....	51
3.1.4.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ .....	52
3.1.4.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำ .....	52
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	53
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ .....	53
3.2.2 การเตรียมสาร (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) .....	53
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศ .....	59
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....</b>	<b>63</b>

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	63
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	63
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	64
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	69
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.03$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	71
4.2.4 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	72
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	74
4.3.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	74

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	80
4.4 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	81
4.4.1 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	84
4.4.2 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	90
4.4.3 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแสงจากเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ (Sellmeier Oscillator) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	93
4.4.4 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแสงจากแบบจำลองสปิตเซอร์-แฟน (Spitzer-Fan Model) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	94
4.5 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	98

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6 การศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	105
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>114</b>
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	114
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	116
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	116
เอกสารอ้างอิง .....	117
ภาคผนวก .....	120

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ .....	9
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ .....	10
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z) .....	12
2.4 แสดงปฏิริยาการระเหยสารประกอบ .....	42
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	58
4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดเกรน ความเครียดและความหนาแน่นของดิสโลเคชันของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	67
4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลต์อิมิสชัน (FESEM) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	70
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> โดยที่ x=0.03 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	71
4.4 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM)ที่บริเวณผิวหน้าของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	73
4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E <sub>g</sub> ) และค่าส่วนหางของแถบพลังงาน(E <sub>t</sub> ) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ....	79
4.6 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> เมื่อ x=0.04 ที่ความยาวคลื่น 900 นาโนเมตร .....	89

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> เมื่อ x=0.04 โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว แบบจำลองเซลไมเออร์ และแบบจำลองสปิตเซอร์-แพน .....	97
4.8 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	104
4.9 แสดงค่าความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	107
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงดื้อรั้นขาขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> โดยที่ x=0.02 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ได้รับจากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล .....	111
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงดื้อรั้นขาลงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> โดยที่ x=0.02 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ได้รับจากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล .....	111
4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงดื้อรั้นขาขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> โดยที่ x=0.02 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ .....	112
4.13 แสดงค่าความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงดื้อรั้นขาลงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> โดยที่ x=0.02 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ .....	112

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ ....	6
2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์ .....	7
2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ .....	8
2.4 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ .....	8
2.5 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก .....	11
2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ .....	13
2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู .....	14
2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน .....	14
2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ .....	16
2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	17
2.11 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	17
2.12 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	18
2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสดงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง .....	22
2.14 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ ..	24
2.15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิติแรก และความหนาแน่นของพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ .....	26
2.16 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง .....	28
2.17 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้าน ทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ .....	29
2.18 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์ .....	29
2.19 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว .....	30
2.20 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิด เลื่อนขั้วไฟฟ้า .....	31
2.21 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี .....	33
2.22 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง ที่มีรูปทรงใดๆ .....	37

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ...	38
2.24 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน .....	40
2.25 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ .....	40
2.26 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว .....	41
2.27 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุด หลอมเหลว .....	42
2.28 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น .....	43
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	45
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ .....	46
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่ อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	46
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิ ในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ ร้อนในระบบสุญญากาศ .....	47
2.33 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO .....	47
3.1 แสดงภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance .....	49
3.2 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น FESEM-EDS (7610F) .....	50
3.3 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Park system XE 100 .....	50
3.4 แสดงภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ hitachi รุ่น U-2900 .....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ยี่ห้อ Thermo รุ่น Nicolet 6700 .....	51
3.6 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์ .....	52
3.7 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิห้อง .....	52
3.8 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ .....	53
3.9 แสดงขั้นตอนการเตรียมผลึกสารตั้งต้น $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ .....	58
3.10 แสดงระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	59
3.11 แสดงการบรรจุสารตั้งต้นใส่ลงในเข้าภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน .....	59
3.12 (ก) แสดงแผ่นกระจกสไลด์ที่ทำการเตรียมไว้แล้วมาวางลงบนหน้ากาก(mask) (ข) แสดงเทอร์โมคัปเปิลมาวัดอุณหภูมิตรงแผ่นกระจกสไลด์ 1 แผ่น (ค) แสดงนำแผ่นฮีตเตอร์วางทับลงบนหน้ากากที่มีแผ่นกระจกสไลด์อยู่ .....	60
3.13 แสดงสวิทช์ Main Power, Rotary Pump, Air Cooling Gauge TMP+VALVE .....	60
3.14 (ก) แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ (ข) เริ่มเห็นแสงและสารในภาชนะระเหยสาร (boat) เริ่มสิ้น .....	61
3.15 (ก) แสดง TMP+VALVE (ข) วาล์วปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ .....	62
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	63
4.2 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	64
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ( $a_H, c_H$ ) กับปริมาณการเจือ $In_2S_3$ (%mol) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	68

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิสชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	69
4.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	71
4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	72
4.7 แสดงกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	74
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ $x = 0.00$ .....	75
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ $x = 0.01$ .....	75
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ $x = 0.02$ .....	76

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ $x = 0.03$ .....	76
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ $x = 0.04$ .....	77
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ $x = 0.05$ .....	77
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	78
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\ln \alpha)$ กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	78
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ )กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	79
4.17 แสดงกราฟสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร .....	80

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	81
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	82
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	83
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่ง $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	84
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่ง $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	85
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	86
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	86

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $n^2 - 1/n^2 + 2$ กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	87
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตร (VELF) กับค่าพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	88
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นผิว (SELF) กับค่าพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	89
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	90
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)$ กับ $(h\nu)^{-2}$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	92
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $\lambda^{-2}$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	94
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-k^2)$ กับ $\lambda^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	95
4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-4\pi\chi_e$ กับ $\lambda^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	96

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.00$ .....	98
4.34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.00$ .....	98
4.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.01$ .....	99
4.36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.01$ .....	99
4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.02$ .....	100
4.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.02$ .....	100
4.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.03$ .....	101
4.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.03$ .....	101
4.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ .....	102

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.04$ .....	102
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.05$ .....	103
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.05$ .....	103
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	104
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ( $I_p$ ) กับเวลา ( $t$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ...	105
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ( $\ln I_p$ ) กับเวลา ( $t$ ) ในช่วงขาขึ้น (Rise Time) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.02$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	108
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึมธรรมชาติ ( $\ln I_p$ ) กับเวลา ( $t$ ) ในช่วงขาลง (Decay Time) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.02$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ .....	108
4.49 แสดงการพิตรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ โดยที่ $x=0.02$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	109

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50	
แสดงกราฟพิศกรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอร์มัลไลซ์ชาลงกับเวลาของฟิล์มบาง	
ของสารกึ่งตัวนำ(CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> ) <sub>1-x</sub> (In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> โดยที่ x=0.02 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐาน	
รองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายใน	
ระบบสุญญากาศ .....	
	109



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานที่ใช้ทุกวันนี้ ส่วนใหญ่มันเป็นพลังงานที่มีวัตถุดิบการผลิตมาจากพวกซากฟอสซิลซึ่งทับถมอยู่ใต้พื้นโลกล้นล้านล้านปี ได้แก่พวกน้ำมันดิบหรือก๊าซต่างๆที่สูบขึ้นมาใช้กันและน้ำมันก็มีลดน้อยลงถอยลงและก็จะหมดสิ้นไปในอีกไม่ช้านี้ ทั้งนี้การเผาผลาญเชื้อเพลิงจากซากฟอสซิลที่มีการสะสมกันมานานทำให้เกิดความเสื่อมโทรมแก่สภาพแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อทุกสรรพสิ่งบนโลกใบนี้ ดังนั้นเพื่อความไม่ประมาทจึงมีการเตรียมความพร้อมที่จะรับมือโดยการนำพลังงานทดแทนนั้นมียู่มากมายหลายประเภท ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้งานได้ ทั้งพลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานจากชีวมวล พลังงานจากดวงอาทิตย์ ฯลฯ เมื่อศึกษารายละเอียดถึงวิธีการนำมาใช้งานแล้ว ต่างก็มีข้อดีข้อจำกัดต่างๆ ทั้งด้านภูมิประเทศ อุปกรณ์ งบประมาณการลงทุนและองค์ความรู้ที่จะทำให้ผู้คนได้เข้าถึงได้ง่ายๆ เช่นพลังงานลม ก็มีเฉพาะบางช่วงบางฤดู บางพื้นที่เท่านั้นพลังงานน้ำก็เช่นกัน น้ำมันน้ำก็ยิ่งน้อยลงจนขาดแคลน พลังงานชีวมวลก็ต้องเฉพาะบางพื้นที่ที่ต้องมีวัตถุดิบป้อนให้สม่ำเสมอ เช่นฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ดังนั้นจึงเห็นมีแต่พลังงานจากดวงอาทิตย์เท่านั้น ที่สาดส่องมายังพื้นโลกอยู่ยาวนานและก็ไม่มีความกังวลว่าจะหมดไปจากโลกสักที สาดส่องไปทั่วทุกพื้นผิวโลกมากบ้างน้อยบ้าง ในปี ค.ศ. 1954 จึงได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาโดยแชปปิน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) (Four Peaks Technologies, 2011) (Sze, 1981) ทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (P-N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก เพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าหรือพลังงานทดแทนซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งานและเป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม

อัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  จัดอยู่ในกลุ่ม II-IV ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความโดดเด่นต่อการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น (n-type) จะมีอิเล็กตรอนอิสระที่โดดเด่น จึงเป็นนำกระแสไฟฟ้าได้ดี มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง สภาพคล่องพาหะอิสระค่อนข้างสูง ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าซิลิกอนซึ่งเหมาะกับการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์ตัวบน (Top Cell) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในการเตรียมฟิล์มบางนี้ ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.0 - 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ มีรายงานไว้ว่า CdS เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมความต้านทานของฟิล์มจะลดลง (Wenget al, 1979; Ramaiah, 1999; Chen et al, 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานนิตย,2558) ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะเตรียมฟิล์มบาง  $CdS_{0.5}Se_{0.5}$  โดยการเจือด้วย  $In_2S_3$  ในปริมาณเศษส่วนโดยมวล  $x = 0.00 - 0.05$

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $CdS_{0.5}Se_{0.5}$  มีกระบวนการทำได้หลายวิธี ได้แก่ การระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation) วิธีสปัตเตอริง (sputtering) วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) และวิธีการอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition : CBD) เป็นต้น โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้นเพราะไม่เพียงแต่จะจัดทำได้ง่ายเท่านั้น แต่ความร้อนแฝงของการควบแน่นยังมีค่าสูง สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สะดวกด้วยการควบคุมความดัน มีอุณหภูมิคงที่ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อควบแน่นยังมีค่าสูงอีกด้วย เหมาะสำหรับเป็นกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม

ซึ่งในโครงการพิเศษนี้จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใสด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก  $CdS$ ,  $CdSe$ ,  $In_2S_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในขณะที่ทำการระเหยสารเคมีจะทำการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับกระจกใสที่ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการระเหยสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสภายในระบบสุญญากาศต่ออีก 30 นาที จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่าน UV เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานและพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญ และยังใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่านรังสีอินฟราเรดเพื่อศึกษาโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอมในฟิล์มบาง ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตลอดจนทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อทำการคำนวณหาค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก  $CdS$ ,  $CdSe$ ,  $In_2S_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใสด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้
- 3) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
- 4) เพื่อศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้
- 5) เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 6) เพื่อศึกษาและคำนวณหาพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการจำลองแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 7) เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดสเปกตรัมของการส่งผ่านแสงในย่านรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิค FTIR และทำการตรวจสอบโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้
- 8) เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เตรียมได้ โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องรวมทั้งสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล ( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdS, CdSe,  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ตลอดจนศึกษาสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต่างๆ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ทำการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdS, CdSe,  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 3) ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้
- 4) ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้
- 5) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้
- 6) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้
- 7) ทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อนำไปหาค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับที่เตรียมได้
- 8) ทำการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความยาวแสง
- 9) ทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมีและการเกิดพันธะทางเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี
- 10) ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล( $x$ ) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และสภาพต้านทานไฟฟ้า
- 11) ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและทำการคำนวณค่าชีวิตของพาหะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล(x) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้

12) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณสารเจือ  $(\text{In}_2\text{S}_3)$  ที่มีผลต่อสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล(x) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้
- 3) ทำให้ทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล(x) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้
- 4) ทำให้ทราบค่าค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความยาวแสง โดยการจำลองแบบจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต และย่านที่ตามองเห็นได้ โดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงหลายลำผ่านตัวกลางโปร่งแสงหลายชั้นซ้อนกัน
- 5) กราฟความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวข้างต้นจะนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงอื่นๆได้อีก โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวที่เสนอโดยแวนเฟิล และโดโดเมนนิโค
- 6) ทำให้ทราบสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางไฟฟ้าทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลโมเลกุล(x) = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดในการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์
- 7) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการทำวิจัย เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ ต่อไปได้

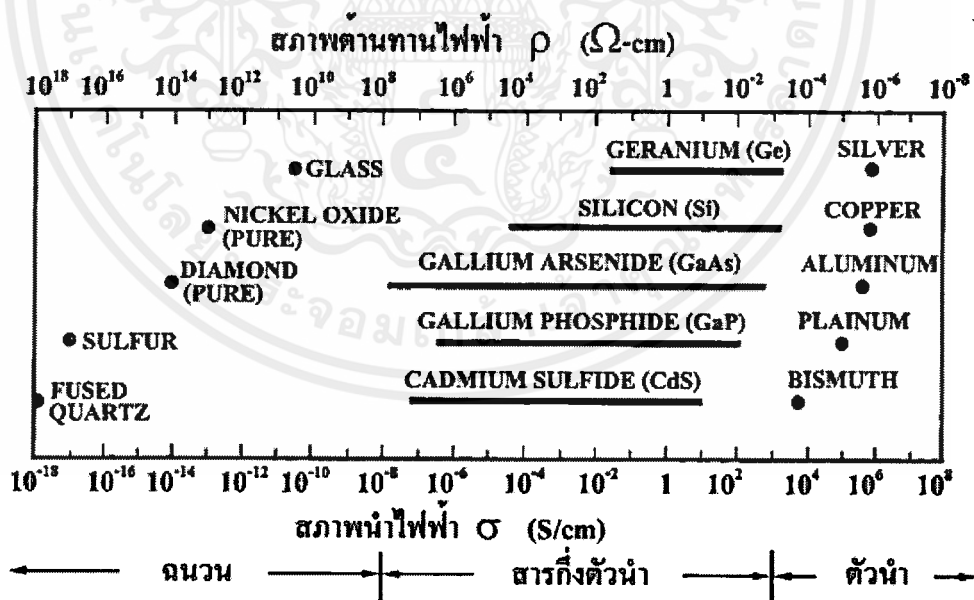
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกหรือฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

#### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย, 2530; งามนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2545)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง  $10^{-18} - 10^{-8}$  ซีเมนตต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง  $10^4 - 10^6$  ซีเมนตต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์

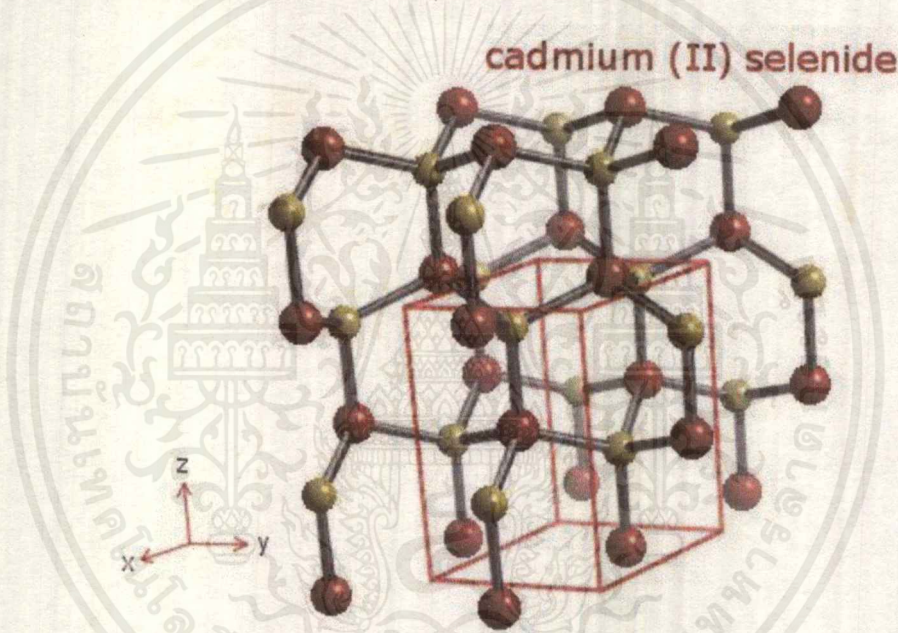


ภาพที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite structure)

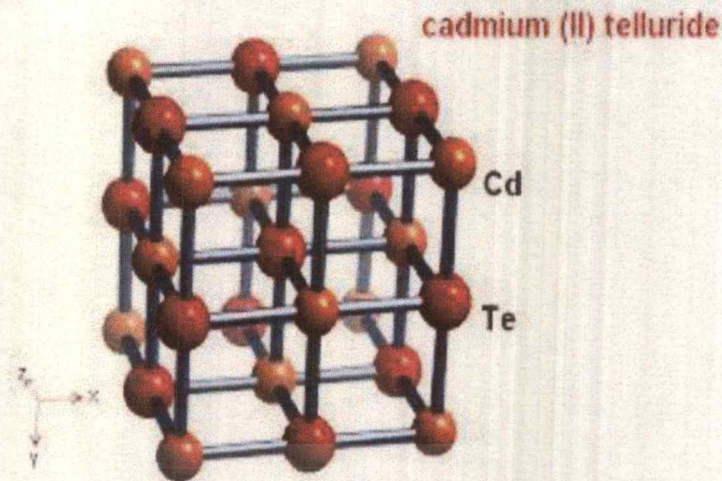
โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $5/8$  ตามแนวแกน  $c$  ( $c$ -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอนและมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB...หรือ 0101... ส่วนโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ CdS, ZnS, CdSe เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์

### 2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blend structure)

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 2-6 มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.3

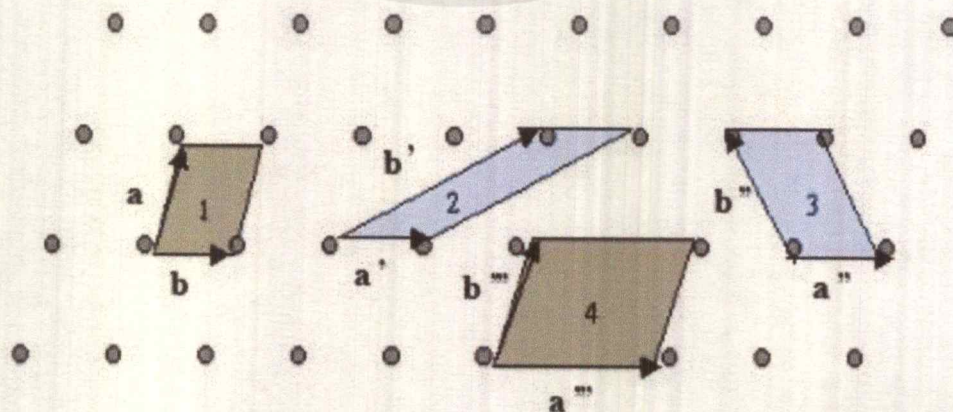


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

### 2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่ และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงสร้างหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.4 ในระบบสองมิติ พารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองทั้งนี้ ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ


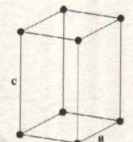
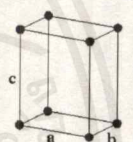
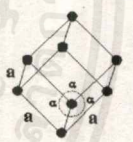
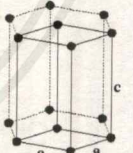
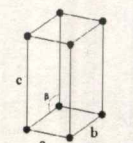
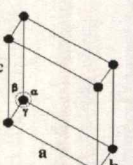
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของโครงผลึก	มุม (องศา)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a=b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60 องศา (60° rhombus)	$a=b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์มุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่านี้จะกล่าวถึง ตำแหน่ง ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

### 2.3.1 การระบุตำแหน่ง

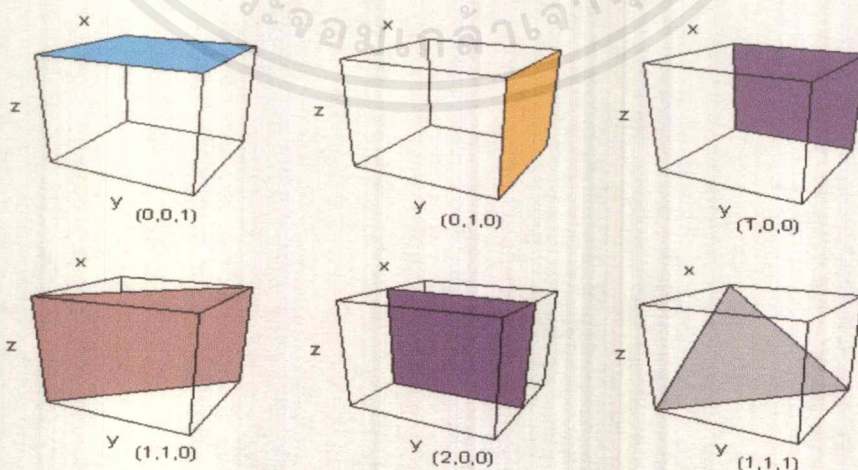
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่าตัวอย่าง เช่น จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x = 1, y = 2$  และ  $z = 3$

### 2.3.2 การระบุทิศทาง

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

### 2.3.3. การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบจะใช้อักษร  $(hkl)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า  $(hkl)$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิงและตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.5 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบนแกนผลึก	ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$	(010)
-1, 1, 1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$	( $\bar{1}$ 11)
-1, -1, -1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$	( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )
0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.25}$	(224)
0.5, 0.5, $\infty$	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

#### 2.4 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจน เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

##### 2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

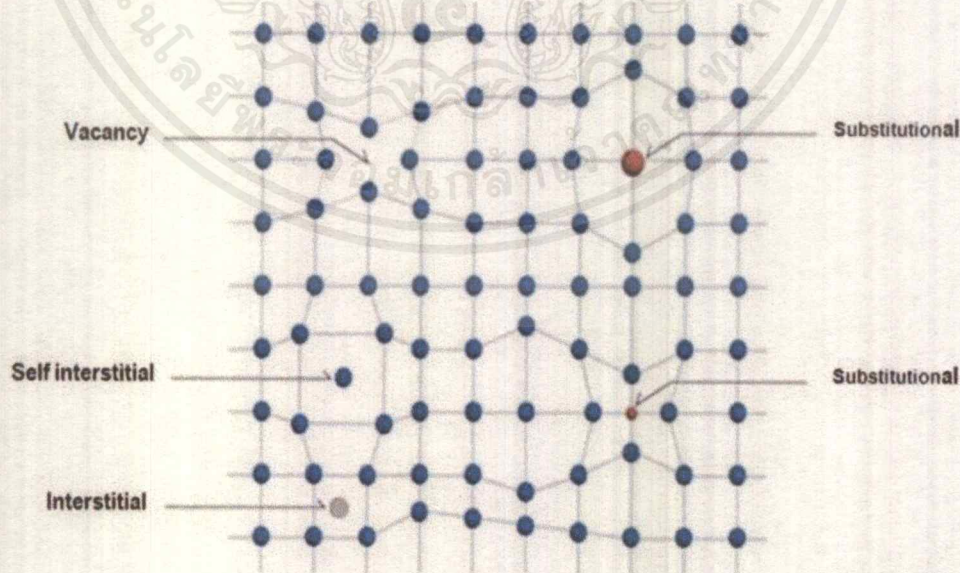
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่ง

ของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณที่ผิวหน้าของสารจะเรียกว่าข้อบกพร่องโครงผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)

2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

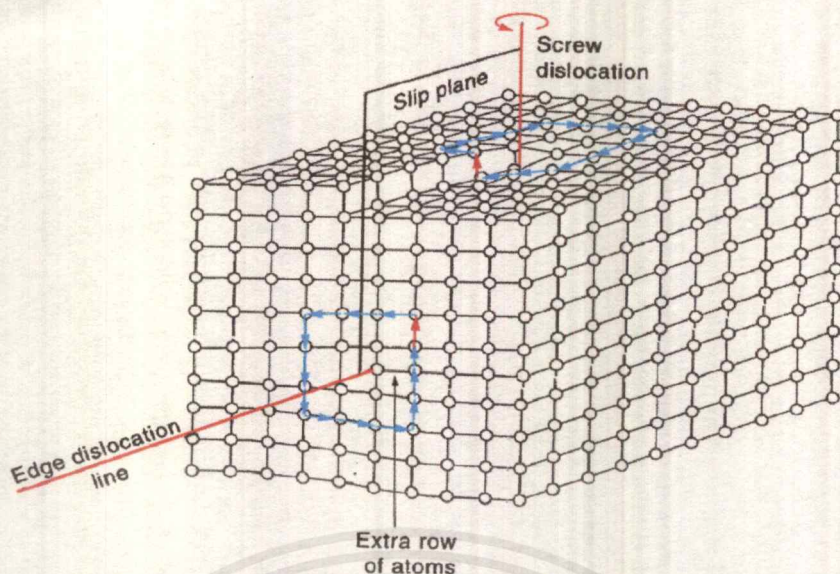
#### 2.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป ซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชัน อาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) และ ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.7



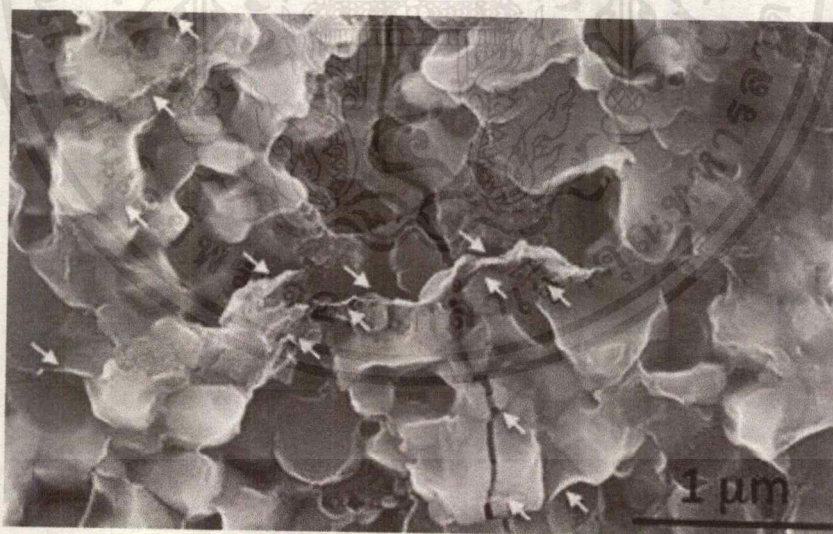
รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

#### 2.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็น สามกลุ่มใหญ่ๆ คือ การเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกรน (grain and grain boundaries) ขอบกพร่องผลึกชนิดนี้มักอาจจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกันและมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันว่าขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ

## 2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยว หรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

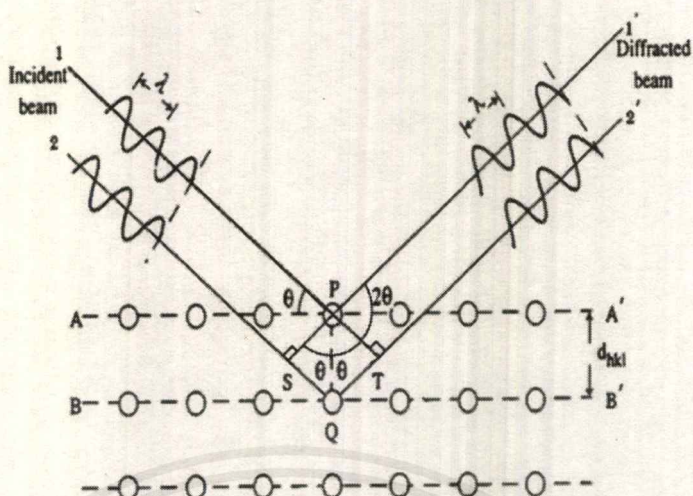
เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

$n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ  $2\theta$  ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

### 2.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

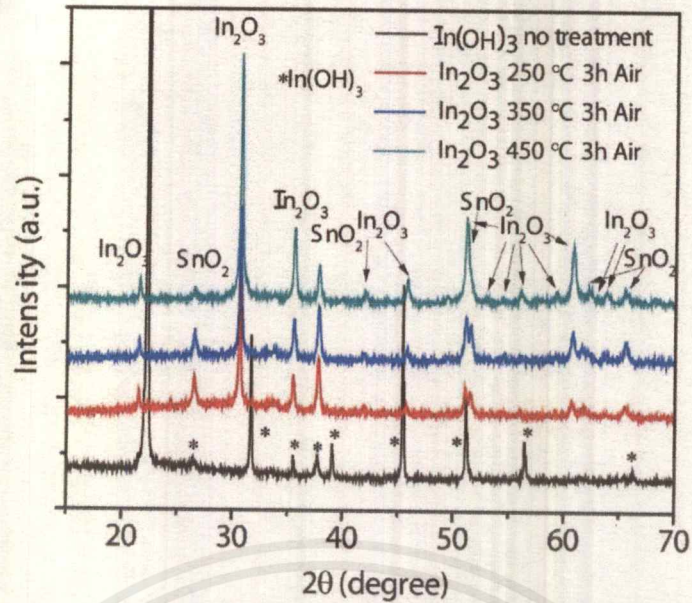
ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้ สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2) และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

$h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



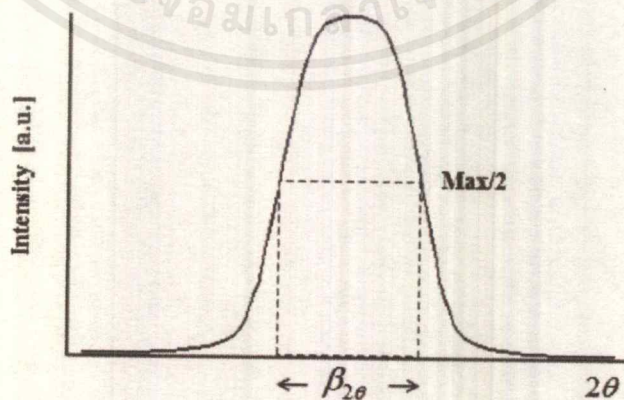
ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.5.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในภาพที่ 2.11 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \tag{2.4}$$

- เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
- K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
- $\beta_{2\theta}$  คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ ความเข้มสูงสุด

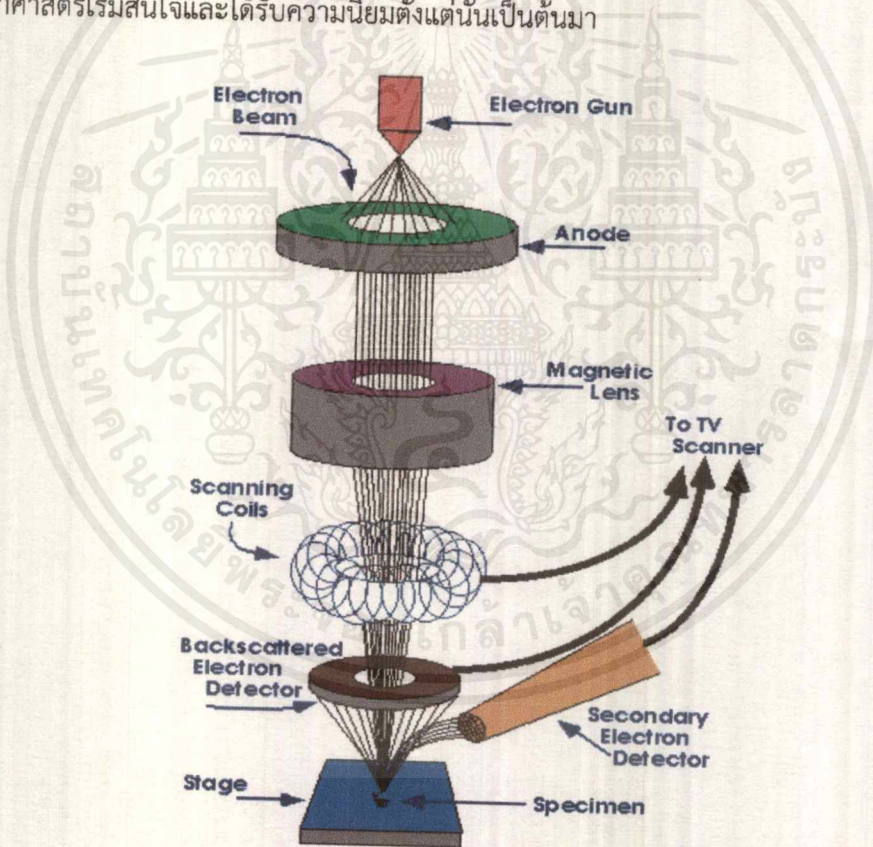


ภาพที่ 2.11 ค่า  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

## 2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทำงาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีอำนาจแจกแจง (resolution) ต่ำ ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพร่ามัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1- 40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสภาพลำอิเล็กตรอนจะกราดไปยังพื้นผิวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอแคโทด (cathode ray tube : CRT)

### ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวตรวจอิเล็กตรอน (electron probe diameter :  $d_p$ )
2. กระแสตัวตรวจอิเล็กตรอน (electron probe current :  $i_p$ )
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence :  $\alpha_p$ )

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section ด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผันตรงกับ  $i_p$  แต่ผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $i_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

### อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

#### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron : BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

#### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ออเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องหรือเบรมสตราลุง (continuum X-rays or Bremsstrahlung) การเปล่งแสงแสงแคโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิดโดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะ

ของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อินจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปในเรื่องของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีค่ามากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลงหมายถึงสัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของ สารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่างโอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบีใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี  $E_0 > E_1$ )

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.5)$$

เมื่อ	$E_0$	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา
	$E_1$	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา
	$h$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) = $6.625 \times 10^{-34}$ จูล • วินาที
	$\nu$	คือ	ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของ

อิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอนปรูมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) จากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอ็กซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

### ออเจอิเล็กตรอน

ออเจอิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปรูมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใด ๆ รังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจอิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

### การเรืองแสงแคโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปรูมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้นี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT

ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าล้างขยายของภาพได้ดังนี้

กำลังขยาย = พื้นบน CRT / พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน

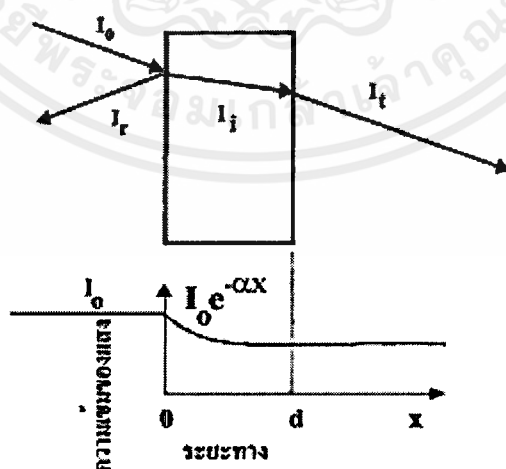
ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

## 2.7 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบ พลังงาน (energy gap:  $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.7.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	$I_r$	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	$I_t$	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	$I_i$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	$R$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
	$T$	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	$d$	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  มีนิยามดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.6)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

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

ถ้าแสงตกกระทบบนฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า  $R$  มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

$$T \approx e^{-\alpha d}$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.8)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรง คือ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.9)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียง คือ

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.10)$$

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

### 2.7.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.13

โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.11)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.12)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.13)$$

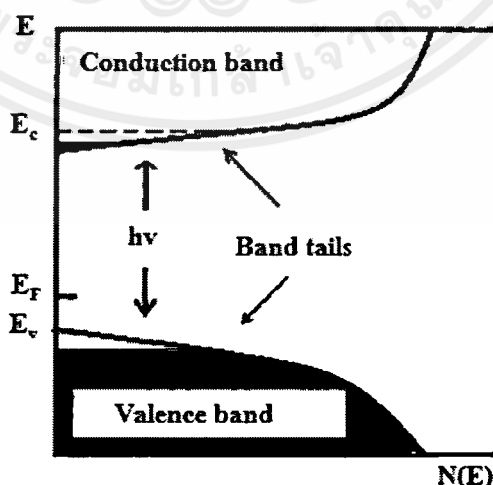
เมื่อ n คือ จำนวนจริง

K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$

### 2.7.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้ จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออก โดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำ ซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำมีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่ง เออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\alpha_0$  และ  $E_0$  คือ เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

$k_B$  คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

$\sigma$  คือ ความชัน (Steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

## 2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย,2550; งามนิตย์,2551; ฐิตินัย,2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่ มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.8.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระ ตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.15)

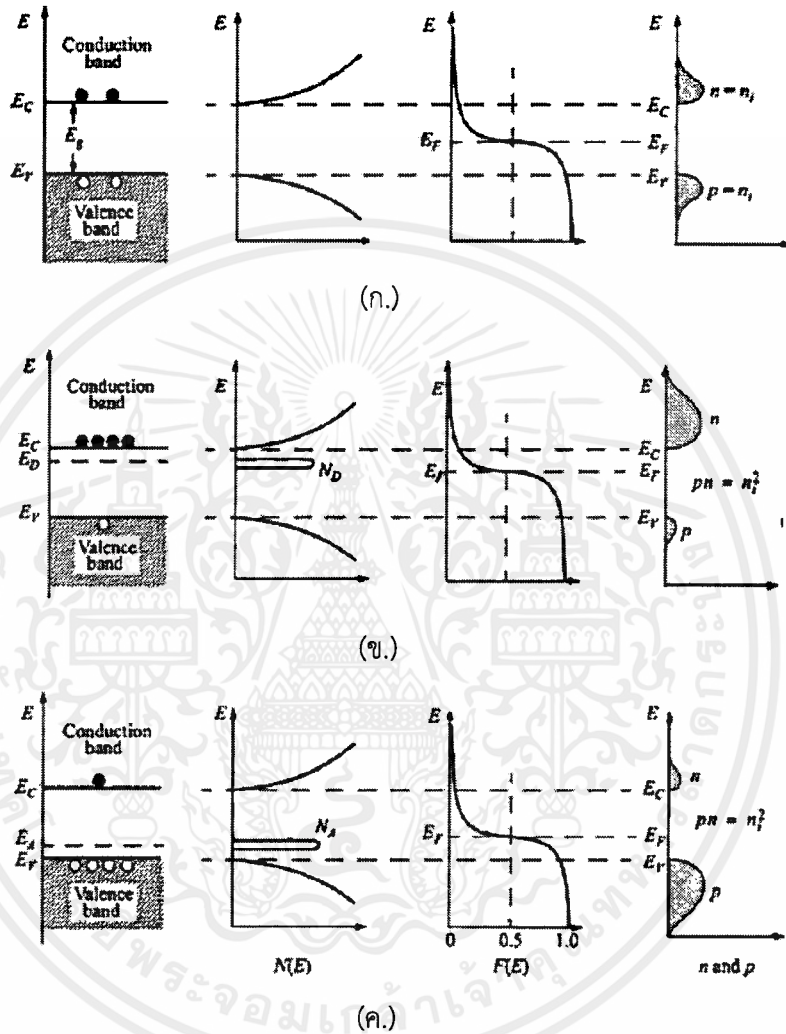
$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน  $E$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- k คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant) =  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน
- T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิตี

แรกและความหนาแน่นของพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

- ก. สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิค
- ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

## 2.8.2 สภาพนำไฟฟ้า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity :  $\sigma$ ) คือ อัตราส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density :  $J$ ) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field :  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปสมการ

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

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

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity:  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน  $V$  และเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า  $J = \frac{I}{V}$  และ  $E = \frac{V}{l}$  สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{l} \right) \quad (2.18)$$

$$V = \left( \frac{l}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.19)$$

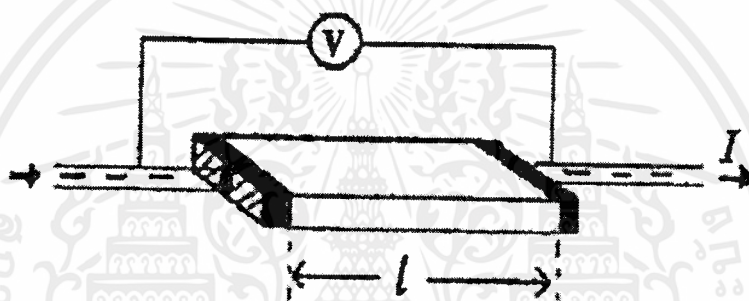
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

## 2.8.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

### 2.8.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.16 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

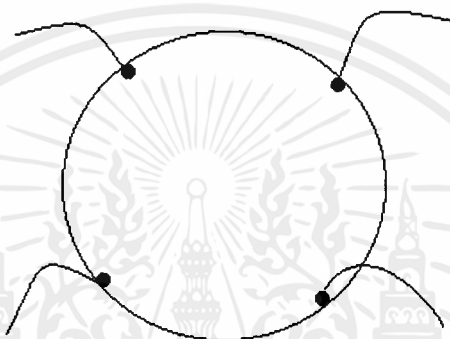
$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.21)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัด

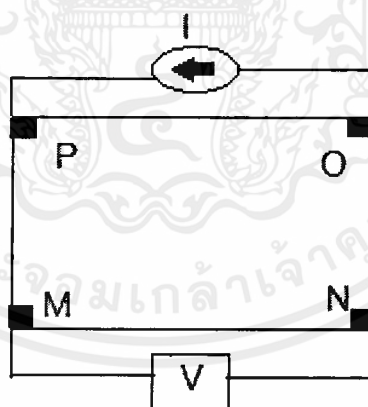
ศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

### 2.8.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.18 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.22)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.23)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.23)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

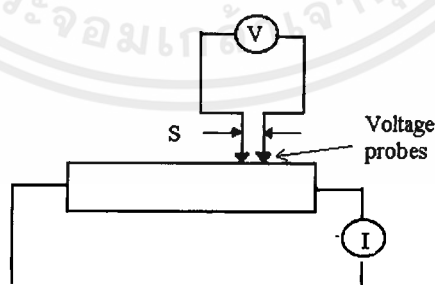
$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.25)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.26)$$

### 2.8.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

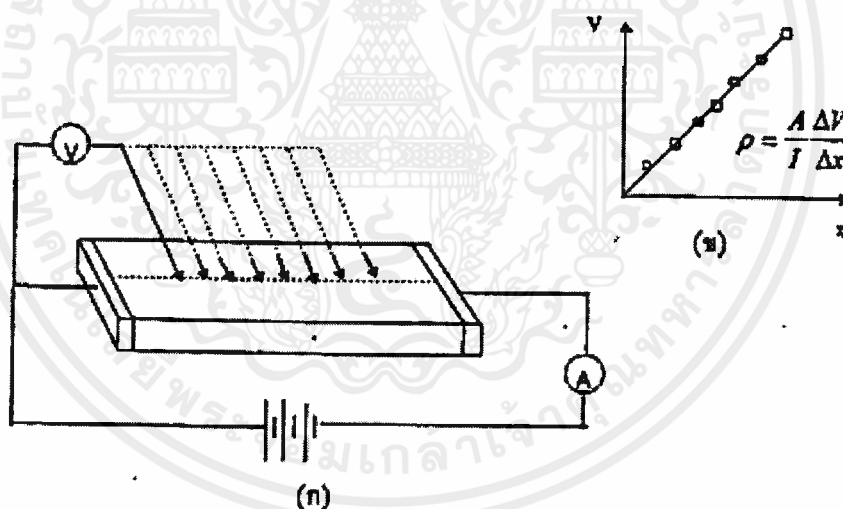
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.19 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเลขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง

จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำกรวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential line) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $\frac{l}{A} > 3$  เมื่อ  $l$  คือระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการคือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทาง หรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงขั้วหนึ่งไว้ และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 2.20 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.20 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

#### 2.8.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.27)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.28)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล  
 $\mu_e$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

นั่นคือ หากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะช่วยให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.30)$$

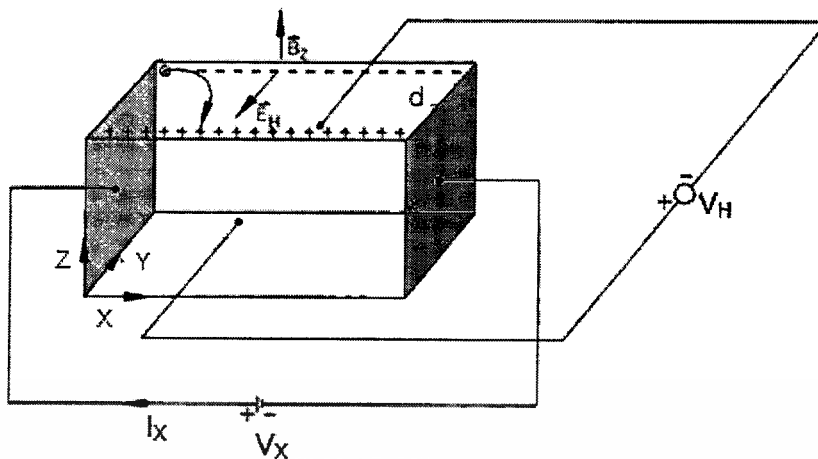
กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ค่าความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.31)$$

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะ ได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต (Edwin Herbert Hall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $V_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.32)

จาก 
$$I = nqvA \quad (2.32)$$

ดังนั้น 
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.33)$$

จากกฎของโอห์ม 
$$V = IR \quad (2.34)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.35)$$

จากรูปที่ 2.19 
$$A = w \cdot d \quad (2.36)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.33) และ (2.34) และ (2.36)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.37)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือ เกิด

แรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall Voltage :  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มพาหะข้างมากไหลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.38)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสถานะสมดุลเชิงความร้อน หรือสถานะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ  $x$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.39)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.39) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.41)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.42)$$

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่า เป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วยเราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.43)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.45)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.46)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.47)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.48)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยาม ค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.49)$$

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนส์สัมประสิทธิ์ฮอลล์ แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B=\infty)} \quad (2.50)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.44) และ (2.45) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.51)$$

หรือจากสมการที่ (2.43) และ (2.48)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.52)$$

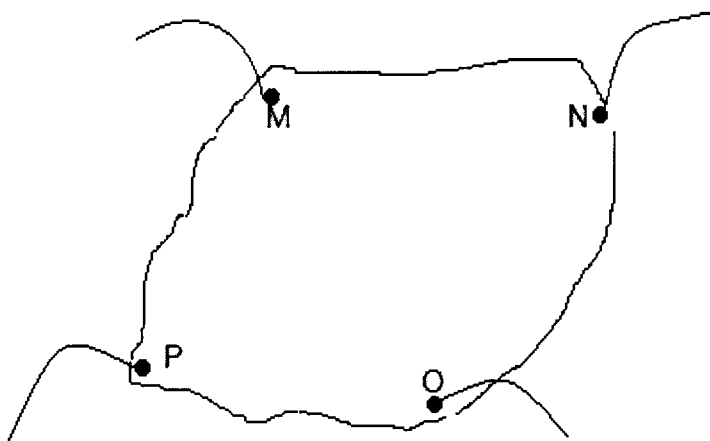
ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ  $r$  ซึ่ง มีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไป เพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะ ที่คำนวณจาก ปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

### 2.8.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เทคนิคนี้ได้รับแวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลการพัฒนาขึ้นมา จากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) ภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.22 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทแยงมุมชี้  $M, O$  และวัดความต่างศักย์จากชี้  $N, P$

นิยาม 
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.53)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพอร์ คือ

$$R_H = \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.54)$$

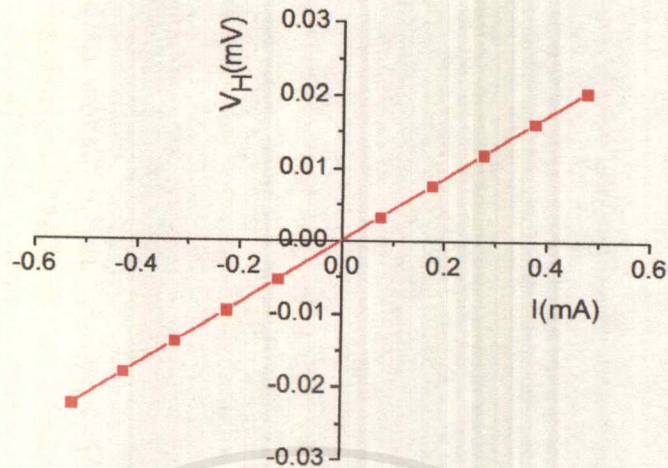
เมื่อ  $V_H$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า  $V_{NP}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

$d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

$B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.54) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.55)$$



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลอง เราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.23 โดยที่ ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น  $\frac{V_H}{I}$  สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.56)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H \quad (2.57)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

## 2.9 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้นเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่ง ซึ่งจะต้องเตรียมในระบบสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

### 2.9.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.58)$$

เมื่อ  $\Phi_e$  คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

$P_e$  คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์

$M$  คือ มวลโมเลกุล

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate:  $\Gamma_e$ ) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.59)$$

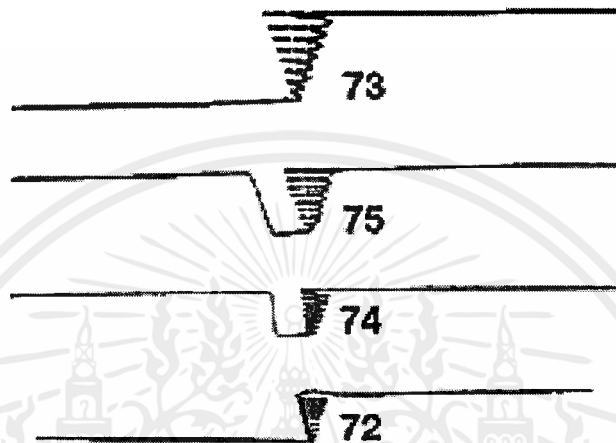
ที่ความดัน  $10^{-2}$  ทอร์ ค่าของ  $\Gamma_e$  ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

### 2.9.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการจัดเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

### 2.9.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

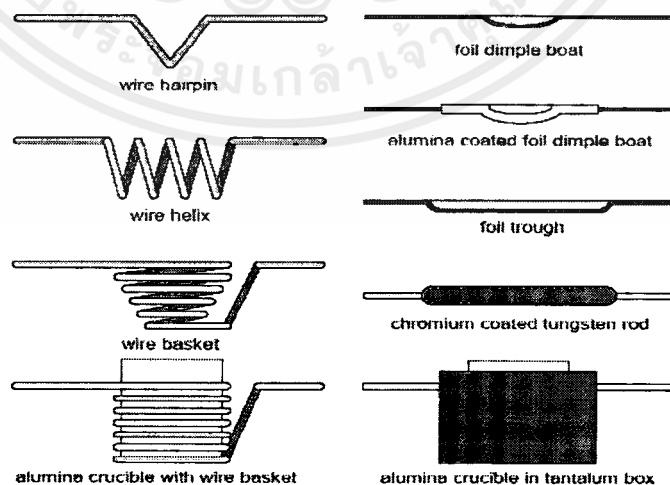
แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบเป็นเกลียว ทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้าๆ ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง



รูปที่ 2.24 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

### 2.9.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทั้งสแตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัม จะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 2.25 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.3 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.60)$$

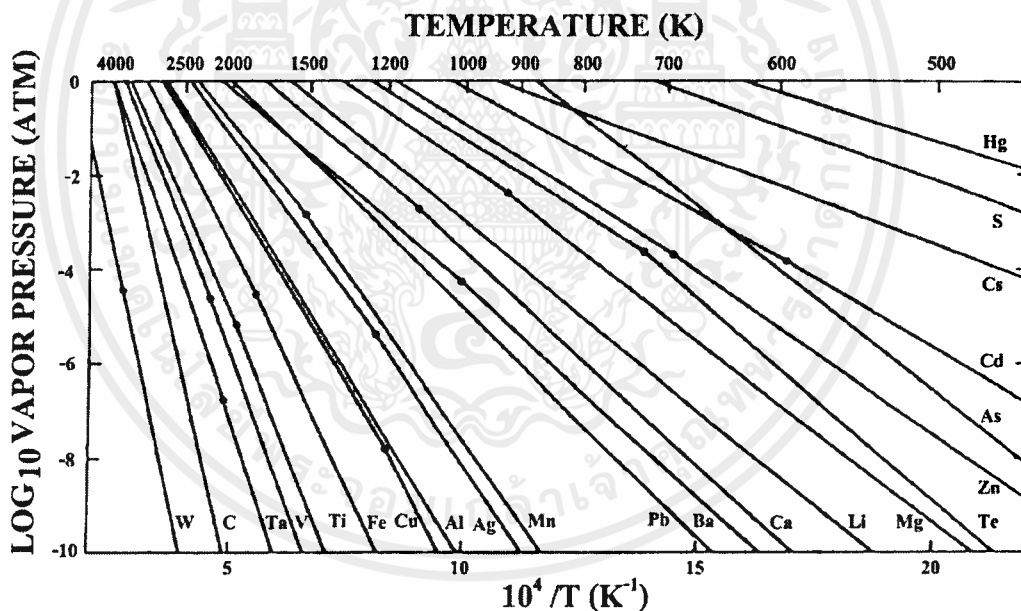
ถ้าให้  $\Delta V$  มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ ( $V_v$ ) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว  $V_v$  จะมีค่าเป็น  $RT/P$  ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.60) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.61)$$

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

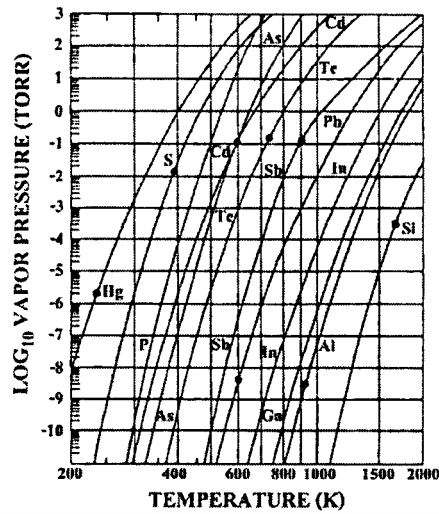
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp -\frac{\Delta H_e}{RT} \quad (2.62)$$

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



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

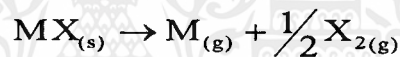
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

#### 2.9.4 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง หรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้



โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น  $\text{MX}_{(s)}$  เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$\text{MX}(s \text{ หรือ } l) \rightarrow \text{MX}(g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, $\text{CaF}_2$ , $\text{MgF}_2$
การแยกส่วนประกอบ	$\text{MX}(s) \rightarrow \text{M}(s) + \frac{1}{2} \text{X}_2(g)$ $\text{MX}(s) \rightarrow \text{M}(l) + \frac{1}{n} \text{X}_n(g)$	$\text{Ag}_2\text{S}$ , $\text{Ag}_2\text{Se}$ สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$\text{MX}(s) \rightarrow \text{M}(g) + \frac{1}{2} \text{X}_2(g)$	
(ก) ซาลโคจีไนต์	X = S, Se, Te	CdS, CdTe, CdSe
(ข) ออกไซด์	$\text{MO}_2(s) \rightarrow \text{MO}(s) + \frac{1}{2} \text{O}_2(g)$	$\text{SiO}_2$ , $\text{GeO}_2$ , $\text{TiO}_2$ , $\text{SnO}_2$ , $\text{ZrO}_2$

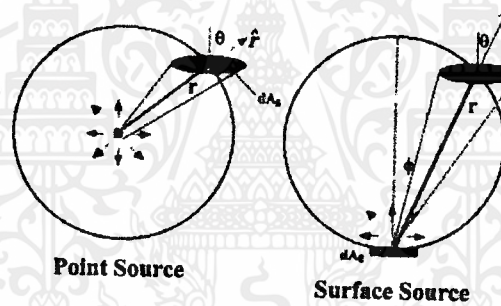
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M = โลหะ X = อโลหะ

### 2.9.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหล ของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass:  $\bar{M}_e$ ) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.28 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่  $A_e$  คือ พื้นผิวของสารที่ใช้ระเหยปริมาณของมวล  $d\bar{M}_s$  ที่ตกลงบนฐานรองรับเป็นพื้นที่  $dA_s$  จากรูปที่ 2.28  $dA_c$  คือ พื้นผิวของทรงกลม จะได้ว่า  $dA_c = dA_s \cos \theta$  ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left( \frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi^2} \right) \quad (2.64)$$

เมื่อ  $r$  คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรองรับ

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย  $dA_c$  โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด  $\phi$  และอยู่ห่างเป็นระยะ  $r$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c \quad (2.65)$$

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

$$\bar{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left( \frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi \quad (2.66)$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.67)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

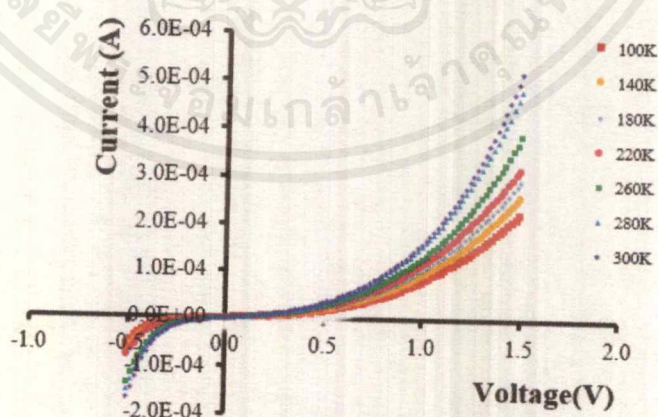
$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.68)$$

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

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฐิตินัยและงานนิตย [ ] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธู์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังปรากฏในรูปที่ 2.45 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) ประมาณ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ CuO และของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ  $10^{16}$  และ  $10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่ออวิวิพพันธู์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ  $p^+-n$  ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อขอตต์กีโดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS

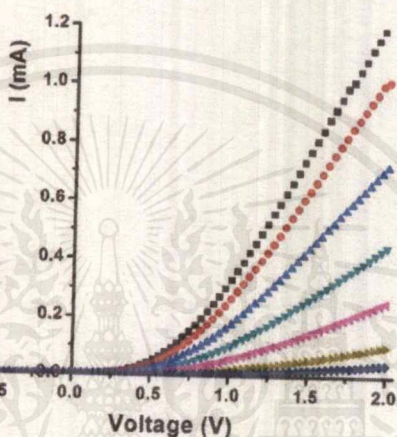
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่ออวิวิพพันธู์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่ออวิวิพพันธู์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซิโพเนนเชียล การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแพกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์



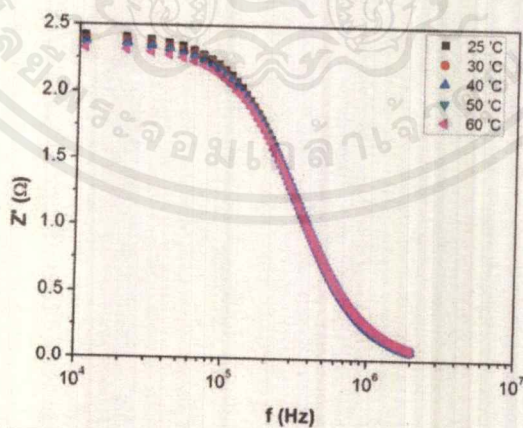
รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิพพันธู์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

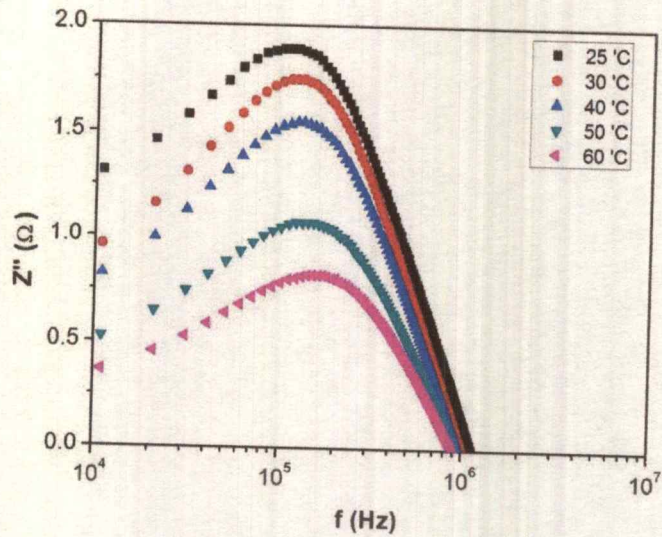
จากนั้นได้มีการรายงานสมบัติทางไฟฟ้า ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และฟิล์มบาง CuO เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [ ] ด้วยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10 - 300 เคลวิน และวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิในช่วง 25 - 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกัปดักพาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS กับ p-CuO



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

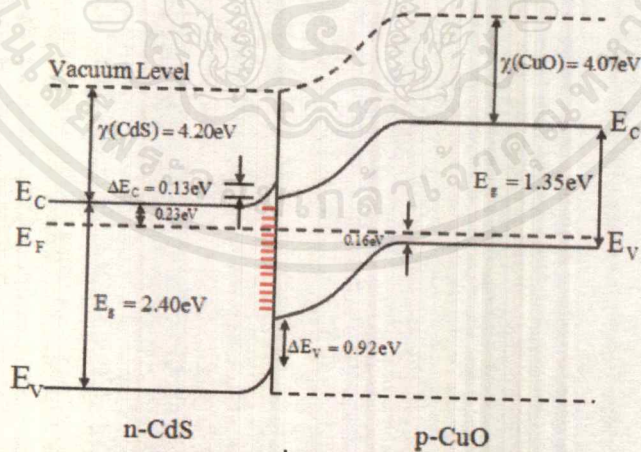


รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากข้อมูลการทดลองที่ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และพลังงานกระตุ้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาผลของการเจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซีลีเนียมซัลไฟด์ ด้วยเศษส่วนโดยโมล( $x$ ) = 0-0.05 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยจะมีการแอนนัลภายในระบบเป็นเวลานาน 30 นาที พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกของเกรนของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดความต้านทานแผ่นและปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย (งานนิพนธ์, 2545; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2551; งานนิพนธ์, 2551; นันธิดา, 2550)

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

- สารตั้งต้นที่ใช้ประกอบไปด้วย
  - อะซีโตน ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
  - เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )
  - น้ำปลอดประจุ (DI water)
- แผ่นกระจกสไลด์  $12 \times 25$  มิลลิเมตร
- ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
- อ่างอัลตราโซนิก

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ ) $_{1-x}$ ( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) $_x$

$$(0 \leq x \leq 0.05)$$

- สารตั้งต้น แคดเมียมซัลไฟด์( $\text{CdS}$ ),แคดเมียมซีลีไนด์( $\text{CdSe}$ ),อินเดียมซัลไฟด์( $\text{In}_2\text{S}_3$ )
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ Sartorius
- อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต
- เตาอบสาร

##### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ ) $_{1-x}$ ( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) $_x$

( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Thermal evaporation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
- อะซิโตน ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
- สำลีสำหรับการเช็ดทำความสะอาด
- สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0-0.05$  หนัก 0.3 กรัม
- ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่สามารถลดความดันได้ต่ำถึงระดับ  $3 \times 10^{-5}$  mbar

### 3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

#### 3.1.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน  $\text{CuK}\alpha$  มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



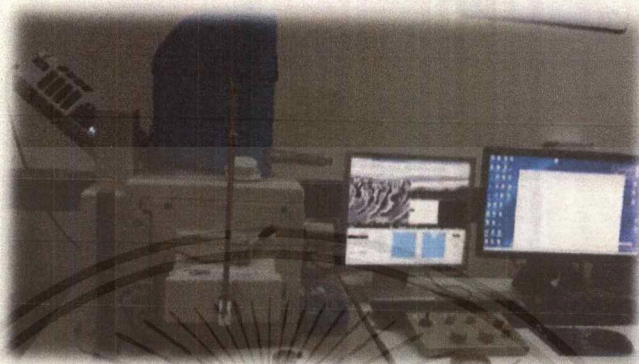
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

#### 3.1.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

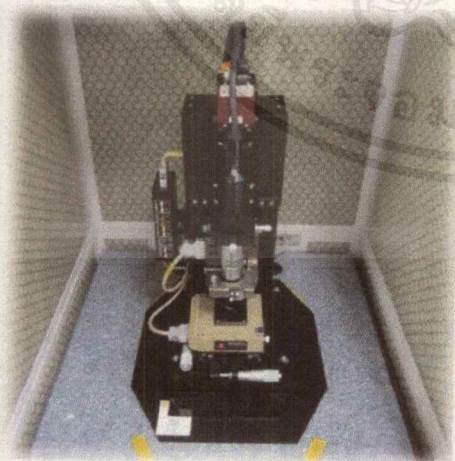
เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้



รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น FESEM-EDS (7610F)

#### 3.1.4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Park system XE 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์  
ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นใช้เครื่องสเปกโตร  
โฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ hitachi รุ่น U-2900 ความยาวคลื่นแสงในช่วง 190-1100 นาโนเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ hitachi รุ่น U-2900

3.1.4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางโดยใช้เครื่องวิเคราะห์  
หาค่าประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด ในการศึกษาโครงสร้าง  
ของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นใช้เครื่องวิเคราะห์หาค่าประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความ  
ยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด(Fourier Transform Infrared Spectrometer [FTIR] )



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ยี่ห้อ  
Thermo รุ่น Nicolet 6700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- เครื่อง FLUKE 8808A (5-1/2 DIGIT MULTIMETER)
- สนามแม่เหล็ก 4,600 เกาส์
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610



รูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

### 3.1.4.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำ

- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 610
- หม้อ ยี่ห้อ ZEBRA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร
- เครื่องวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Thermal evaporation) (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2551)

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้ง เป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

### 3.2.2 การเตรียมสาร $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ )

•คำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ

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

$\text{S} = 32.06 \text{ g/mol}$

$\text{Se} = 78.96 \text{ g/mol}$

$\text{In} = 114.82 \text{ g/mol}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลโมเลกุลของ  $\text{CdS} = 144.46 \text{ g/mol}$

$\text{CdSe} = 191.36 \text{ g/mol}$

$\text{In}_2\text{S}_3 = 325.82 \text{ g/mol}$

กรณีไม่เจือสาร



มวลโมเลกุลของผลึก

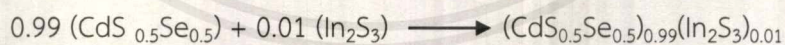
$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_1 &= 1[(0.5 \times 144.46) + (0.5 \times 191.36)] \\ &= 1(167.91) \\ &= 167.91 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผลึก  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_1$  จำนวน 1 g

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(1)(0.5)(144.46)}{167.91} \\ &= 0.4302 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(1)(0.5)(191.36)}{167.91} \\ &= 0.5698 \text{ g} \end{aligned}$$

กรณีเจือสาร 0.01



$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} &= 0.99[(0.5 \times 144.46) + (0.5 \times 191.36)] + (0.01)(325.82) \\ &= 0.99(167.91) + 3.2582 \\ &= 166.2309 + 3.2582 \\ &= 169.4891 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผลึก  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.99)(0.5)(144.46)}{169.4891} \\ &= 0.4291 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(0.99)(0.5)(191.36)}{169.4891} \\ &= 0.5589 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.01)(325.82)}{169.4891} \\ &= 0.0192 \text{ g} \end{aligned}$$

กรณีเอกสาร 0.02



$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.98}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.02} &= 0.98[(0.5 \times 144.46) + (0.5 \times 191.36)] + (0.02)(325.82) \\ &= 0.98(167.91) + 6.5164 \\ &= 164.5518 + 6.5164 \\ &= 171.0682 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.98}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.02}$  จำนวน 1 g

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.98)(0.5)(144.46)}{171.0682} \\ &= 0.4138 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(0.98)(0.5)(191.36)}{171.0682} \\ &= 0.5481 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.02)(325.82)}{171.0682} \\ &= 0.0381 \text{ g} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีเอกสาร 0.03



$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.97}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.03} &= 0.97[(0.5 \times 144.46) + (0.5 \times 191.36)] + (0.03)(325.82) \\ &= 0.97(167.91) + 9.7746 \\ &= 162.8727 + 9.7746 \\ &= 172.6473 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.97}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.03}$  จำนวน 1 g

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.97)(0.5)(144.46)}{172.6473} \\ &= 0.4058 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(0.97)(0.5)(191.36)}{172.6473} \\ &= 0.5376 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.03)(325.82)}{172.6473} \\ &= 0.0566 \text{ g} \end{aligned}$$

## กรณีเอกสาร 0.04



$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.96}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.04} &= 0.96[(0.5 \times 144.46) + (0.5 \times 191.36)] + (0.04)(325.82) \\ &= 0.96(167.91) + 13.0328 \\ &= 161.1936 + 13.0328 \\ &= 174.2264 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.96}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.04}$  จำนวน 1 g

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.96)(0.5)(144.46)}{174.2264} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.3980 \text{ g}$$

$$\text{จะต้องใช้ CdSe} = \frac{(0.96)(0.5)(191.36)}{174.2264}$$

$$= 0.5272 \text{ g}$$

$$\text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 = \frac{(0.04)(325.82)}{174.2264}$$

$$= 0.0748 \text{ g}$$

กรณีเอกสาร 0.05



$$(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.95}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.05} = 0.95[(0.5 \times 144.46) + (0.5 \times 191.36)] + (0.05)(325.82)$$

$$= 0.95(167.91) + 16.2910$$

$$= 159.5145 + 16.2910$$

$$= 175.8055 \text{ g/mol}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{0.95}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.05}$  จำนวน 1 g

$$\text{จะต้องใช้ CdS} = \frac{(0.95)(0.5)(144.46)}{175.8055}$$

$$= 0.3903 \text{ g}$$

$$\text{จะต้องใช้ CdSe} = \frac{(0.95)(0.5)(191.36)}{175.8055}$$

$$= 0.5170 \text{ g}$$

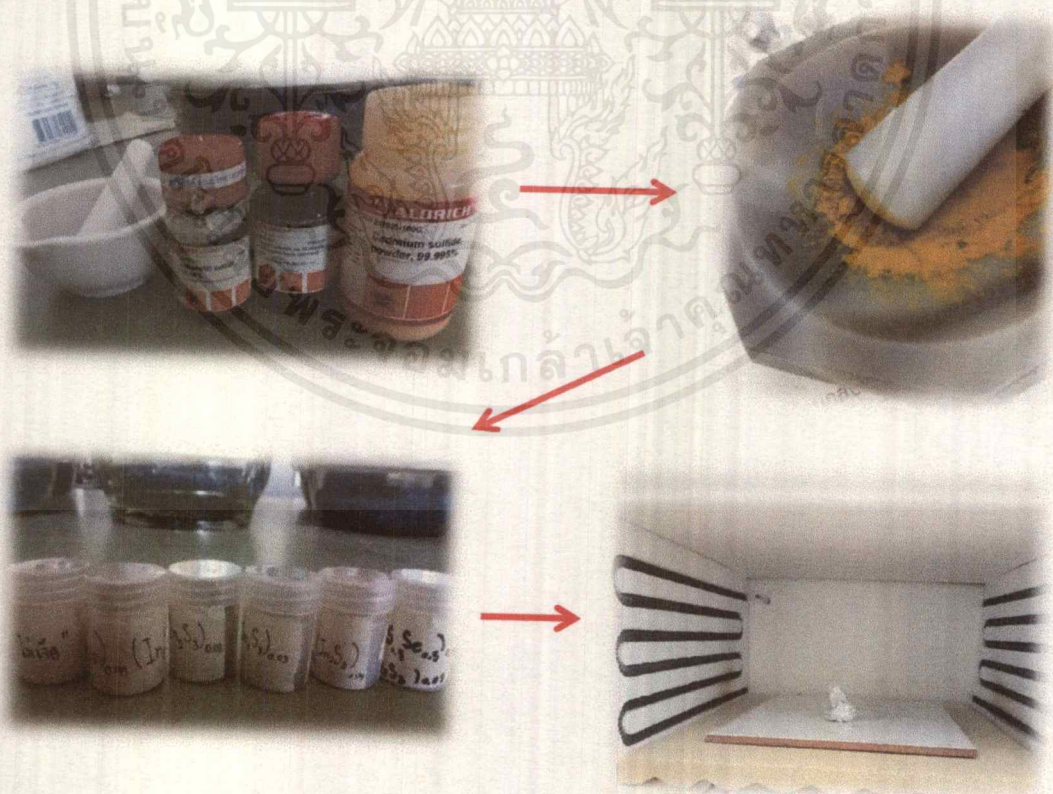
$$\text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 = \frac{(0.05)(325.82)}{175.8055}$$

$$= 0.0927 \text{ g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_x(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Starting Material Content (g)			Substrate Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
	CdS	CdSe	$\text{In}_2\text{S}_3$	
0.00	0.4302	0.5698		100
0.01	0.4219	0.5589	0.0192	100
0.02	0.4138	0.5481	0.0381	100
0.03	0.4058	0.5376	0.0566	100
0.04	0.3980	0.5272	0.0748	100
0.05	0.3903	0.5170	0.0927	100



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการเตรียมผงผลึกสารตั้งต้น  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

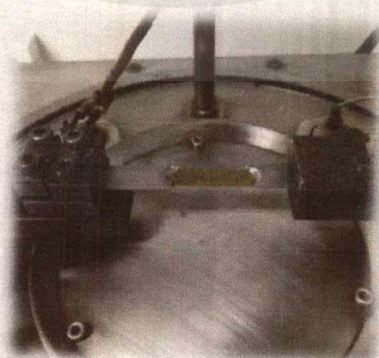
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2551; งามนิตย์, 2551; นันธิตา, 2550)

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซีลีเนียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.10 แสดงระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

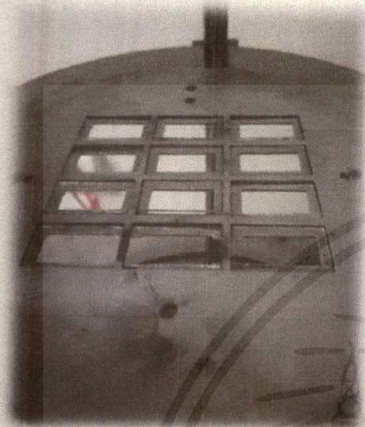
1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คาบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตน
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. นำสารแคดเมียมซีลีเนียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0-0.05$  ซึ่งมีปริมาณ 0.3 กรัม ที่นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาที บรรจุใส่ลงในเบ้าภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทังสเตน



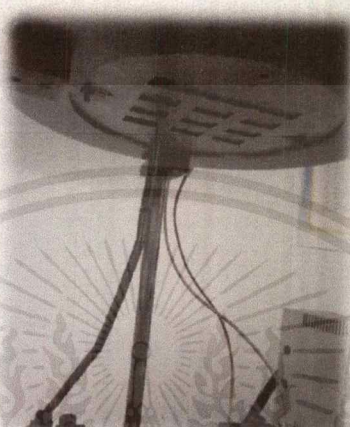
รูปที่ 3.11 แสดงการบรรจุสารตั้งต้นใส่ลงในเบ้าภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทังสเตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ทำการเตรียมไว้แล้วมาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอะลูมิเนียมเจาะไว้เป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ และนำเทอร์โมคัปเปิลมาวัดอุณหภูมิตรงแผ่นกระจกสไลด์ 1 แผ่น แล้วนำแผ่นฮีตเตอร์วางทับลงบนหน้ากากที่มีแผ่นกระจกสไลด์อยู่ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย



(ก)



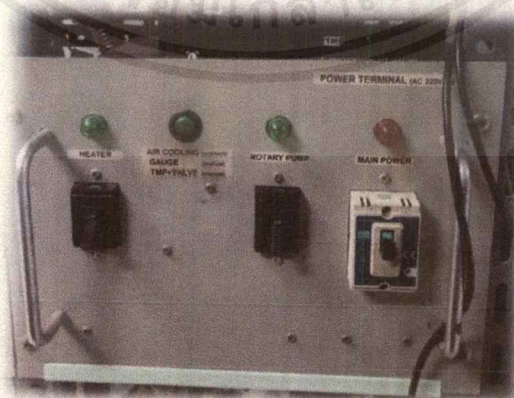
(ข)



(ค)

- รูปที่ 3.12 (ก) แสดงแผ่นกระจกสไลด์ที่ทำการเตรียมไว้แล้วมาวางลงบนหน้ากาก(mask)  
 (ข) แสดงเทอร์โมคัปเปิลมาวัดอุณหภูมิตรงแผ่นกระจกสไลด์ 1 แผ่น  
 (ค) แสดงนำแผ่นฮีตเตอร์วางทับลงบนหน้ากากที่มีแผ่นกระจกสไลด์อยู่

5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสูบล้อยอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าอยู่ตำแหน่งที่ผิดเรียบร้อย (ปิดล้อวาล์ว)  
 6. ทำการเปิดสวิตช์ Main Power, Rotary Pump, Air Cooling Gauge TMP+VALVE



รูปที่ 3.13 แสดงสวิตช์ Main Power, Rotary Pump, Air Cooling Gauge TMP+VALVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

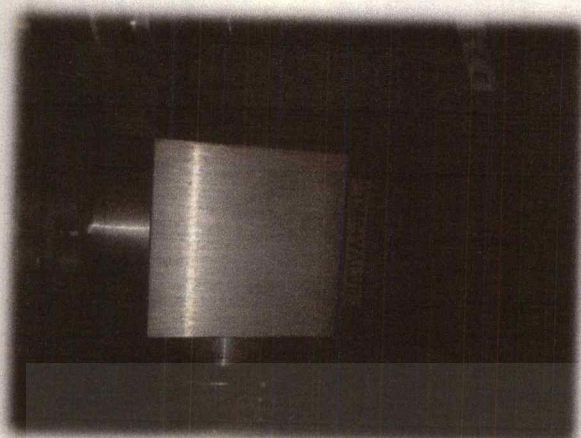
7. ทำการเปิดสวิตช์เครื่อง Rotary Pump หมุนเปิดวาล์วสุบอากาศออก จนได้ความดันประมาณ  $9.3-9.4 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์
8. ทำการเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันช่วง  $3-4 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ แล้วจึงทำการเปิดสวิตช์ฮีตเตอร์ ตั้งอุณหภูมิประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส รอจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
9. ทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆจนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 100 แอมแปร์ เริ่มเห็นแสงและสารในภาชนะระเหยสาร(boat) เริ่มสั่นแล้วแช่พักสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 120-130 แอมแปร์ จนสารระเหยหมด ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที



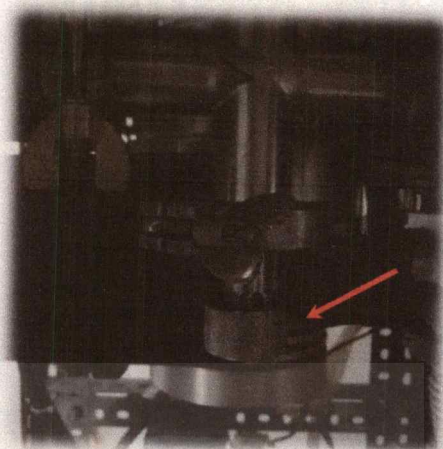
รูปที่ 3.14 (ก) แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์  
(ข) เริ่มเห็นแสงและสารในภาชนะระเหยสาร (boat) เริ่มสั่น

10. จากนั้นปิดวาล์วแอคโดยค่อยๆลดกระแสลงเรื่อยๆอย่างช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์ จากนั้นจึงทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียสต่อเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เครื่องฮีตเตอร์
11. ปิดสวิตช์ฮีตเตอร์ รอจนถึงอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการปิดปั๊มเทอร์โบแล้วรอ 20 นาที
12. ปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี จากนั้นจึงปิดสวิตช์ Air Cooling Gauge TMP+VALVE, Rotary Pump, Main Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 (ก) แสดง TMP+VALVE

(ข) วาล์วปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ

13. ตั้งปลั๊กด้านหลังเครื่องออก แล้วรอให้อุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศเท่ากับอุณหภูมิภายนอก ใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นจึงปล่อยอากาศเข้าในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ แล้วจึงนำฟิล์มบางออกมาเพื่อนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ

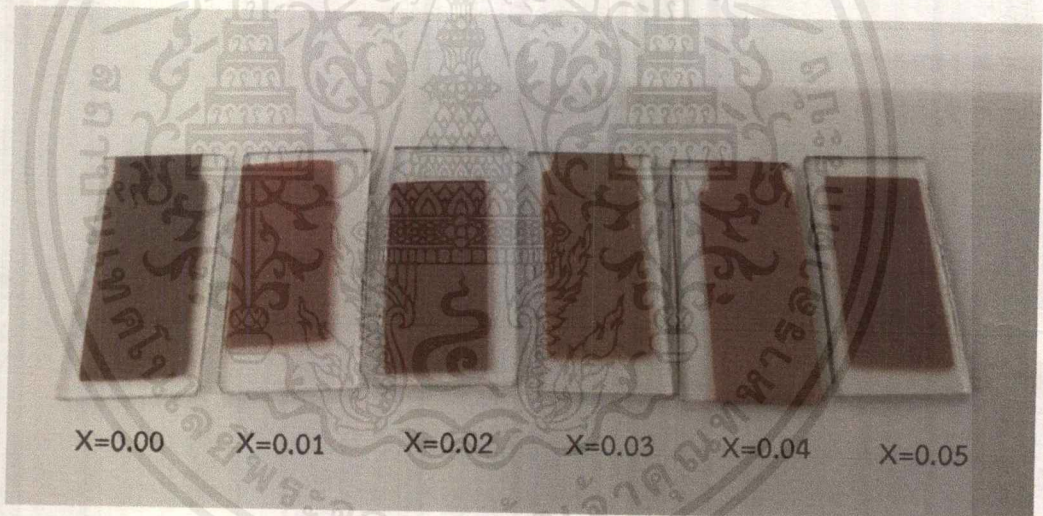
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จะมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางแสงและศึกษาสมบัติทางแสงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น ลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) มีลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางเป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

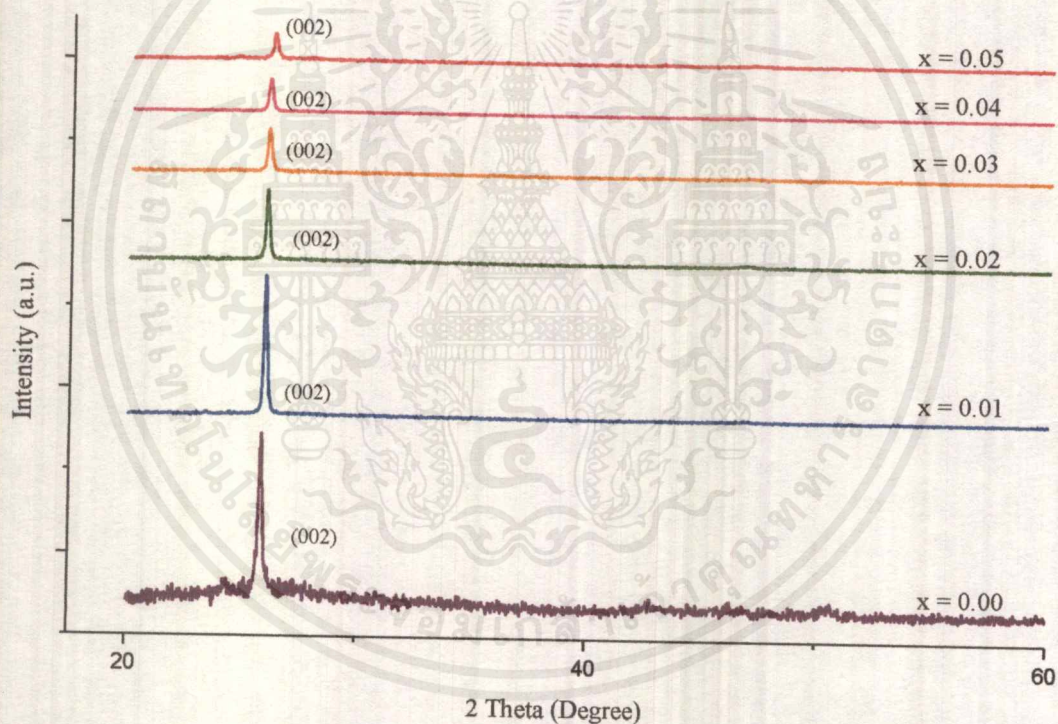
#### 4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก  $a_H$  และ  $c_H$  ที่ขึ้นกับค่าเศษส่วนโดยมวลอะตอม(x) ที่มีค่าในช่วง 0.00 ถึง 0.05 เราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CdSe

#### 4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2557; จูตินัย, 2559)



รูปที่ 4.2 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

สัมประสิทธิ์ของการจัดเรียงระนาบ (texture coefficient) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$T = \frac{\left( \frac{I_{\text{measure}}}{I_{\text{s standard}}} \right)}{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{I_{\text{measure}}}{I_{\text{s standard}}} \right)} \quad (4.1)$$

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ ) $_{1-x}$ ( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) $_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลโดยที่ค่าคงที่โครงสร้างผลึกจะมีทั้ง  $a_H$  และ  $c_H$  แต่จากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ มีระนาบ (002) เด่นเพียงระนาบเดียว ทำให้หาค่า  $a_H$  และ  $c_H$  ไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องคิดว่าโครงสร้างผลึกเสมือนเป็นคิวบิก และใช้ระนาบ (111) แทน (002) ได้จากความสัมพันธ์

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.2)$$

และ

$$\frac{1}{d} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.3)$$

เมื่อ (hkl) คือ (111) จะได้

$$\frac{1}{d_{(111)}^2} = \frac{3}{a^2} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.1)

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1.5406 \text{ \AA}}{2 \sin \theta} \quad (4.5)$$

แทนสมการที่ (4.4) ลงใน (4.3) จะได้

$$a^2 = 3d_{(111)}^2$$

$$a = \frac{\sqrt{3}(1.5406)\text{\AA}}{2 \sin \theta} \quad (4.6)$$

ค่าคงที่โครงผลึกแบบเฮกซะโกนอลกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะสัมพันธ์กันดังสมการ

$$a_H = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (4.7)$$

$$c_H = \frac{2a}{\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

ค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จะแสดงดังตารางที่ 4.1 สำหรับขนาดของเกรน (D) และความเครียดจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของ Williamson-Hall ดังนี้คือ

$$\beta \cos \theta = \frac{k\lambda}{D} + 4 \epsilon \sin \theta \quad (4.9)$$

โดยที่  $\beta$  = ความกว้างของพีคที่ระยะครึ่งหนึ่งของความสูงพีค มีหน่วยเป็น เรเดียน  
และ  $K = 1.94$  สำหรับ CdS ดังนั้น

$$D = \frac{1.94(1.5406)\text{\AA}}{\beta \cos \theta} \quad (4.10)$$

และ

$$\epsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4 \sin \theta} \quad (4.11)$$

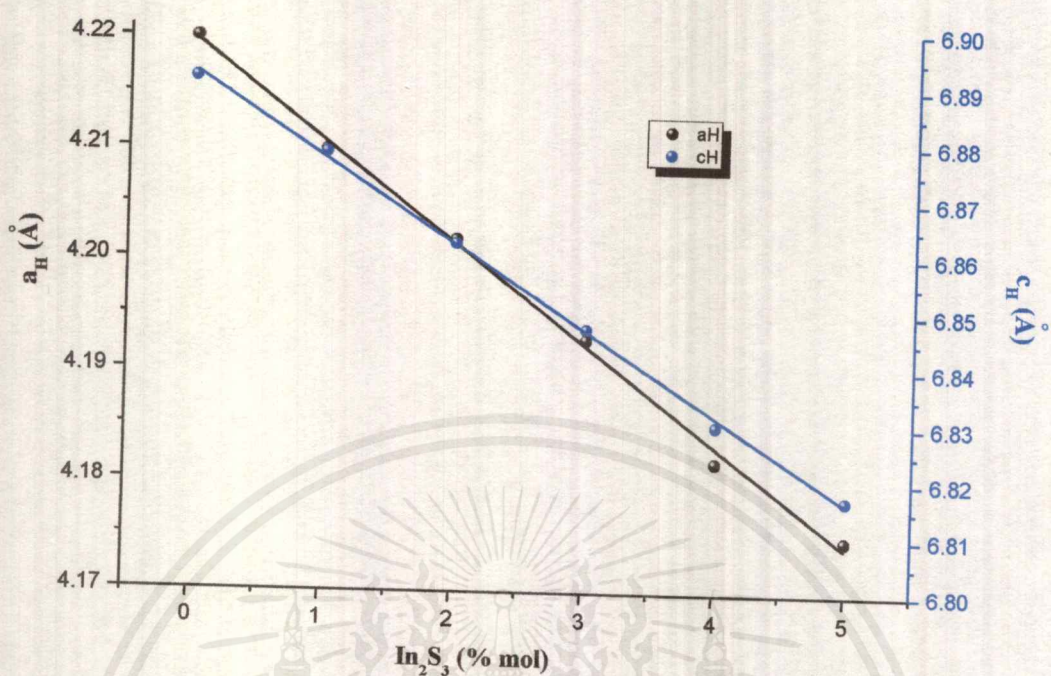
ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน

$$= \frac{1}{D^2} \quad (\text{line/m}^2) \quad (4.12)$$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดเกรน ความเครียดและความหนาแน่นของดิสโลเคชันของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

$\text{In}_2\text{S}_3$ (% mol)	$2\theta$	Lattice Constant (Å)		Grain Size (nm)	Dislocation Density (line/m <sup>2</sup> )	Strain ( $\epsilon$ )	Texture coefficient (T)
		$a_H$	$c_H$				
0	25.838	4.220	6.891	43.88	$3.72 \times 10^{15}$	$3.69 \times 10^{-3}$	3.032
1	25.926	4.206	6.868	48.93	$2.92 \times 10^{15}$	$3.30 \times 10^{-3}$	1.925
2	25.948	4.202	6.862	47.57	$3.01 \times 10^{15}$	$3.39 \times 10^{-3}$	1.882
3	26.005	4.193	6.847	45.30	$3.23 \times 10^{15}$	$3.55 \times 10^{-3}$	1.819
4	26.015	4.192	6.845	40.55	$3.91 \times 10^{15}$	$3.97 \times 10^{-3}$	1.808
5	26.122	4.175	6.817	42.80	$3.28 \times 10^{15}$	$3.74 \times 10^{-3}$	1.605

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



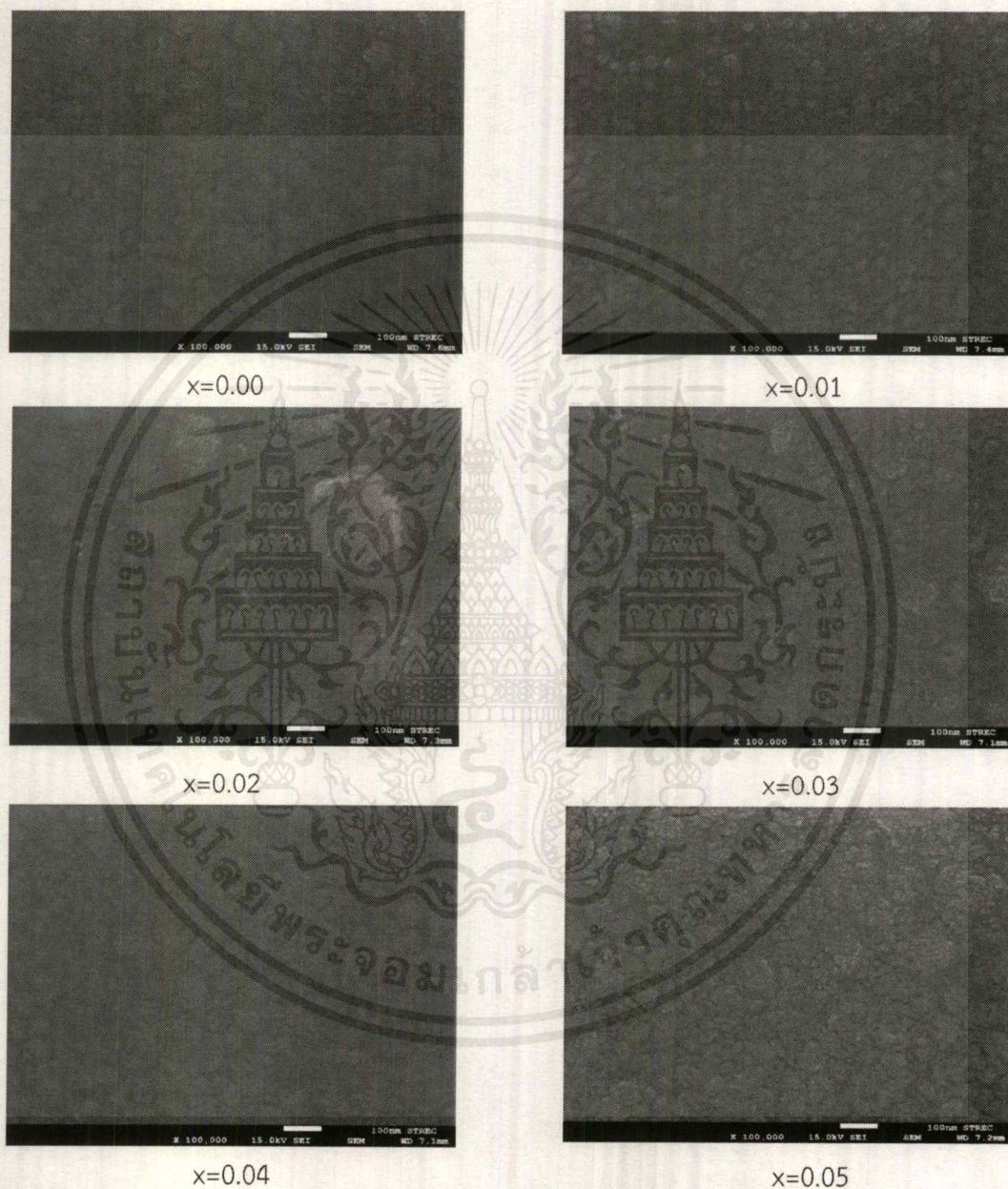
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก ( $a_H$ ,  $c_H$ ) กับปริมาณการเจือ  $\text{In}_2\text{S}_3$  (%mol) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

รูปที่ 4.3 จะได้สมการเป็น  $a_H = -0.009x + 4.220$  (4.13)

$c_H = -0.0148x + 6.891$  (4.14)

เมื่อ  $x = 1 - 5\%$

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

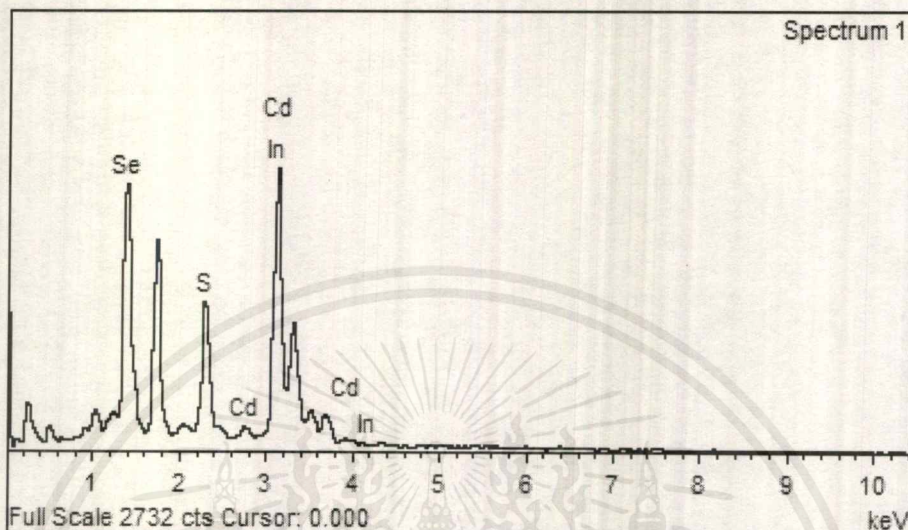


รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x) of $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$	Grain Size (nm)
0.00	68.8
0.01	58.2
0.02	57.9
0.03	50.2
0.04	47.7
0.05	44.8

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.03$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



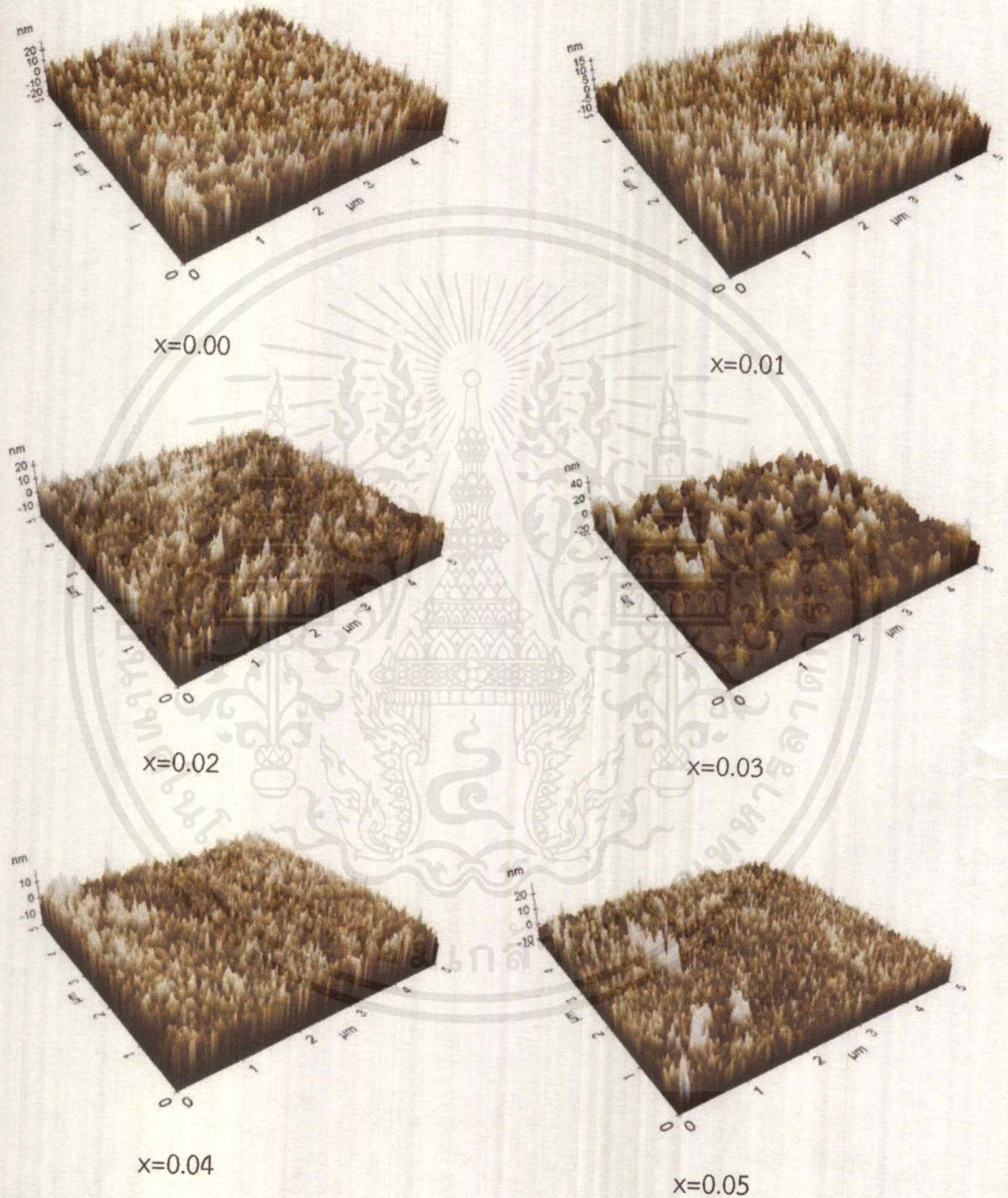
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.03$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Element	Weight (%)	Atomic (%)
Cd	61.33	45.44
Se	24.53	25.87
S	9.85	25.59
In	4.28	3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

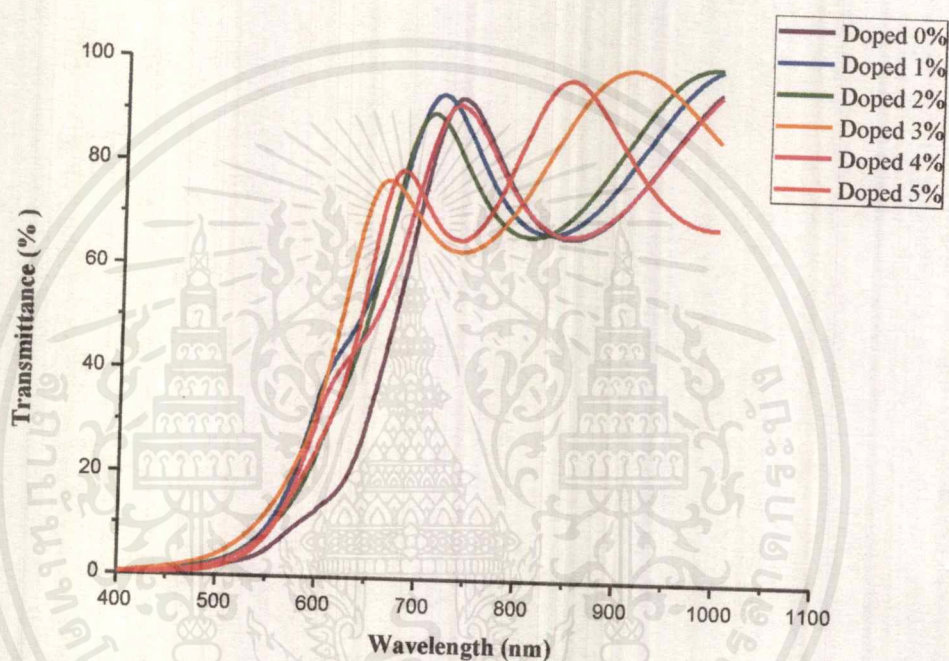
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM)ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Roughness (nm)	Grain Size (nm)
0.00	4.75	117
0.01	3.17	100
0.02	3.15	130
0.03	5.77	220
0.04	2.86	100
0.05	2.21	110

4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.3.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2557; ฐิตินัย, 2559)

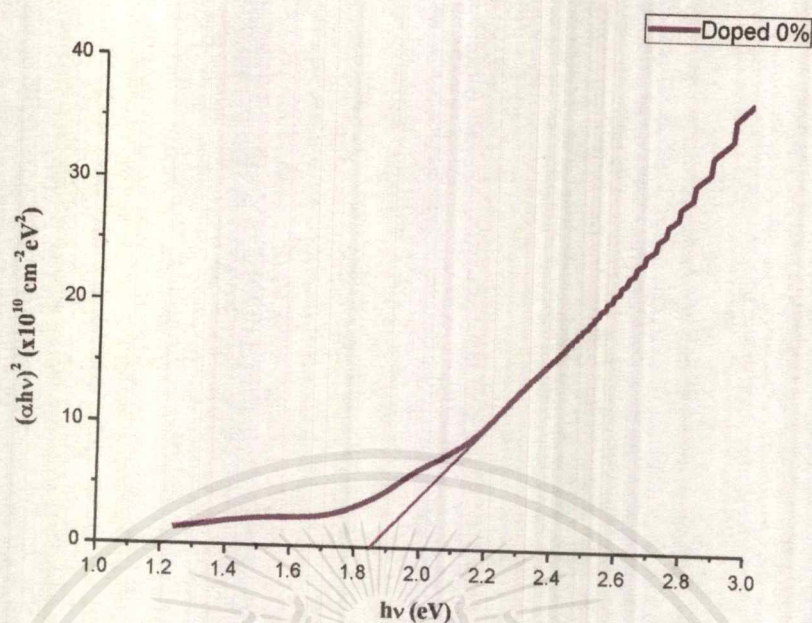


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

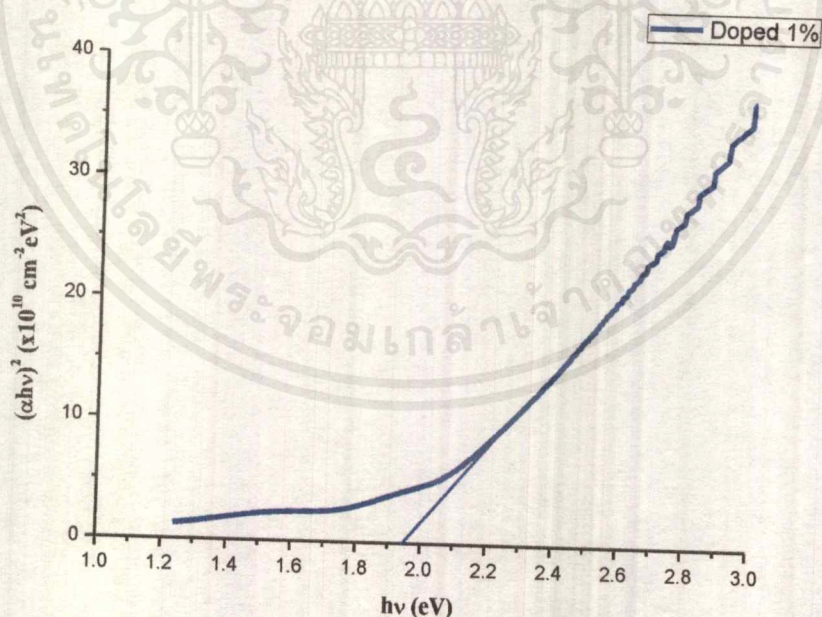
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2900 ช่วงความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร โดยจากกราฟจะพบว่าการแทรกสอดของการส่งผ่านของแสง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยมวลอะตอม  $(x)$  มีค่าเพิ่มขึ้นค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นจน  $x=3$  จากนั้น ช่องว่างแถบพลังงานจะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

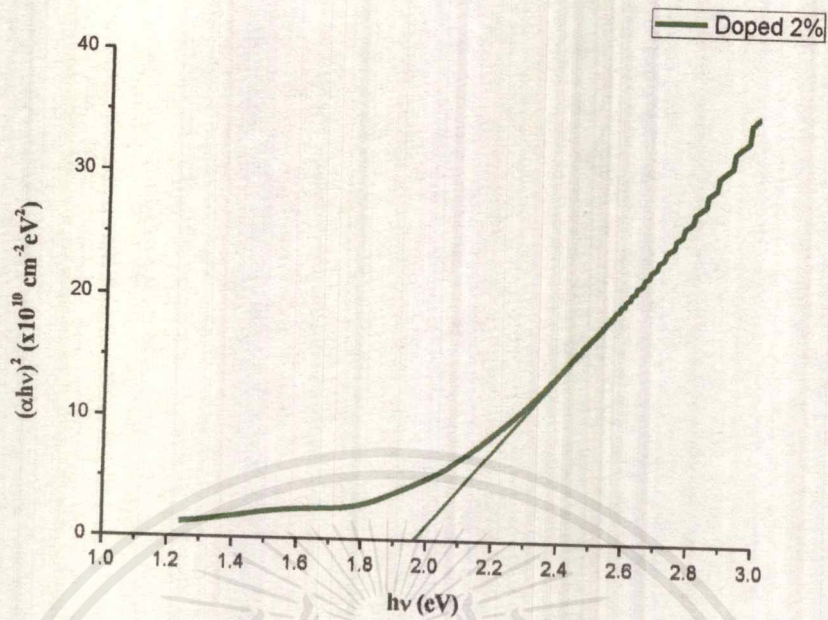


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่  $x=0.00$

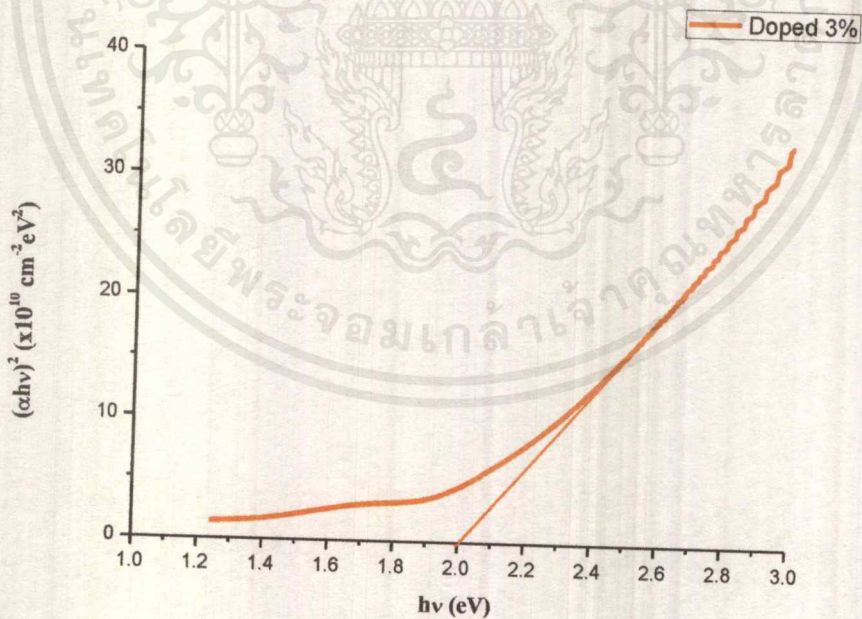


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่  $x=0.01$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

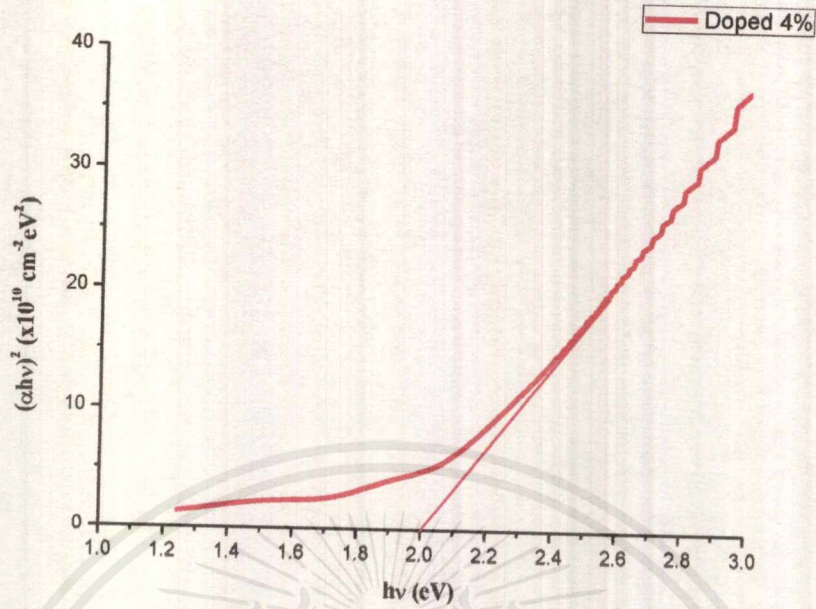


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่  $x=0.02$

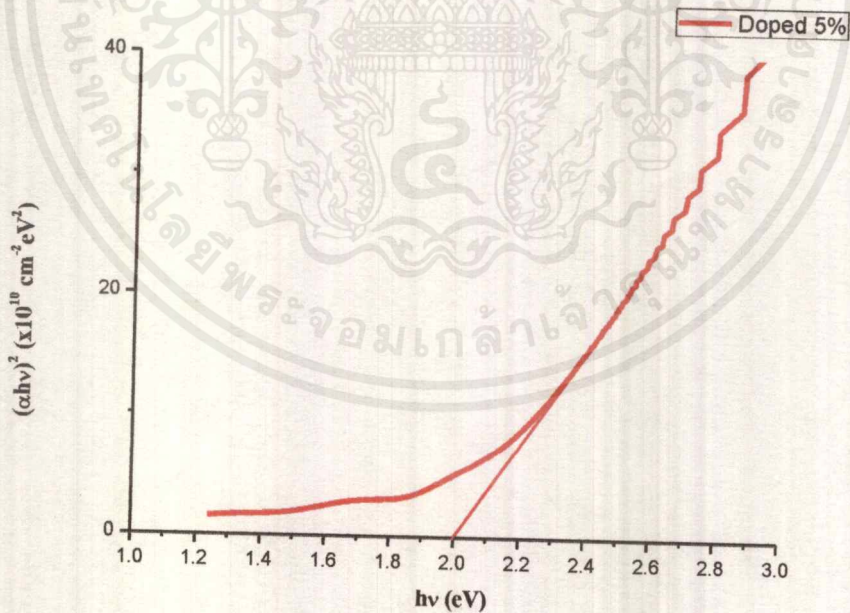


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่  $x=0.03$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

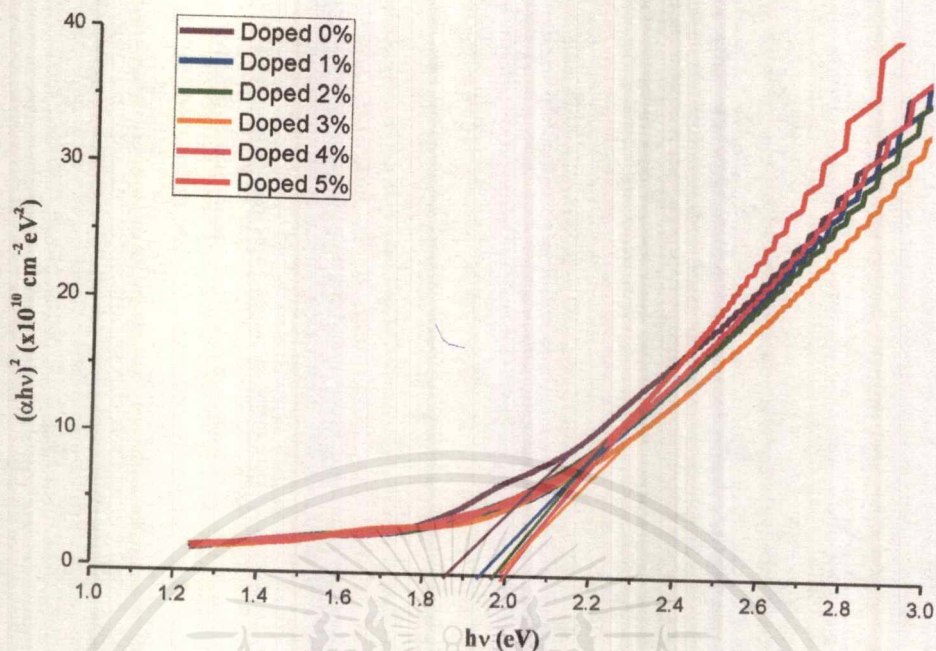


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(hv)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่  $x=0.04$

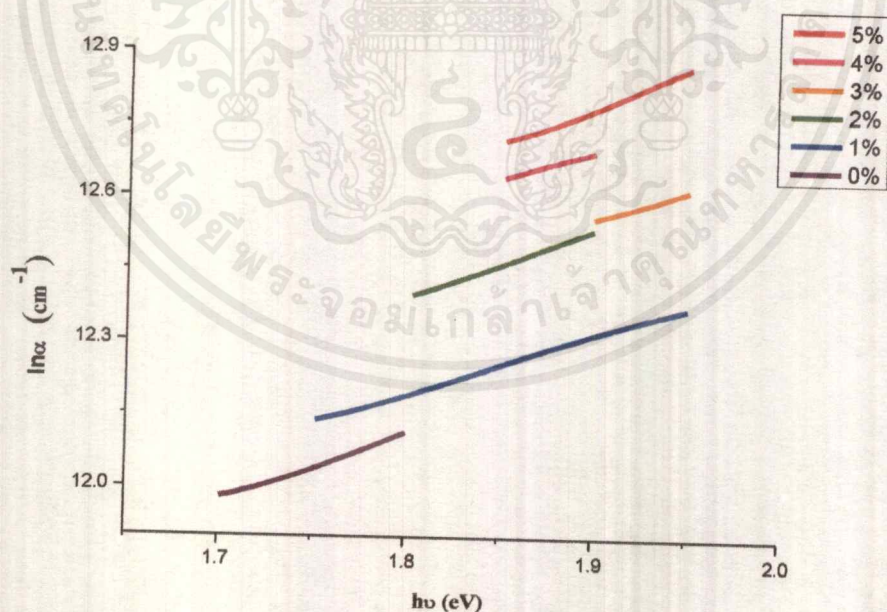


รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(hv)$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยที่  $x=0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\alpha hv)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

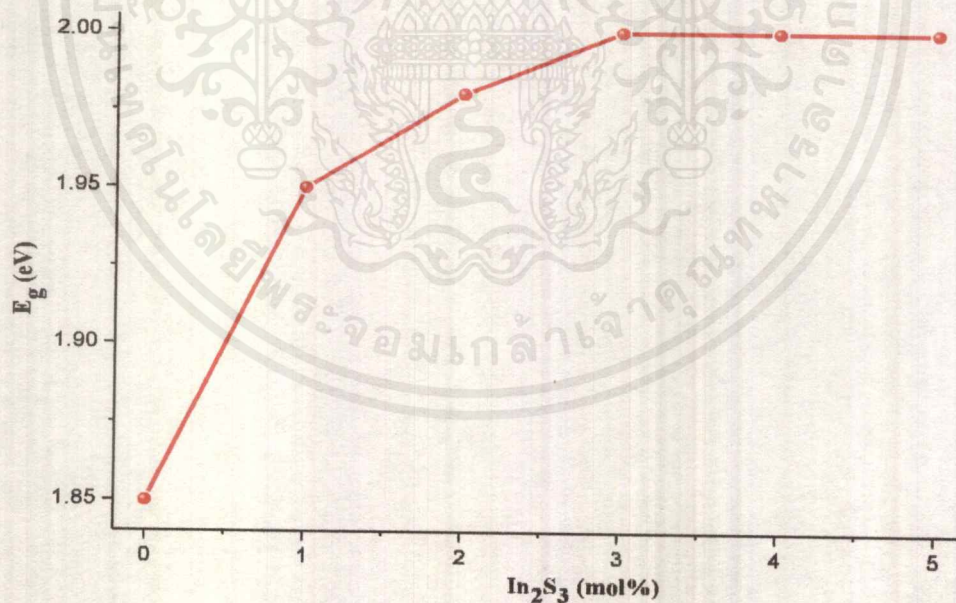


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง  $(\ln \alpha)$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) และค่าส่วนหางของแถบพลังงาน( $E_v$ ) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ( $CdS_{0.5}Se_{0.5}$ ) $_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

$In_2S_3$ (mol%)	Energy Gap ( $E_g$ ) (eV)	Band Tail ( $E_v$ ) (meV)
0	1.85	675.00
1	1.95	733.33
2	1.98	670.00
3	2.00	600.00
4	2.00	660.00
5	2.00	575.00

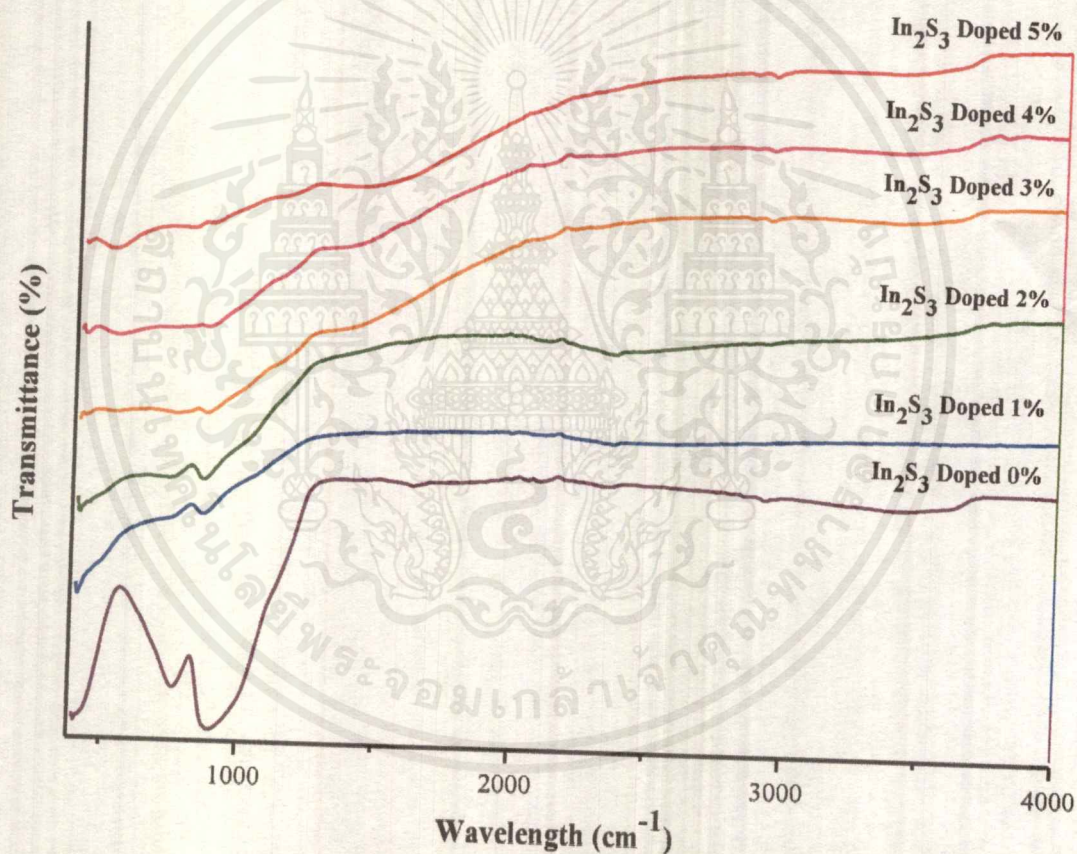


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ )กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $CdS_{0.5}Se_{0.5}$ ) $_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

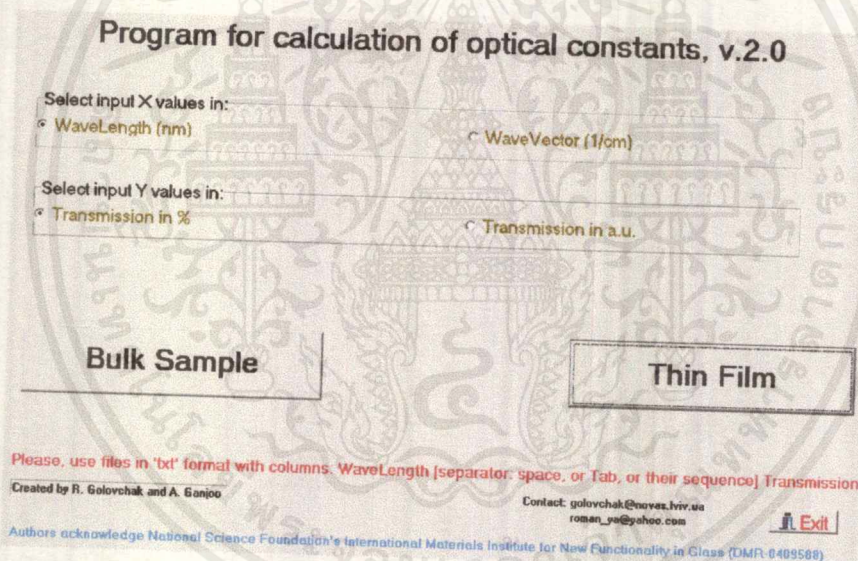
การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ซึ่งทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสง (Transmittance : %T) ที่ใช้เลขคลื่นมีค่าในช่วง 400-4000 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร

4.4 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางแสงของตัวกลาง ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มนิยามได้จาก ค่าอัตราส่วนของอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ หรือในอากาศ ต่อ ค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ แสงเคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยอัตราเร็ว  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ส่วนในตัวกลางใด ๆ อัตราเร็วของแสงจะเปลี่ยนไป ถ้าให้  $n$  แทนค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ของตัวกลางใด ๆ จะได้  $n=c/v$  โดย  $c$  แทนค่าอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศหรืออากาศ และ  $v$  แทนค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรูปแบบคำสั่งของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ โดยโปรแกรม PARAV 2.0

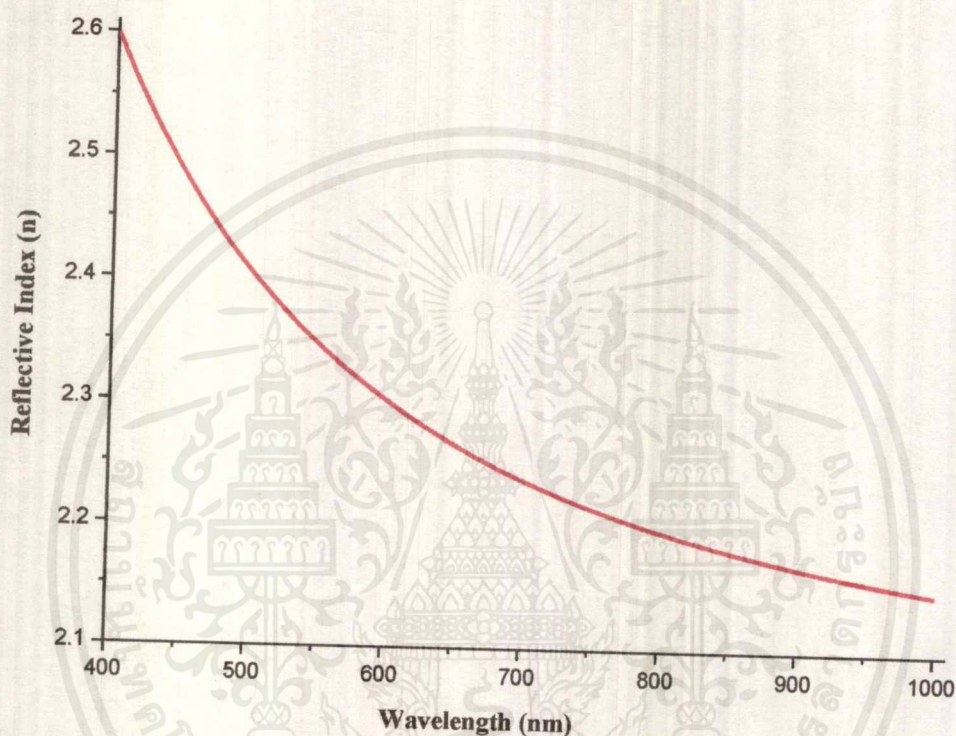


รูปที่ 4.18 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

โปรแกรม PARAV 2.0 จะทำการคำนวณค่าดัชนีหักเหโดยอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยข้อมูลความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กันกับสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400-900 นาโนเมตร โปรแกรม PARAV 2.0 จะต้องอาศัยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงในรูปของ notepad จึงทำการสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าดัชนีหัก

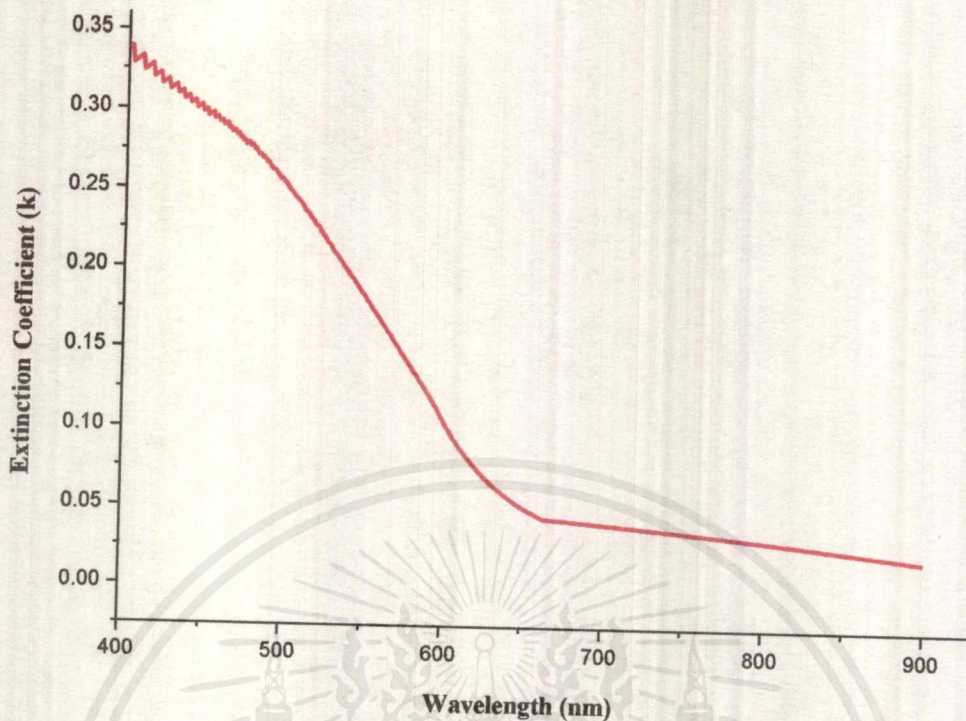
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มบางหลังจากที่โปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกเป็นไฟล์ notepad ถูกบันทึกเป็นนามสกุล .txt ภายในไฟล์จะประกอบไปด้วยข้อมูลของ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงในช่วงต่าง ๆ และค่าแถบช่องว่างพลังงาน ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณเสร็จเพื่อมาหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.19-4.20



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

หากพิจารณาความยาวคลื่นในช่วง 400-900 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่ง  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  จะแสดงดังรูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำตามความยาวคลื่นสอดคล้องดีกับสมการคอซีดังความสัมพันธ์  $n = a + (b/\lambda^2)$



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง โดยรูปทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีค่าลดลงช้า ๆ เข้าสู่ศูนย์นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีบทบาทมากที่ช่วงพลังงานมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดังกล่าวและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีบทบาทลดลงจนน้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงที่ความยาวคลื่นแสงมีค่าสูง หรือในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่มีความยาวคลื่นแสงมีค่าต่าง ๆ ดังความสัมพันธ์  $k = \alpha\lambda/4\pi$  ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงในช่วงที่มีค่าพลังงานสูงจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อใช้ในการทรานซิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำในสารกึ่งตัวนำ

4.4.1 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2557; จิตินัย, 2559)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สื่อถึงความมีขั้วของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ วัสดุใดที่มีความเป็นขั้วสูงและจะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้ได้เนื่องจากการโพลาริซเมชันของวัสดุต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนประกอบไปด้วยส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon^*$ ) จะแสดงได้ดังสมการ

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

โดยที่

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

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

มีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity;  $\sigma$ ) ไว้ดังนี้ คือ

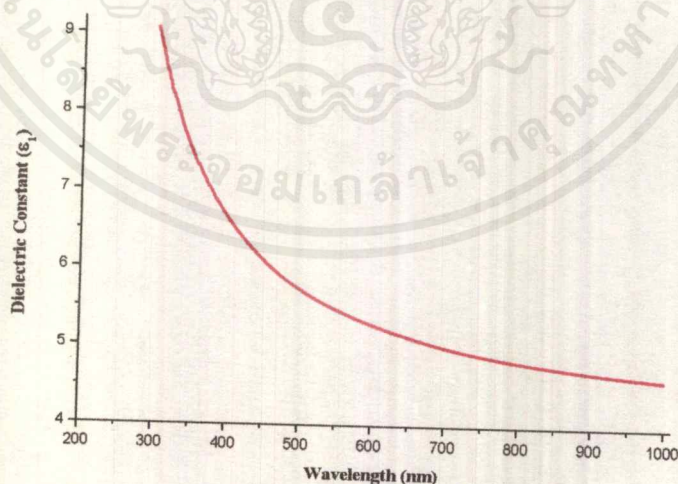
$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2 \quad (4.18)$$

เมื่อ

$$\sigma_1 = \omega\epsilon_2\epsilon_0 \quad (4.19)$$

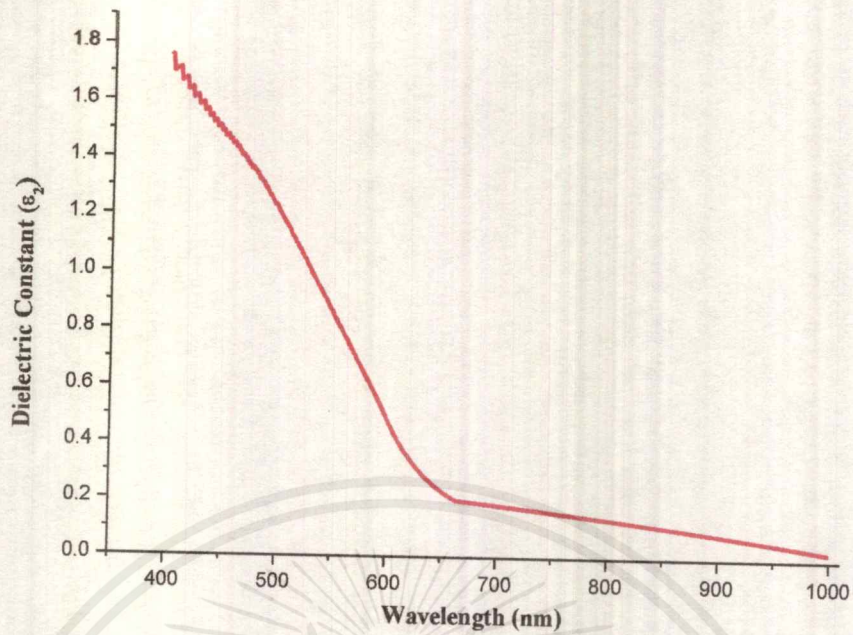
และ

$$\sigma_2 = \omega\epsilon_1\epsilon_0 \quad (4.20)$$



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

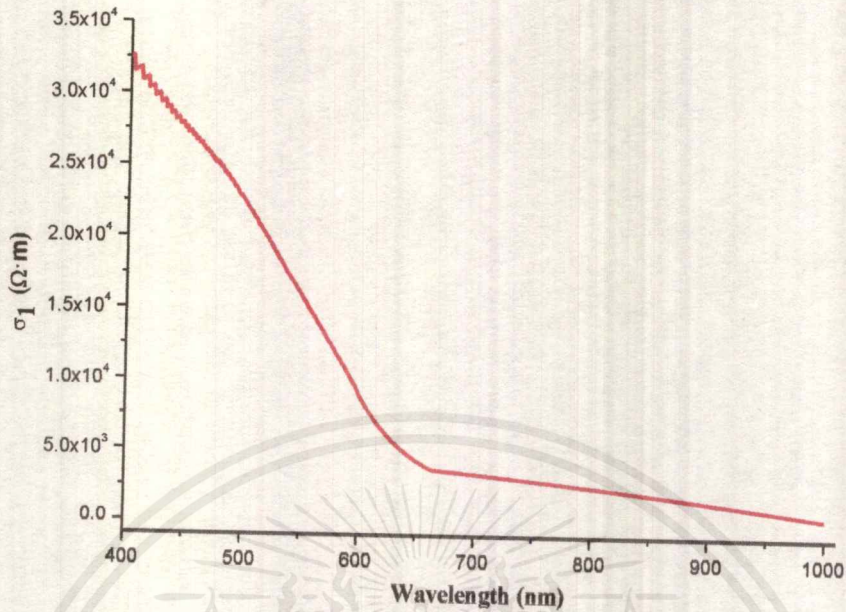
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



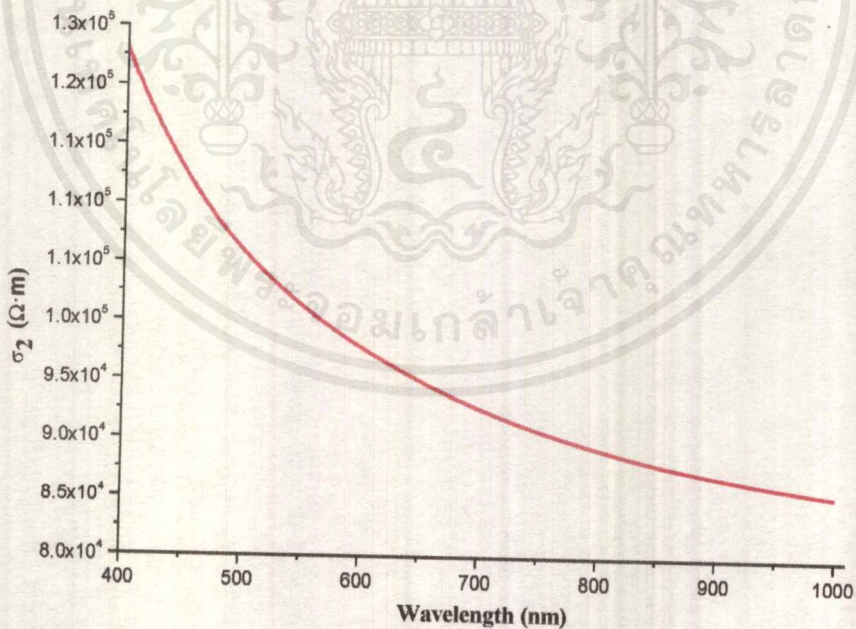
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าสูงขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.23 และ 4.24 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  แสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนแสงที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ดี ส่วนจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน (electron polarizability,  $\alpha_p$ ) หาได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha_p = \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \left( \frac{3M}{4\pi Nd} \right) \quad (4.21)$$

เมื่อ  $n$  คือค่าดัชนีหักเห

$M$  คือมวลโมเลกุล

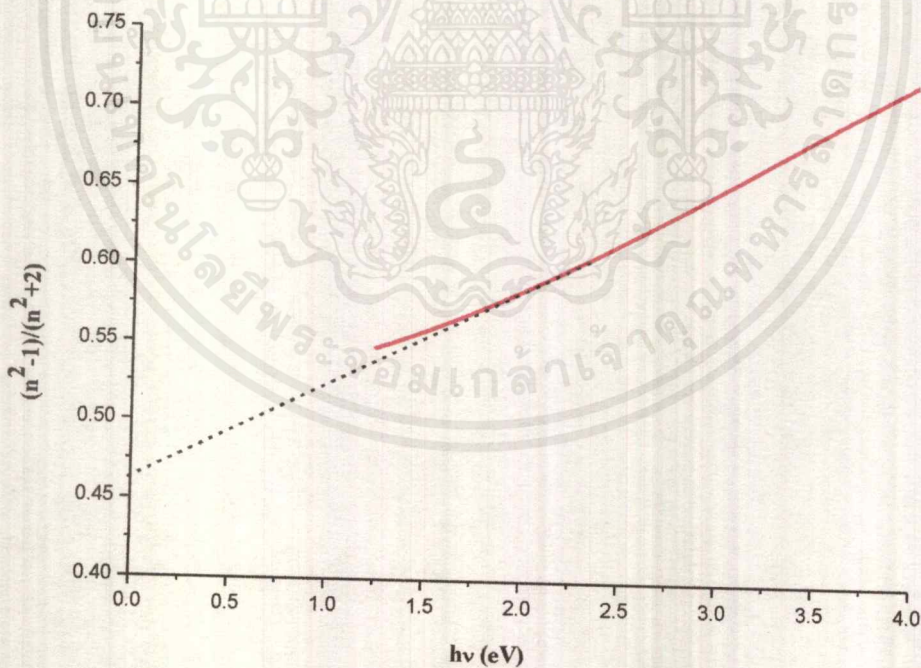
$d$  คือความหนาแน่นของฟิล์มบาง

$N$  คือเลขอาโวกาโดร ( $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม/โมล)

สามารถหาค่า  $\alpha_p$  ได้จากกราฟความสัมพันธ์

$$\left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) = \frac{4\pi Nd\alpha_p}{3M} + hv \quad (4.22)$$

$$\alpha_p = \left( \frac{3M(\text{จุดตัดแกน y})}{4\pi Nd} \right) \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

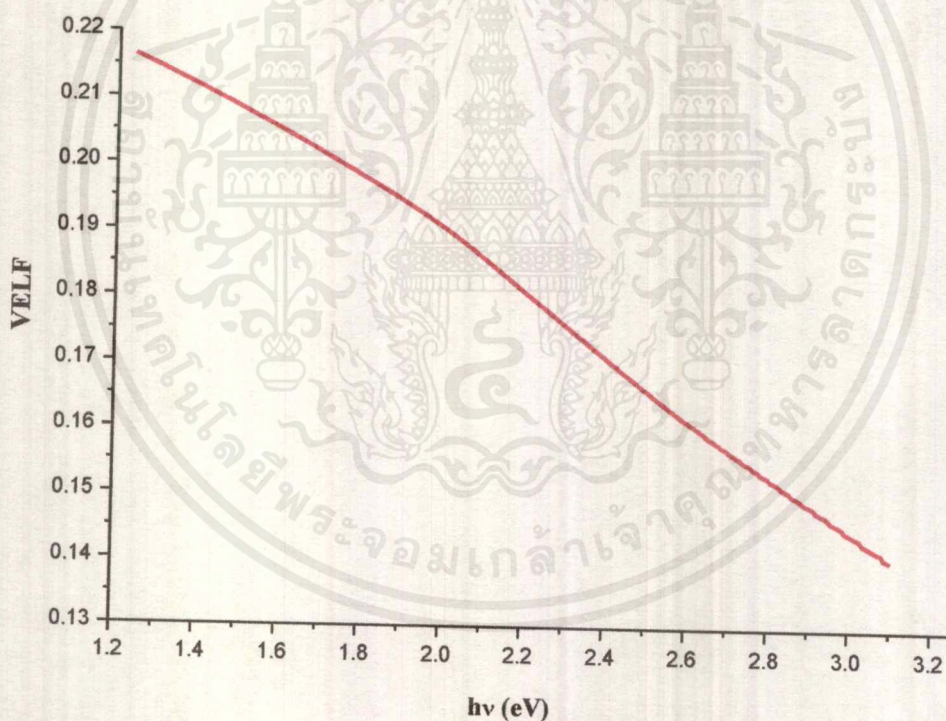
เมื่อคลื่นแสงเดินทางเข้าไปในฟิล์มบาง พลังงานของโฟตอนจะมีการสูญเสียไปขณะเดินทางเข้าไปในเนื้อสารซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตร (Volume energy loss function, VELF) ดังสมการ

$$\text{VELF} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} \quad (4.23)$$

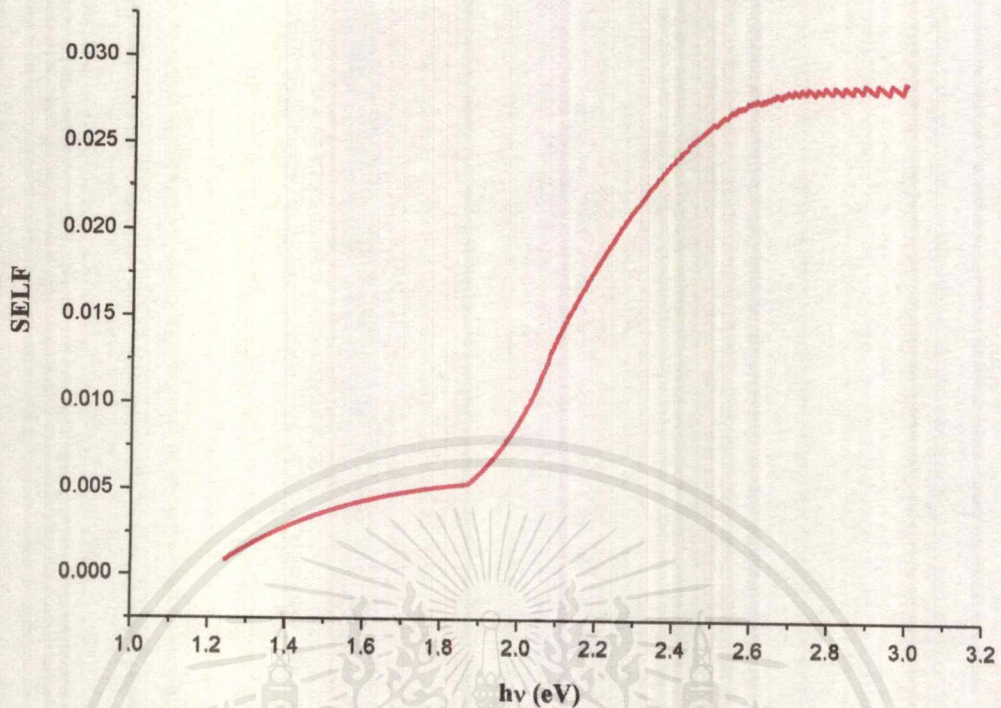
พลังงานของโฟตอนจะมีการสูญเสียไปที่บริเวณพื้นผิวของฟิล์มบาง จะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการสูญเสียเชิงพื้นผิว (Surface energy loss function, SELF) ดังสมการ

$$\text{SELF} = \frac{\epsilon_2}{(\epsilon_1 + 1)^2 + \epsilon_2^2} \quad (4.23)$$

โดยปกติ VELF จะมีค่ามากกว่า SELF อย่างไรก็ตามทั้ง VELF และ SELF จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่พลังงานโฟตอนสอดคล้องกับ  $E_g$



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตร (VELF) กับค่าพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



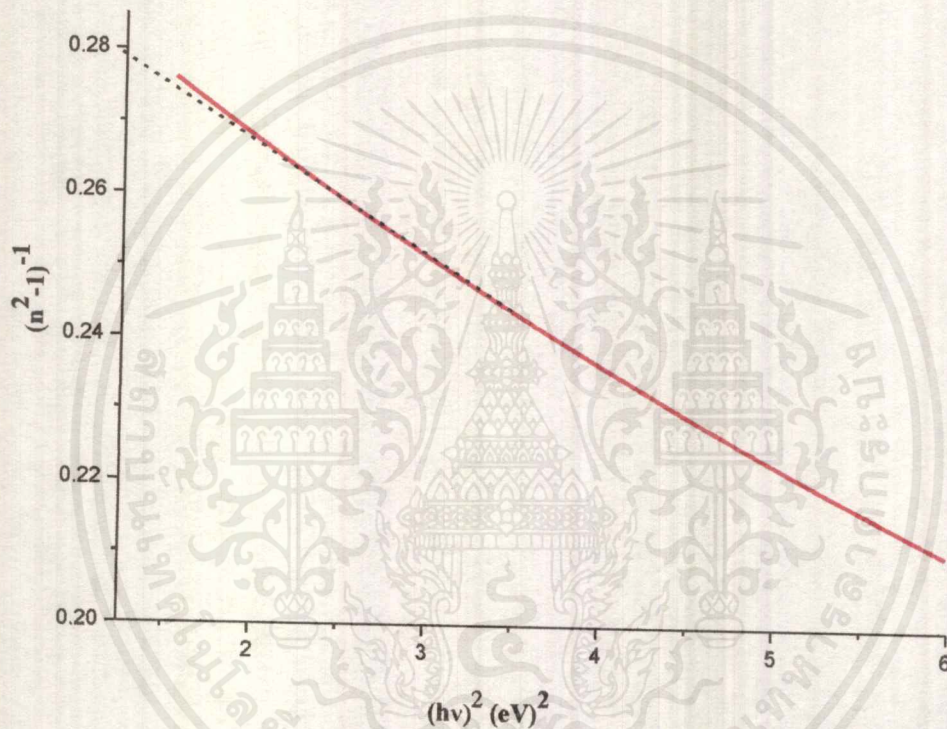
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นผิว (SELF) กับค่าพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.6 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x=0.04$  ที่ความยาวคลื่น 900 นาโนเมตร

n	k	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\sigma_1$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\sigma_2$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$\alpha_p$
2.169	0.019	4.706	0.085	$1.57 \times 10^3$	$8.71 \times 10^4$	$6.04 \times 10^{-24}$

4.4.2 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2557; จูตินัย, 2559)

เวมเพิ่ม-โตโดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(n^2-1)^2$  กับ  $(hv)^2$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $(n^2-1)^2$  กับ  $(hv)^2$  มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (hv)^2} \quad (4.24)$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2 \quad (4.25)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.25) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (4.26)$$

และ จุดตัดแกน  $y = \frac{E_0}{E_d}$  (4.27)

จากสมการของความชันและจุดตัดแกน  $y$  สามารถที่จะหาค่า  $E_0$  และ  $E_d$  ได้โดยที่  $E_0$  คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ส่วน  $E_d$  คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (4.28)$$

เมื่อ  $\beta = 0.26 \pm 0.03$  อิเล็กตรอนโวลต์ (4.29)

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

$Z_a$  = ค่าวาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์ จะมีค่าเท่ากับ 2

$N_e$  = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (4.30)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-3}}{M_{-3}} \quad (4.31)$$

เมื่อ  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ชั่วคราวทางแสง เมื่อเป็นกรณี

โมเมนต์ลำดับที่  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  ตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ( $n^*$ ) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \tag{4.32}$$

เมื่อ  $n^* = n - ik$  (4.33)

เมื่อ  $n$  = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

$k$  = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

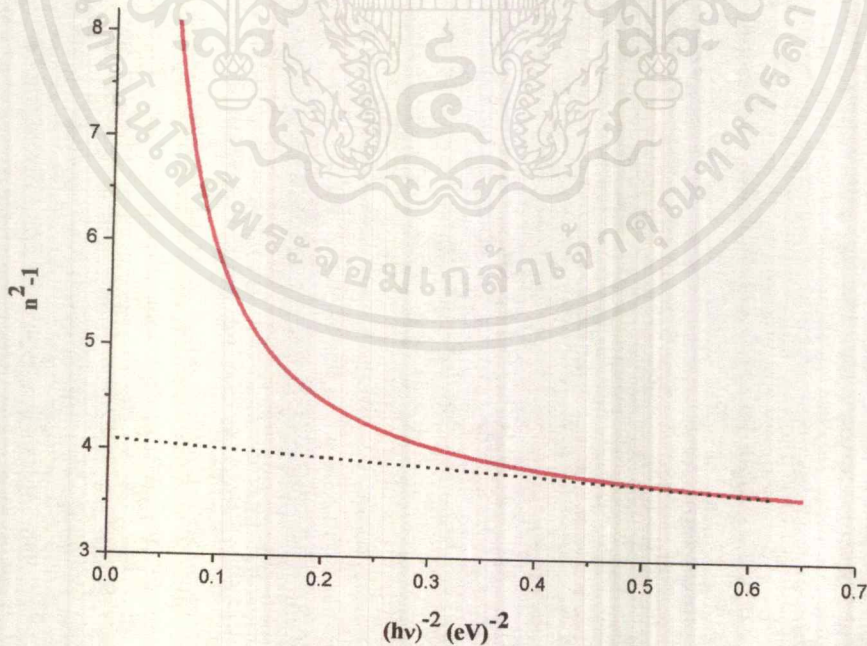
พลังงานแลตทิซ (lattice energy,  $E_l$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$n^2 = 1 + \frac{E_d E_0}{(E_0^2 - E^2)} - \frac{E_l^2}{E^2} \tag{4.34}$$

$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{\left(E_0 - \frac{E^2}{E_0}\right)} - \frac{E_l^2}{E^2} \tag{4.35}$$

เมื่อพิจารณาที่  $E=E_0$  สมการจะกลายเป็น

$$n^2 - 1 = \frac{E_d}{E_0} - \frac{E_l^2}{E^2} \tag{4.36}$$



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(n^2-1)$  กับ  $(hv)^{-2}$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าดัชนีหักเหสถิต (static refractive index,  $n_0$ ) จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$n_0 = \left( 1 + \frac{E_d}{E_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.37)$$

4.4.3 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแสงจากเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ (Sellmeier Oscillator) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

โดยปกติสารกึ่งตัวส่วนใหญ่จะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ค่าดัชนีหักเหของแสง จะแสดงดังสมการ

$$n^2 - 1 = \frac{(e^2 / \pi mc^2) NS_0}{(1/\lambda_0^2 - 1/\lambda^2)} \quad (4.38)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยของการทรานซิชันระหว่างแถบพลังงาน

$S_0$  คือ ความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์

จากสมการดังกล่าว สามารถเขียนได้ในแบบของเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ดังความสัมพันธ์

$$\frac{n_\infty^2 - 1}{n^2 - 1} = 1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^2 \quad (4.39)$$

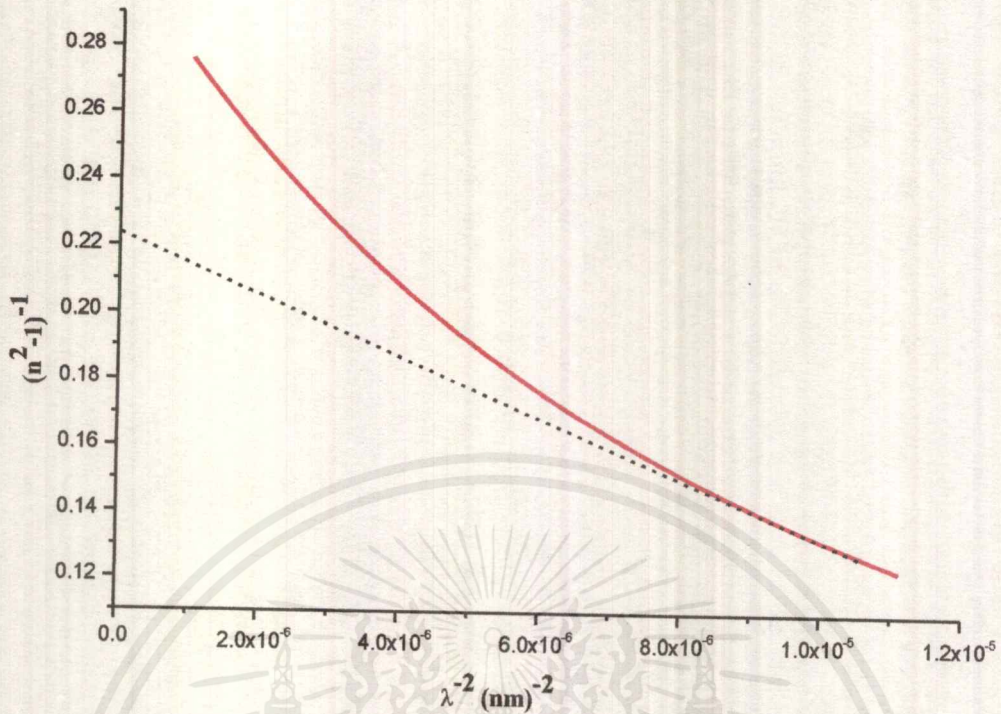
หรือ

$$\frac{1}{n^2 - 1} = \frac{1}{S_0 \lambda_0^2} - \frac{1}{S_0} \left( \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (4.40)$$

โดยที่

$$S_0 = \frac{n_\infty^2 - 1}{\lambda_0^2} \quad \text{โดยที่ } \lambda_0 < 500 \text{ nm} \quad (4.41)$$

$$\text{Slope} = \frac{1}{S_0} \quad \text{และ} \quad \text{จุดตัดแกน } y = \frac{1}{S_0 \lambda_0^2}$$



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $\lambda^{-2}$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

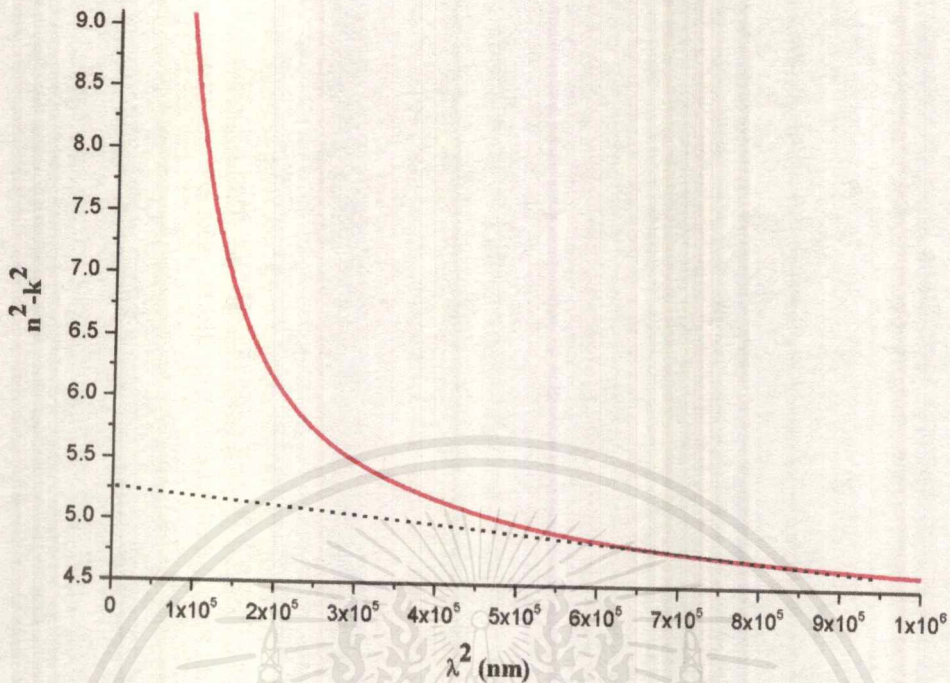
4.4.4 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางแสงจากแบบจำลองสปิตเซอร์-แฟน (Spitzer-Fan model) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูงมีผลมาจากการสั่นของทั้งพาหะอิสระและแลตทิซ ค่าดัชนีหักเหของแสง ( $n$ ) และอัตราส่วนของพาหะอิสระต่อมวลยังผล ( $N/m^*$ ) หาได้จากความสัมพันธ์

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 = \epsilon_L - \left( \frac{e^2}{4\pi c^2 \epsilon_0} \right) \left( \frac{N}{m^*} \right) \lambda^2 \quad (4.42)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ เฟอร์มิตีวิตีของสุญญากาศ ( $8.85 \times 10^{-14}$  F/cm)

$$\text{Slope} = \frac{e^2}{4\pi c^2 \epsilon_0} \left( \frac{N}{m^*} \right) \quad \text{และ} \quad \text{จุดตัดแกน } y = \epsilon_L$$



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(n^2 - k^2)$  กับ  $\lambda^2$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ความถี่พลาสมา ( $\omega_p$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_p = \frac{e^2}{\epsilon_\infty} \left( \frac{N}{m^*} \right) \quad (4.43)$$

สมการของสปิตเซอร์-แพน อาจเขียนอยู่ในรูปของสภาพซึมซาบได้ทางไฟฟ้า (Electric susceptibility,  $\chi_e$ ) ดังสมการ

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 = \epsilon_L - \left( \frac{e^2}{\pi c^2} \right) \left( \frac{N}{m^*} \right) \lambda^2 \quad (4.44)$$

เมื่อ

$$\frac{e^2}{\pi c^2} \left( \frac{N}{m^*} \right) \lambda^2 = -4\pi\chi_e \quad (4.45)$$

และ

$$\underline{P} = \epsilon_0 \chi_e \xi \quad (4.46)$$

โดยที่  $P$  และ  $\xi$  คือ โพรราไรเซชันและสนามไฟฟ้าตามลำดับ

จากความความสัมพันธ์

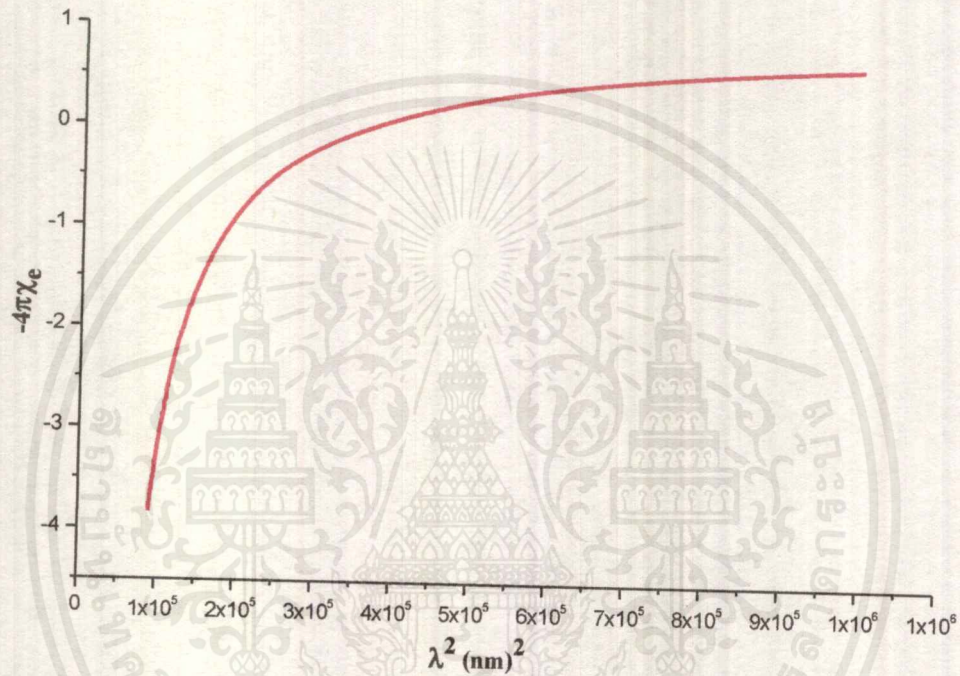
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_r = \epsilon_L + 4\pi\chi_e \quad (4.47)$$

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 = \epsilon_L + 4\pi\chi_e \quad (4.48)$$

$$-4\pi\chi_e = \epsilon_L - (n^2 - k^2) \quad (4.49)$$

รู้ค่า  $\epsilon_L$  จากจุดตัดแกน y ส่วน  $n^2 - k^2$  ก็ได้จากกราฟที่ผ่านมา



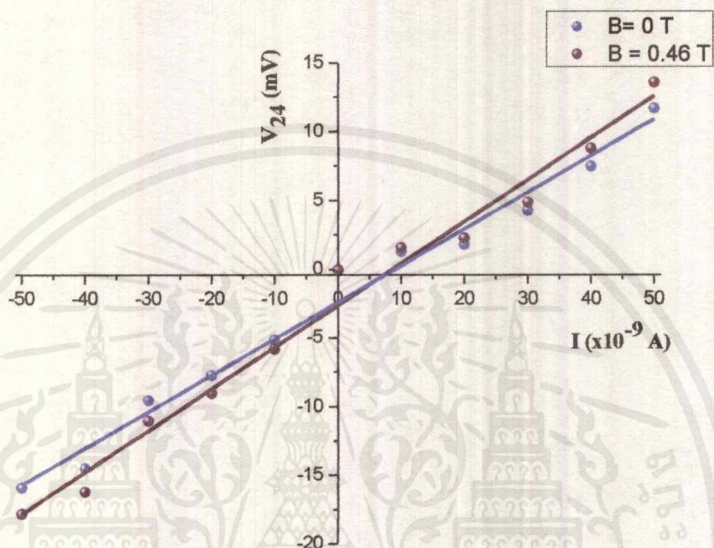
รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $-4\pi\chi_e$  กับ  $\lambda^2$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.7 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ(CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> เมื่อ x=0.04 โดยอาศัยแบบจำลองฮอลล์เตอร์เดี่ยว แบบจำลองของเซลไมเออร์ และแบบจำลองสปีตเซอร์-แพน

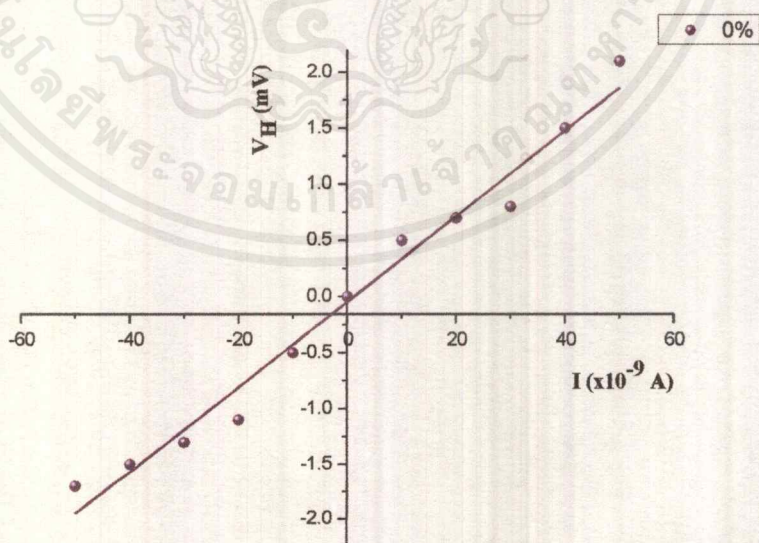
$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$M_{-1}$	$M_{-3}$	$f$ (eV) <sup>2</sup>	$n_0$	$N_c$	$E_f$ (eV)	$\epsilon_\infty$	$\lambda_0$ (nm)	$S_0$ (10 <sup>14</sup> m <sup>-2</sup> )	$\epsilon_L$	$\frac{N}{m^*}$ (cm <sup>-3</sup> /g)	$\omega_p$ (10 <sup>14</sup> s <sup>-1</sup> )
4.176	14.967	12.845	0.736	62.502	2.141	3.598	0.775	2.584	200.55	1.111	5.250	8.60x10 <sup>54</sup>	8.52

4.5 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.5.1 กราฟและผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

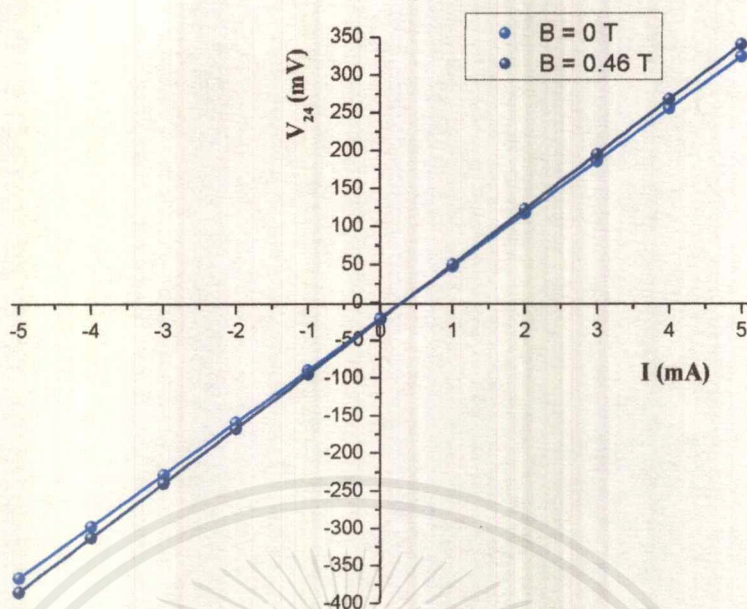


รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.00$

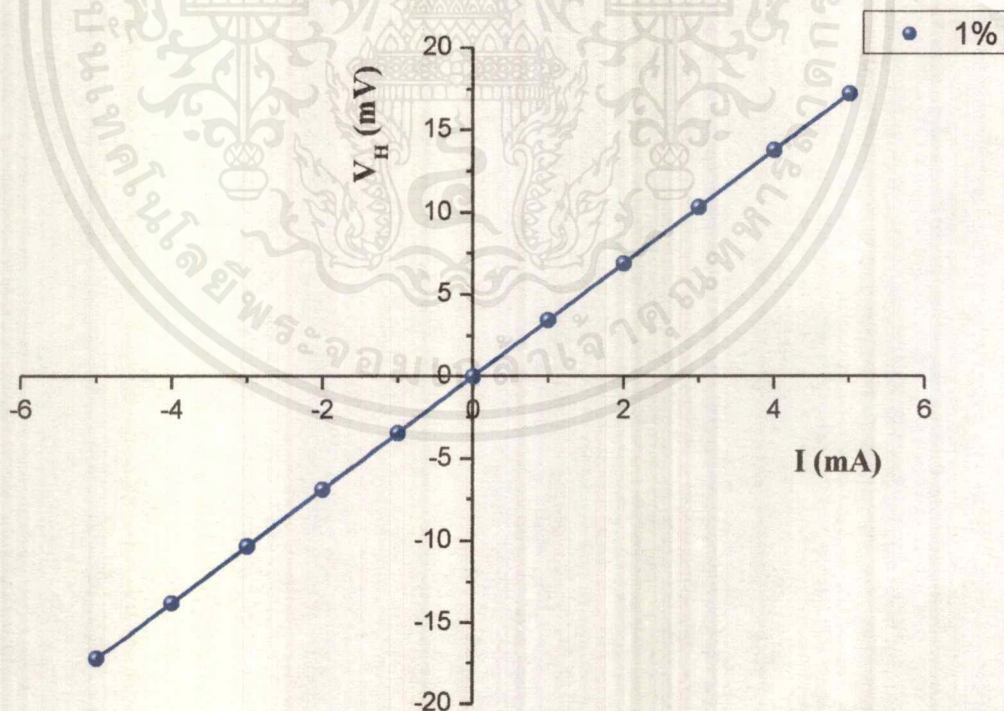


รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.00$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

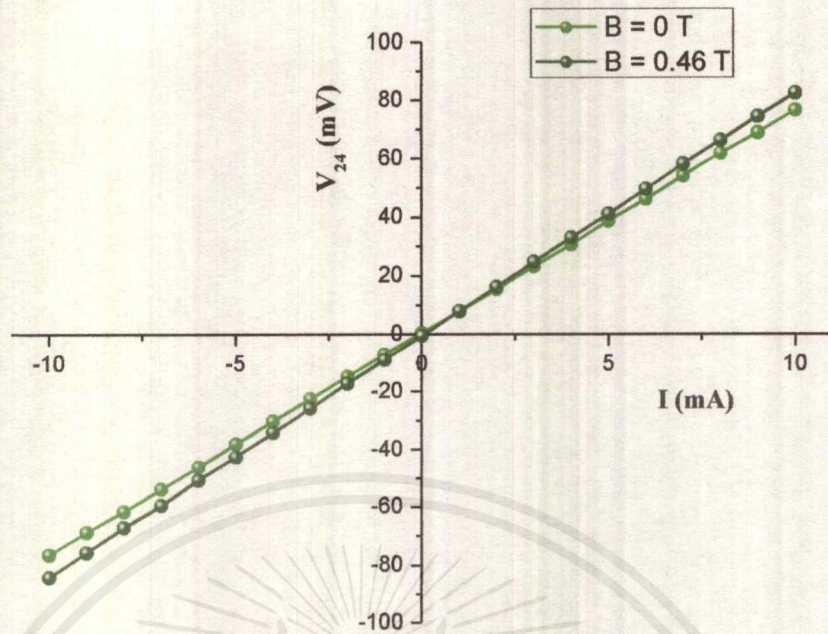


รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.01$

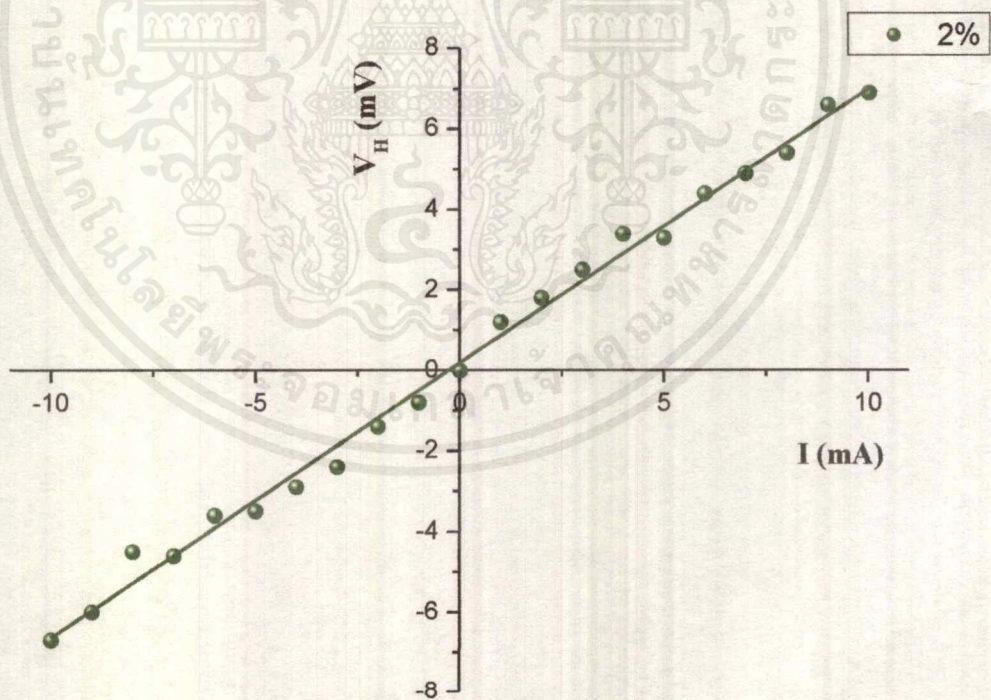


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.01$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

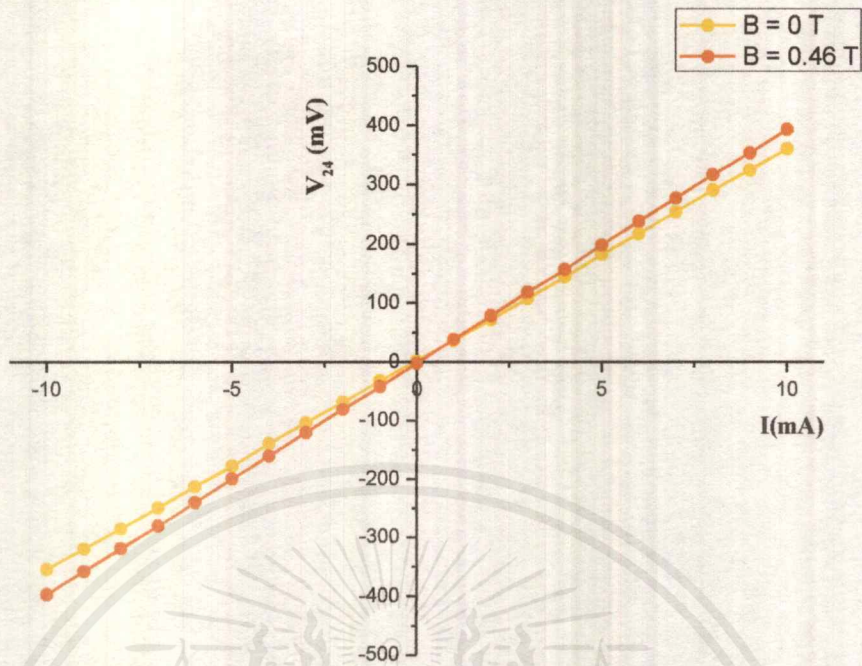


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$

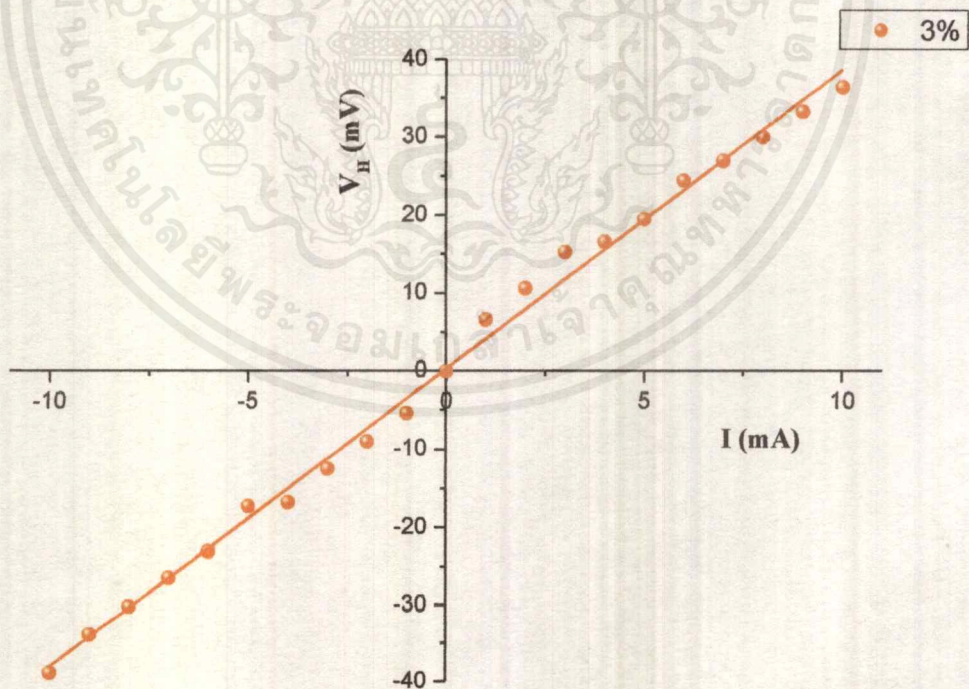


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

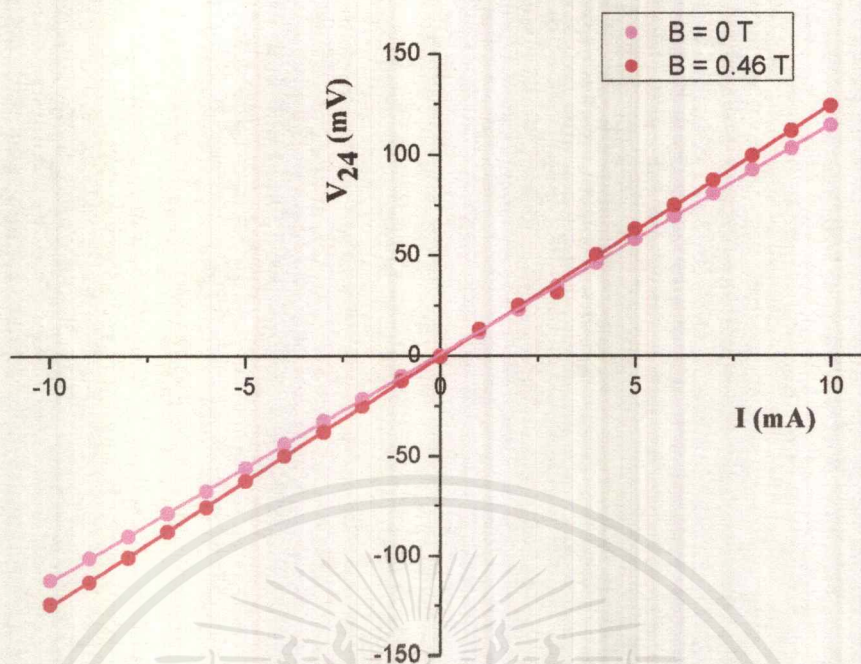


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.03$

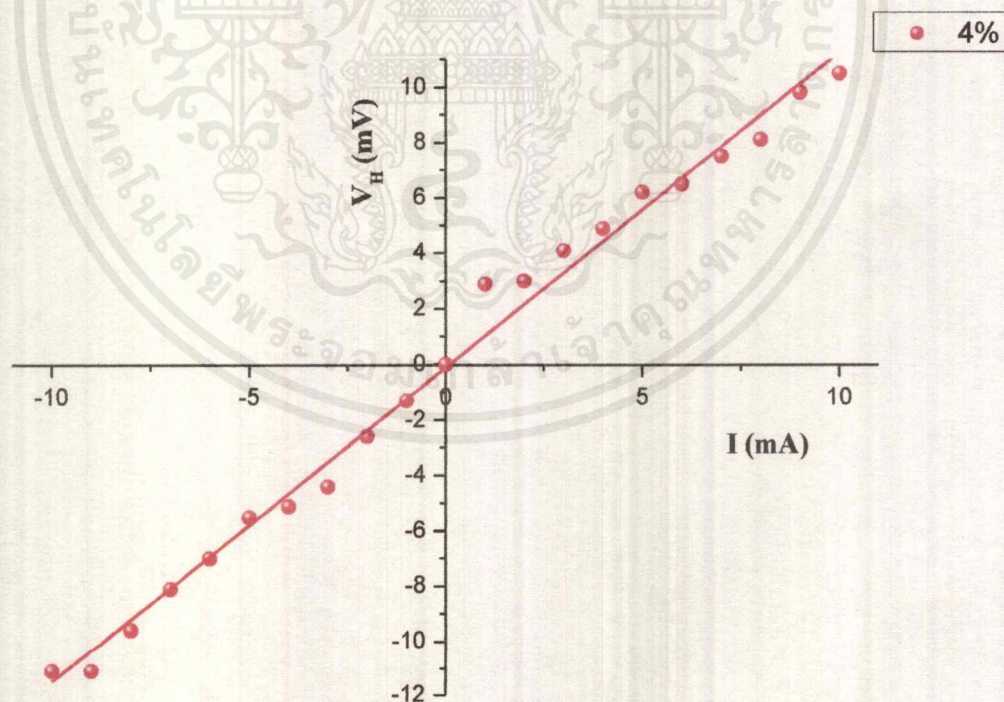


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.03$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

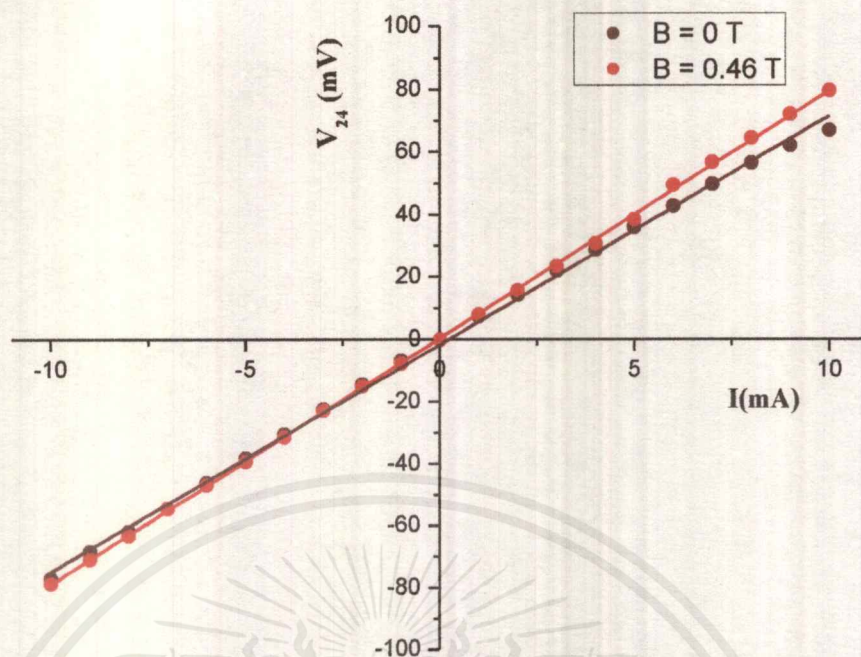


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$

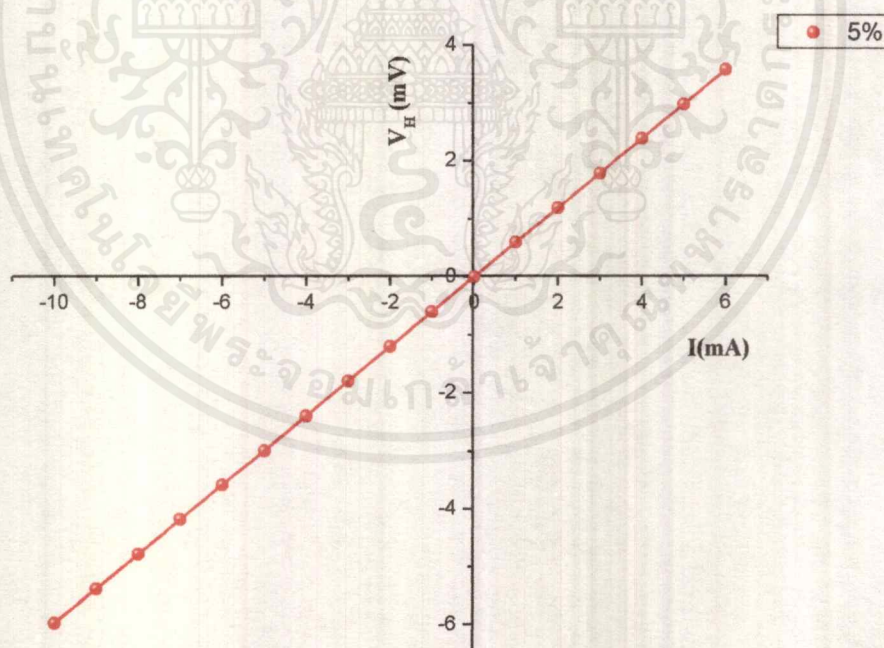


รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.04$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.05$

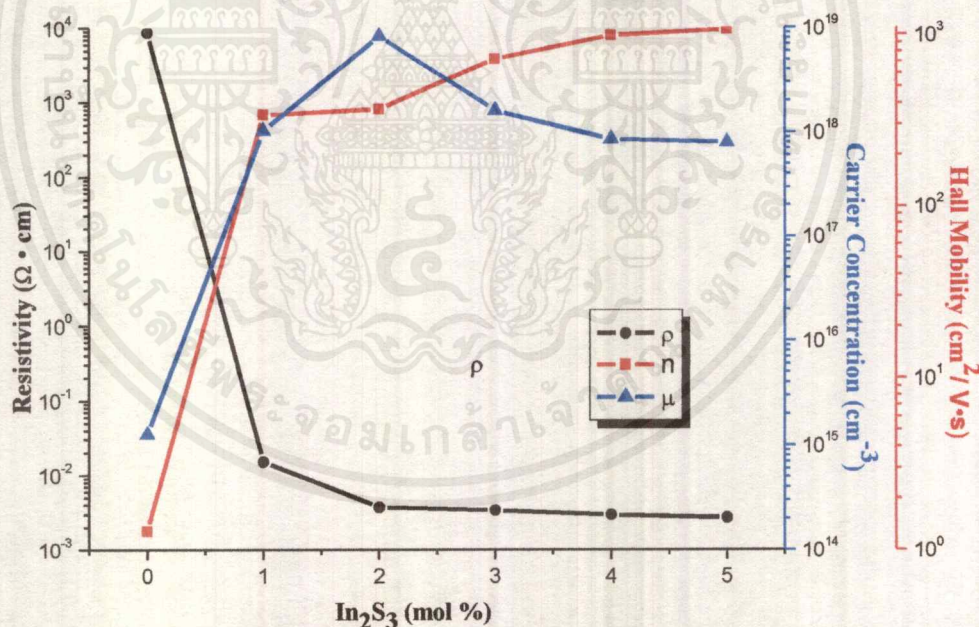


รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

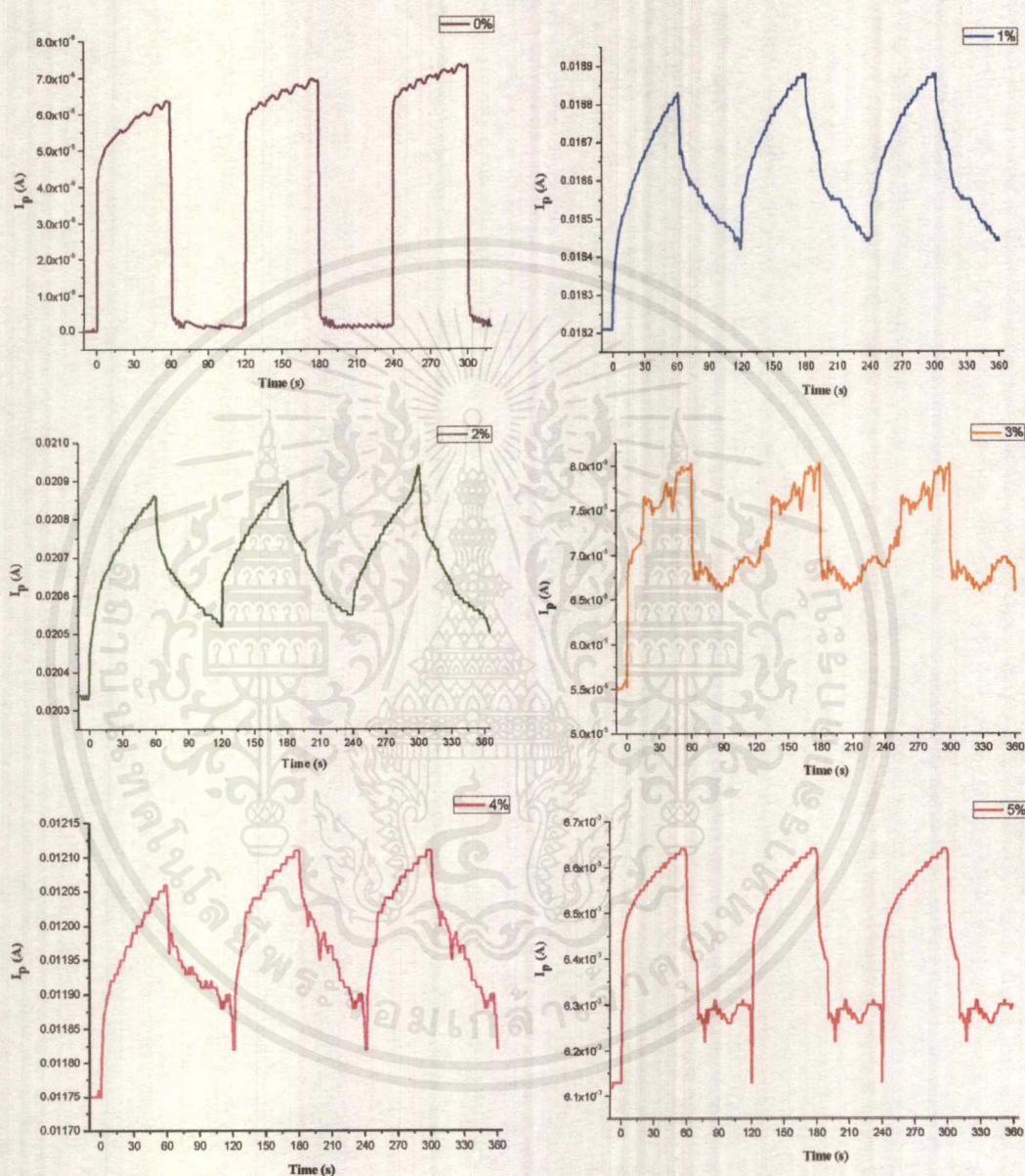
$\text{In}_2\text{S}_3$ (mol%)	$R_{sh}$ ( $\Omega / \text{sq}$ )	$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$R_H$ ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )	$n$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\mu$ ( $\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ )
0	$1.75 \times 10^8$	$8.74 \times 10^3$	$4.13 \times 10^4$	$1.51 \times 10^{14}$	4.72
1	$3.05 \times 10^2$	$1.53 \times 10^{-2}$	4.232	$1.48 \times 10^{18}$	$2.77 \times 10^2$
2	74.97	$3.74 \times 10^{-3}$	3.744	$1.67 \times 10^{18}$	$9.90 \times 10^2$
3	68.11	$3.40 \times 10^{-3}$	1.235	$5.06 \times 10^{18}$	$3.63 \times 10^2$
4	59.62	$2.98 \times 10^{-3}$	0.741	$8.43 \times 10^{18}$	$2.48 \times 10^2$
5	54.66	$2.73 \times 10^{-3}$	0.649	$9.63 \times 10^{18}$	$2.37 \times 10^2$



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ( $I_p$ ) กับเวลา ( $t$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เปลี่ยนไปตามเวลาขณะฉายแสง พบว่าทุกสารตัวอย่างตอบสนองกับแสงด้วยช่วงการตอบสนองที่สั้นมากทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง ถ้ากำหนดให้สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงขณะที่ความเข้มแสงจากหลอดไฟมีค่าคงที่ (stationary photoconductivity) คือ  $\Delta\sigma_s$  ซึ่งจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ (Pan, 2013)

$$\Delta\sigma_s = q\alpha\beta I_p \mu_p \tau_p \quad (4.50)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

$\beta$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงควอนตัมในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (quantum yield)

$I$  คือ กระแสโฟโต

$\mu_p$  คือ สภาพคล่องของพาหะ

$\tau_p$  คือ ค่าชีวิตของพาหะภายใต้การฉายแสง

กระแสขาขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [1 - \exp(-t / \tau)] \quad (4.51)$$

ส่วนกระแสขาลงจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [\exp(-t / \tau)] \quad (4.52)$$

ดังนั้น ค่าคงตัวของเวลา (time constant) ของกระแสขาขึ้น (rise current) และค่าคงตัวของเวลากระแสขาลง (decay current) ในที่นี้จะเรียกสั้นๆว่าเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (decay time) ตามลำดับ

เวลาขาขึ้นคือ เวลาขณะที่กระแสขาขึ้นมีค่าเท่ากับ  $0.63\Delta\sigma_s$  ส่วนเวลาขาลงคือ เวลาขณะที่กระแสขาลงมีค่าเท่ากับ  $0.37\Delta\sigma_s$  เวลาขาขึ้นและเวลาขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) สามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสงและหยุดฉายแสง (ดังรูปที่ 4.46) ตามลำดับ

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity, S) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้  
คือ

$$S = \left[ \frac{R_{\text{dark}} - R_{\text{light}}}{R_{\text{dark}}} \right] \times 100\% = \left[ \frac{\Delta R}{R_{\text{dark}}} \right] \times 100\% \quad (4.53)$$

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่งนิยามความไวในการตอบสนองต่อแสงดังนี้

$$S = \frac{R_{\text{dark}}}{R_{\text{light}}} \quad (4.54)$$

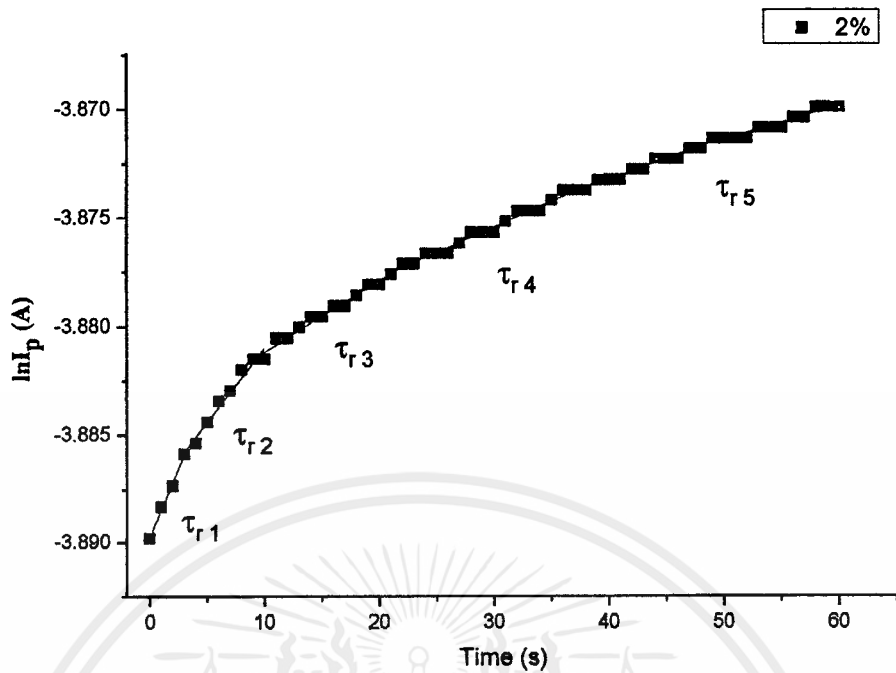
ในทางปฏิบัติมักมีการป้อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง ดังนั้น ความไวในการตอบสนองต่อแสงสามารถคำนวณได้ง่ายๆจากความสัมพันธ์

$$S = \frac{I_{\text{light}}}{I_{\text{dark}}} \quad (4.55)$$

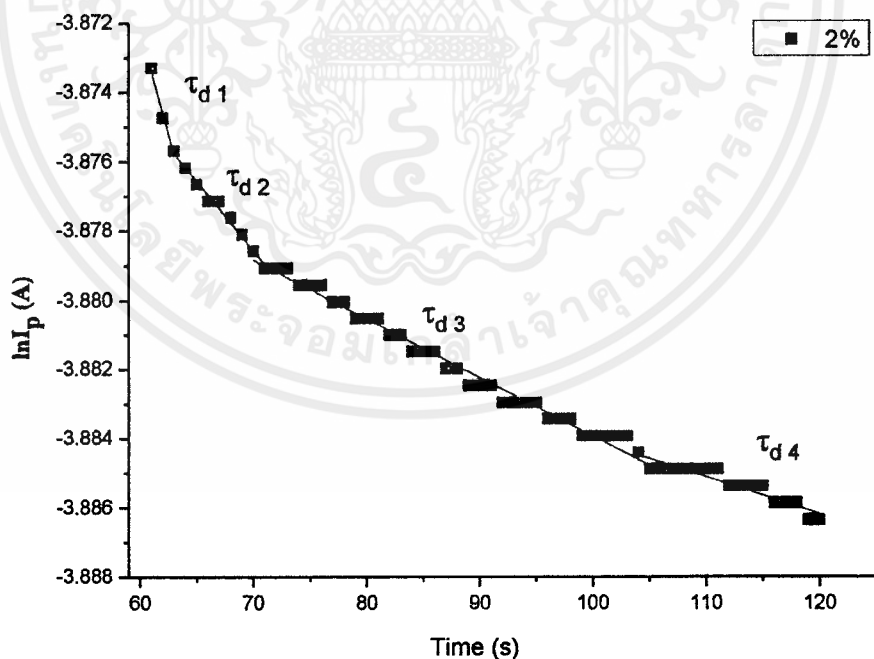
และผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่อุณหภูมิห้องจะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

$\text{In}_2\text{S}_3$ (mol%)	Photosensitivity (S)	
	$S = \left[ \frac{\Delta R}{R_{\text{dark}}} \right] \times 100\%$	$S = \frac{R_{\text{dark}}}{R_{\text{light}}}$
0	6926.267	70.263
1	2.174	1.021
2	1.707	1.017
3	17.647	1.176
4	1.515	1.015
5	6.431	1.064

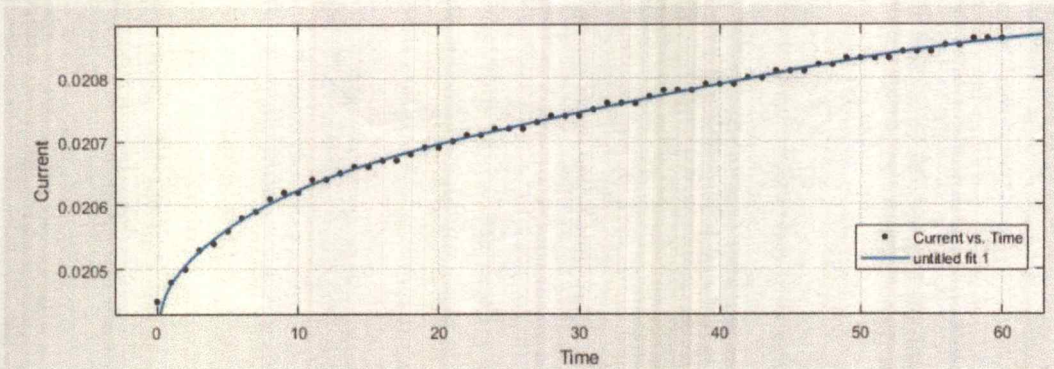


รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตโอสเทลลอลกาลิทิมธรรมชาติ ( $\ln I_p$ ) กับ เวลา ( $t$ ) ในช่วงขาขึ้น (Rise Time) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

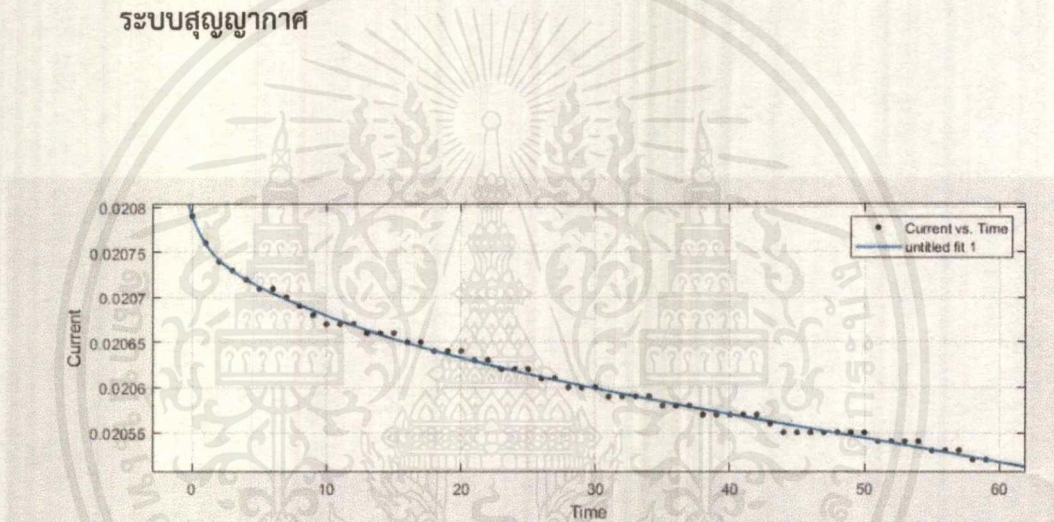


รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตโอสเทลลอลกาลิทิมธรรมชาติ ( $\ln I_p$ ) กับ เวลา ( $t$ ) ในช่วงขาลง (Decay Time) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 แสดงการพิศกรรพควมสัมพันธ์ระหว่างกระแสอร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.50 แสดงการพิศกรรพควมสัมพันธ์ระหว่างกระแสอร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่า กระแสขาลง ทั้งกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเป็นไปตามสมการ

$$I_p = I_0 \left[ 1 - \exp\left(-t/\tau_r\right) \right] \quad (4.56)$$

$$I_p = I_0' \exp\left(-t/\tau_d\right) \quad (4.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่พบเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเขียนอยู่ในรูปมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ดังสมการ

$$|i_p| = A_1'' \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (4.58)$$

ซึ่ง  $A_1''$  และ  $A_2''$  สามารถหาได้จากการพิเคราะห์ของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|i_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(-t/\tau_r\right)\right] + A_2''' \left\{1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{r2}\right)^\beta\right]\right\} \quad (4.59)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อธิบายแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11

$$\sigma_t = \frac{I}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (4.60)$$

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงซ้อนขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ได้รับจากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

Composition (x)	Rise Time (s)				
	1 <sup>st</sup> Term	2 <sup>nd</sup> Term	3 <sup>rd</sup> Term	4 <sup>th</sup> Term	5 <sup>th</sup> Term
0.02	$\tau_{r1} = 15.00$ $A_1 = 6.893 \times 10^{-4}$	$\tau_{r2} = 50.00$ $A_2 = -9.416 \times 10^{-3}$	$\tau_{r3} = 2500.00$ $A_3 = -1.746 \times 10^{-1}$	$\tau_{r4} = 100.00$ $A_4 = 2.296 \times 10^{-2}$	$\tau_{r5} = 2.00$ $A_5 = 3.239 \times 10^{-2}$ $\beta = 1.715 \times 10^{-3}$

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงซ้อนขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_{0.5}Se_{0.5})_{1-x}(In_2S_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ได้รับจากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

Composition (x)	Decay Time (s)			
	1 <sup>st</sup> Term	2 <sup>nd</sup> Term	3 <sup>rd</sup> Term	4 <sup>th</sup> Term
0.02	$\tau_{d1} = 15.00$ $A_1 = 1.428 \times 10^{-4}$	$\tau_{d2} = 50.00$ $A_2 = -1.630 \times 10^{-4}$	$\tau_{d3} = 5878.00$ $A_3 = 2.077 \times 10^{-2}$	$\tau_{d4} = 1.56$ $A_4 = 3.557 \times 10^{-5}$ $\beta = 0.1657$

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงตั้งรับขาขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่

Composition (x)		Rise Time (s)									
		1 <sup>st</sup> Term		2 <sup>nd</sup> Term		3 <sup>rd</sup> Term		4 <sup>th</sup> Term		5 <sup>th</sup> Term	
$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )
0.013	6.56	0.011	5.70	0.007	3.53	0.003	1.51	$3.95 \times 10^{-4}$	0.19		

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงตั้งรับขาขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่

Composition (x)		Decay Time (s)									
		1 <sup>st</sup> Term		2 <sup>nd</sup> Term		3 <sup>rd</sup> Term		4 <sup>th</sup> Term			
$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	$I_0$ (A)	$N_t$ ( $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )		
0.0136	6.86	0.0115	5.80	0.003	1.66	$2.00 \times 10^{-4}$	0.10				

\*\*\*หมายเหตุ  $N_t$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ 
$$N_t = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right)$$

แรงดันไฟฟ้า ( $V_a$ ) = 2.5 โวลต์

สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x (x=0.02) = 9.90 \times 10^2$   
ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)

ความกว้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $l$ ) = 0.3 เซนติเมตร

ความยาวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $w$ ) = 0.9 เซนติเมตร

ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $d$ ) =  $5.00 \times 10^{-5}$  เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานโครงการพิเศษ ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ มีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี

#### 5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล ปรากฏระนาบเด่นเพียงระนาบเดียวคือ (002) จากการคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, c ขนาดของเกรน ความหนาแน่นดิสโลเคชัน ความเครียด และสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของเกรน (Texture coefficient) ของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ที่  $x=0.03$  มีค่าประมาณ 4.193 Å, 6.847 Å, 45.30nm,  $3.23 \times 10^{15}$  (line/m<sup>2</sup>),  $3.55 \times 10^{-3}$  และ 1.819 ตามลำดับ

ผลจากการศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีขนาดของเกรนที่ลดลงเมื่อมีการเจือมากขึ้น และจากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ที่  $x=0.03$  โดยธาตุ Cd, Se, S และ In มีค่าอัตราส่วนอะตอมประมาณ 45.44%, 25.87%, 25.59% และ 3.11% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่  $x=0.03$  มีความขรุขระมากที่สุด

ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่  $x=0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$  และ  $0.05$  มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.85, 1.95, 1.98, 2.00, 2.00 และ 2.00 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

การหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงทำได้โดยการนำข้อมูลของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ที่ปรากฏวิธีการแทรกสอด บ้อนข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นคำนวณหาค่า โดยอาจกล่าวได้ว่า สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่ x=0.04 เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นแสง 900 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหมีค่าเป็น 2.169 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงมีค่าเป็น 0.019 และความสามารถโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน( $\alpha_p$ ) มีค่าเป็น  $6.04 \times 10^{-24}$  เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> มีแนวโน้มลดลง เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 400 ถึง 900 นาโนเมตร

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นสิ่งหนึ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของอิเล็กตรอนในอะตอมที่จะโพลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้ามาในผลึก โดยบทบาทของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแบ่งเป็นสองช่วงความยาวคลื่น ซึ่งอธิบายด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้นๆ จากผลการทดลองจึงทำให้ทราบว่า จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาวและมีพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และ จำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น และมีพลังงานที่สูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ในการศึกษาค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้พบว่า ค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนจำนวนจริงและส่วนจำนวนจินตภาพ ส่วนจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้นและมีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวเป็นแนวคิดที่สนใจรูปแบบการสั่นของอิเล็กตรอนเนื่องจากมีสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปในผลึก อิเล็กตรอนจะสั่นไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบๆ ไอออนคอร์ในรูปแบบที่มีทิศทางเดียวกัน ในการพิจารณาได้อาศัยการทราบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับ ค่าความยาวคลื่นแสง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางแสงที่บ่งบอกถึงรูปแบบการทรานซิชันของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพื้นฐาน (ground state) กับ ระดับพลังงานในสถานะถูกกระตุ้น (excited state) การหาค่าดังกล่าวทำได้โดยเขียนความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2$$

จากการทดลองสามารถหาค่าพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $E_d$  ได้ ซึ่งค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) ซึ่งจะมีค่าเป็น 4.176 และ 14.967 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ส่วนโมเมนต์ที่ลำดับ ( $M_{-1}$ ) และ ( $M_{-3}$ ) มีค่าเป็น 12.845 และ 0.736

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง  $2.73 \times 10^{-3} - 8.74 \times 10^3$  โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.73 \times 10^{-3}$  โอห์ม-เซนติเมตร ที่  $x=0.05$  และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเป็น  $8.74 \times 10^3$  โอห์ม-เซนติเมตร ที่  $x=0.00$

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเจือมากขึ้นแต่ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึง  $x=0.02$  จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) เพิ่มขึ้น ส่วนสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือมากขึ้น

จากการวัดสภาพต้านทานเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  โดยที่  $x=0.02$  แสดงสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อ่อนสำหรับกระแสโฟโตชาขึ้นและกระแสโฟโตชาลง สามารถพิกกราฟได้ด้วยสมการมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ค่าช่วงชีวิตก่อนข้างยาวจำนวนหลายค่า แสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องผลึกประพุดิตัวเป็นกับดักพาหะซึ่งความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{16} - 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

## 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้เรียนรู้หลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ได้เรียนรู้การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
3. ได้เรียนรู้สมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและพารามิเตอร์ทางแสงต่าง ๆ โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว
4. ได้เรียนรู้สมบัติทางไฟฟ้าและสภาพต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางและสามารถที่จะวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ควรระวังอย่าให้ผิวหน้าของกระจกเป็นรอย เพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ควรทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ทุกครั้งก่อนการใช้งาน และหลังการใช้งานด้วยอะซิโตนให้สะอาด
3. การวัดค่าสมบัติต่างๆของต่างๆได้ฟิล์มบาง ควรตรวจสอบขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบางให้อยู่ในสภาพที่ดี หากขั้วไฟฟ้าหลุดจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณที่สูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีอีแคทีพดิสิตเตอร์ริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธ พันธุ์ Cds/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง Cds/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ Cds/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยนำเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อารี วิเชียรฉาย. 2543. “เครื่องมือวัดและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ.” เอกสารประกอบการเรียน. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นพณัฐ เดชะคำภู. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xTe_{1-x}$  โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ทศพร ขันตยากรณ์. 2557. “โครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มนตรี หาญโก๋ย. 2559. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดุสิต ถือมัน และ ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ. 2558. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Baban, C. and Rusu, G.I. 2011. “On the Structural and Optical Characteristics of CdSe Thin Films.” *Appl. Surface Sci.* 211: 6-12.
- Chen, Y. Wang, F. Xu, H. Ren, S. Gu, H. Wu, L. Wang, W. and Feng, L. 2017. “Properties of Indium Doped CdS Thin Films and Their Photovoltaic Application in CdTe Solar Cells.” *Chalcogenide Lett.* 14: 1-9.
- George, P.J. Sanchez, A. Nair, P.K. and Nair, M.T.S. 1995. . “Doping of Chemically Deposited Intrinsic CdS Thin Films to n Type by Thermal Diffusion of Indium.” *Appl. Phys. Lett.* 66: 10.1063/1.113808.
- Keaini, M. Bouguila, N. Timoumi, A. and Alaya, S. 2014. “Sn Doped  $\text{In}_2\text{S}_3$  Films Elaborated by Spray Technique.” *Sensors & Transducers.* 27:221-224
- Lee, J.H. Yi, J.S. Yang, K.J. Park, J.H. and Oh, R.D. 2003. “Electrical and Optical Properties of Boron Doped CdS Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition.” *Thin Solids Films.* 431–432: 344-348.
- Lin, L.Y. Yu, J.L. Cheng, S.Y. and Lu, P.M. 2015. “Influence of Ag and Sn Incorporation in  $\text{In}_2\text{S}_3$  Thin Films.” *Chin. Phys.B.* 7:078103. DOI:10.1088/1674-1056/24/7/078103.
- Lin, P.J. Lin, S. Cheng, S. Ma, J. Lai, Y.F. Zhou, H.F. and Jia, H.J. 2014. “Optical and Electrical Properties of Ag-Doped  $\text{In}_2\text{S}_3$  Thin Films Prepared by Thermal Evaporation.” *Adv. Mater. Sci. Eng.* 370861:4P.

- Lu, C.L. Zhang, L. Zhang, Y.W. Liu, S.Y. and Liu, G.X. 2014. "Fabrication of CdS/CdSe Bilayer Thin Films by Chemical bath Deposition and Electro Deposition, and Their Photo Electrochemical Properties." *Appl. Surface Sci.* 319: 278-284.
- Punitha, K. Sivakumar, R. Sanjeeviraja, C. and Ganesan, V. 2015. "Influence of Post-Deposition Heat Treatment on Optical Properties Derived from UV-Vis of Cadmium Telluride (CdTe) Thin Films Deposited on Amorphous Substrate." *Appl. Surface Sci.* 344: 89-100.
- Ramaiah, K.S. 1999. "Electrical Properties of In Doped CdS Thin Films." *J. Mater. Sci. Materials in Electronics.* 10: 291-294.
- Rao, B.S. Kumar, B.R. and Reddy, V.R. 2011. "Preparation and Characterization of CdS Nanoparticles by Chemical Co-Precipitation Technique." *Chalcogenide Lett.* 8:177-185.
- Sahay, P.P. Nath, R.K. and Tewari, S. 2007. "Optical Properties of Thermally Evaporated CdS Thin Films." *Cryst Res Technol.* 42: 275-280.
- Senthil, K. Mangalaraj, D. and Narayandass, S.K. 2001. "Structural and Optical Properties of CdS Thin Films." *Appl. Surface Sci.* 169-170: 476-479.
- Sze, S.M. 1981. *Physics of Semiconductor Devices.* 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley Sons, Inc.
- Wen, T.H. 1979. "Flash Evaporated Films of Indium-Doped CdS and CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>." *J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology.* 126: 1820-1822.
- Yadav, A.A. Barote, M.A. Chvan, T.V. and Masumdar, E.U. 2010. "Influence of Indium Doping on The Properties of Spray Deposited CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.8</sub> Thin Films." *J. Alloy and Comp.* 509:916-921.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-2306		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd S		2 $\theta$	I	h	k	l
Cadmium Sulfide		24.837	63	1	0	0
		26.535	45	0	0	2
		28.218	100	1	0	1
		36.662	25	1	0	2
		43.738	43	1	1	0
		47.864	41	1	0	3
		50.946	6	2	0	0
		51.890	31	1	1	2
		52.856	13	2	0	1
		54.844	2	0	0	4
		58.354	5	2	0	2
		60.912	2	1	0	4
		66.858	12	2	0	3
		69.359	8	2	1	0
		70.962	9	2	1	1
		72.472	4	1	1	4
		75.572	8	1	0	5
		75.689	5	2	1	2
		77.998	1	2	0	4
		80.359	4	3	0	0
		83.367	10	2	1	3
		85.434	4	3	0	2
		87.021	1	0	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.13600 c = 6.71300 Z = 2 M <sub>cell</sub> = 144.47 Volume [CD] = 96.45 D <sub>x</sub> = 4.824 M <sub>cell</sub> = 7.93		ICSD COLLECTION CODE : 060629 REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Falneco, Stevens REMARKS FROM ICSD : REM Barnes AueL. J. Phys. 1992,35 415 424. TEST FROM ICSD : At least one TF missing				
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 40, page 521, (1984) :						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้