

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารละลายของแข็งแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ที่  
เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ  
CHARACTERIZATION OF  $CdS_xSe_{1-x}$  SOLID SOLUTION THIN FILMS  
PREPARED BY VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD

มนตรี หาญโก๋ย

MONTREE HANKOY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-030-034

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารละลายของแข็งแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ที่  
เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ  
CHARACTERIZATION OF  $CdS_xSe_{1-x}$  SOLID SOLUTION THIN FILMS  
PREPARED BY VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD

มนตรี หาญโก๋ย  
MONTREE HANKOY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2562  
KMITL-2019-SC-M-030-034

CHARACTERIZATION OF  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  SOLID SOLUTION THIN FILMS  
PREPARED BY VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD

MONTREE HANKOY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-SC-M-030-034

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารละลายของแข็งแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
ชื่อนักศึกษา	นายมนตรี หาญโก้ย
รหัสประจำตัว	60605071
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสารละลายของแข็งแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ ( $CdS_xSe_{1-x}$ ) ที่ทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุอินเดียมซัลไฟด์ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และปรากฏระนาบ (002) เป็นระนาบที่โดดเด่น ทำการศึกษาบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้าและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ตรวจสอบองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ตรวจสอบโครงสร้างพันธะทางเคมีด้วยฟูเรียรทรานฟอร์มอนฟา เรดสเปกโตรสโคปี ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่ออิมพัลชันของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ITO/ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$  โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและวิธีแอคทีฟซีเอ็มทีรอนสปัตเตอริง ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีและอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

**คำสำคัญ :** ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในสุญญากาศ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แอมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี

<b>Title</b>	Characterization of $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ Solid Solution Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation Method
<b>Student Name</b>	Mr. Montree Hankoy
<b>Student ID</b>	60605071
<b>Degree</b>	Master of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

### Abstract

In this thesis, thin films of  $\text{In}_2\text{S}_3$ -doped cadmium sulfoselenide  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  were fabricated by vacuum thermal evaporation method on glass substrates at a vacuum of  $5 \times 10^{-5}$  mbar. XRD revealed that the all prepared films exhibited single phase with hexagonal wurtzite crystal structure with the preferred orientation of (002) plane. The surface morphology and elemental compositions of the films were studied by AFM, FESEM, EDS and XPS, respectively. The optical transmission spectra were investigated by means of UV-Vis spectroscopy in the range of 300-1000 nm. The optical band gap value of the films increased from 2.00 to 2.48 eV as composition of S increased from 0 to 1.0. The electrical properties were carried out by resistivity and Hall effect measurements with van der Pauw configuration. Moreover, we fabricated ITO/ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  heterojunction by vacuum thermal evaporation method and reactive DC magnetron sputtering. Electrical properties were performed by measuring the current – voltage and capacitance – voltage relation at room temperature. Finally, the admittance and impedance spectroscopies were studied at room temperature.

Keywords:  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  thin films, Vacuum thermal evaporation method, XRD, Admittance spectroscopy

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลุกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่าง ๆ

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุไฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน รวมถึงเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดมา

มนตรี หาญไก่อย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	7
2.2 โครงสร้างอุทมาคติ	8
2.3 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	9
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	9
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ II และ VI	10
2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	11
2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์	11
2.4.3 โครงสร้างแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์	12
2.4.5 โครงสร้างของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$ และ $\text{CuO}$	12
2.5 ผลึกจริง	14
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	14
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติและแบบเชิงเส้น	16
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	17
2.5.3.1 เกรตและขอบรอยต่อของเกรน	17
2.5.3.2 ผลึกแฝดและขอบรอยต่อของผลึกแฝด	18
2.5.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบผิดพลาด	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	19
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2.8 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	23
2.8.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	23
2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	25
2.9.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	25
2.9.2 การวัดความต้านทานแผ่นสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาร์	26
2.9.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์	27
2.10 รอยต่อพี-เอ็น	31
2.10.1 บริเวณพร่องพาหะ	31
2.10.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน	38
2.10.2 ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	38
2.10.2.1 สมการของชอกเคิลีย์ในกรณีอุดมคติ	43
2.10.3 กระบวนการเกิด-การรวมตัวกันของพาหะอิสระ	43
2.10.4 ความจุแพร่ซึม	46
2.11 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์	49
2.11.1 กลไกการรวมตัวกันของพาหะที่บริเวณประจุค้าง	50
2.11.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์	51
2.12 อิทธิพลของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์	53
2.13 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	55
2.14 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิกอน	57
2.15 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ	58
2.16 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ	61
2.16.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี	61
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	63
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย	65
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	65
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $CdS_xSe_{1-x}$ )	66
$0.99(In_2S_3)_{0.01}$	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้	66
3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	66
3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)	67
3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	67
3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	68
3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง	68
3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	68
3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง	69
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	70
3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq X \leq 1$ )	70
3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	72
3.2.3 การศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	74
3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง	74
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค	75
3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค	75
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	75
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R$ ) ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) และ	75

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร ( $\rho_B$ ) ด้วยวิธีสองขั้ว	
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	77
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสาร $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	82
4.2.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสาร $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	83
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสาร $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	85
4.2.5 ผลการศึกษาสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสาร $CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	87
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	91
4.3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	91

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลการศึกษาฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	96
4.3.3 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง จากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน แสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	98
4.3.4 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลอง ออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	101
4.3.5 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	105
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	108
4.4.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	108
4.4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	111
4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$	119

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	
4.4.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางทางสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ ) <sub>0.09</sub> ( $\text{In}_2\text{S}_3$ ) <sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	132
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$	133
4.5.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่ อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$	144
4.5.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องในช่วงความถี่ 10 ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของ ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$	152
4.5.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับ ความถี่เมื่อการแรงดันไบแอสไฟฟ้าในช่วง -4 ถึง 4 โวลต์ ที่อุณหภูมิในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$	159
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	168
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	171
เอกสารอ้างอิง	173
ภาคผนวก	177
ประวัติผู้เขียน	181

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ $\text{In}_2\text{S}_3$ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe}_{1-x}\text{S}_x)_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
4.1	แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81
4.2	แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	83
4.3	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	86
4.4	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	90
4.5	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน และค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก CdS, CdSe และ $\text{In}_2\text{S}_3$ มีความบริสุทธิ์สูง 99.99, 99.995 และ 99.999% ตามลำดับ	94
4.6	แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	97

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.7	แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	104
4.8	แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	110
4.9	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	118
4.10	แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน(NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ $x = 0.0$ และ $0.2$	127
4.11	แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ $x = 0.0$ และ $0.2$	127
4.12	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอพโรส-ชลอปสกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ $x = 0.0$ และ $0.2$	127
4.13	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างของอิเล็กตรอนประจำถิ่นอย่างอ่อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0	129

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.14	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ค่าפקเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> :In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /ZnO/Cu <sub>2</sub> O	139
4.15	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> :In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /ZnO/Cu <sub>2</sub> O	147
4.16	แสดงค่านำไฟฟ้าสูงสุด G <sub>max</sub> /ω ที่แรงดันไฟฟ้า 4 โวลต์ ความจไฟฟ้าสูงสุด C <sub>m</sub> ความจุบริเวณชั้นออกไซด์ C <sub>OX</sub> และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D <sub>it</sub> ) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> :In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /ZnO/Cu <sub>2</sub> O	157
4.17	ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS <sub>0.5</sub> Se <sub>0.5</sub> :In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /ZnO/Cu <sub>2</sub> O	163

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	7
2.2	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ	9
2.3	แสดงพันธะสีหน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	10
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	11
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	11
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.7	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$	13
2.8	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{CuO}$	14
2.9 ก.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่	15
2.9 ข.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่	15
2.9 ค.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก	15
2.9 ง.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่	15
2.10	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอตตักีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล	16
2.11	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	16
2.12	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	17
2.13	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน	17
2.14	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด	18
2.15	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	18
2.16	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	19
2.17	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	21
2.18	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2.19	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	23
2.20	แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	25
2.21	แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	27
2.22 ก.	การกระจายตัวของประจุบริเวณพ้องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพ้องพาหะ)	31
2.22 ข.	การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า	31
2.22 ค.	การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ $\psi_{bi}$ เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ	31
2.23 ง.	โครงสร้างแถบพลังงาน	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.23	แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะและความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ ( $\psi_{bi}-V-2KT/q$ ) สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉับพลันในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน	35
2.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2-V$ ซึ่งจะทำได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	36
2.25 ก.	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอไซ-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ทรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขไบแอสตรง	39
2.25 ข.	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอไซ-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ทรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง	39
2.26 ก.	แสดงการกระจายตัวของพาหะและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับไบแอสตรง	41
2.26 ข.	แสดงการกระจายตัวของพาหะและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับไบแอสกลับทาง	41
2.27 ก.	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติกราฟเชิงเส้น	42
2.27 ข.	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติกราฟกึ่งลอการิทึม	42
2.28	ลักษณะกระแส – แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน	44
2.29	แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร์ซิมและความนำแพร์ซิมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง	47
2.30	แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> ที่แปรตามอุณหภูมิ	48
2.31 ก.	แสดงกลไกผลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดยรอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	50
2.31 ข.	แสดงกลไกผลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดยรอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	50
2.32	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ $J_0$ และแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนัลและเมื่อผ่านการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl <sub>2</sub>	51
2.33 ก.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุลเมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V=0) กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	54
2.33 ข.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุลเมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V=0) กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	54
2.34 ก.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิดบริเวณซุนุมพาหะ	55
2.34 ข.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิดบริเวณพร่องพาหะ	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.34 ค.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิดบริเวณชั้นกลับกลาย	55
2.35	แสดงพาหะที่เกิดการออกซีไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	56
2.36	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	56
2.37 ก.	แสดงวงจรสมมูลที่มี $C_{it}$ และ $R_{it}$ ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย	57
2.37 ข.	แสดงวงจรสมมูลที่มี $C_{it}$ และ $R_{it}$ ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย	57
2.37 ค.	แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ	57
2.37 ง.	แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง	57
2.38 ก.	แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS	58
2.38 ข.	แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ $\psi_s$	59
2.39	แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	61
2.40	แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CdS_xSe_{1-x}$	62
2.41	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CdS_xSe_{1-x}$	62
2.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $hv$ ของฟิล์มบาง $CdS_xSe_{1-x}$	63
3.1	ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	65
3.2	ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	66
3.3	ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He $\lambda$ ios $\alpha$ )	66
3.4	ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	67
3.5	ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	67
3.6	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	68
3.7	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	68
3.8	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	73
3.9	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	74
3.10	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	แสดงผลึกของสารสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.2	แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.3	แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	79
4.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก $a_H$ และ $c_H$ กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
4.5	แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	82
4.6	แสดงภาพถ่าย FESEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	84
4.7	แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	85
4.8	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	87
4.9	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	88
4.10	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 50-68 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	88
4.11	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 159-165 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	89

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 440-460 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	89
4.13	แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	91
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS, CdSe และ $\text{In}_2\text{S}_3$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99, 99.995 และ 99.999% ตามลำดับ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	92
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\ln \alpha)$ กับ พลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) เพื่อหาค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	93
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนหางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	94
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	95
4.18	กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 500 – 4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	96
4.19	แสดงหน้าตาของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	98

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบาง สารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	99
4.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	100
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	101
4.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	105
4.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	105
4.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	106
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
2.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทาน จากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	109
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มี	111



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
	ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
4.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 114
4.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 115
4.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 115
4.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 116
4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 116
4.40	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 118
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln$ กับค่า $1000/T$ , ค่า $\ln(T^{1/2})$ กับค่า $T^{(-1/4)}$ และ ค่า $\ln(T)$ กับค่า $T^{(-1/2)}$ ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.09}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 119

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
	โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ $x = 0.0$
4.42	120
	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln$ กับค่า $1000/T$ , ,ค่า $\ln(T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางข้างสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ $x = 0.2$
4.43 ก.	126
	แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโต
4.43 ข.	126
	แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
4.43 ค.	126
	แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่
4.44 ง.	126
	แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอพโรส-ชลอปสกี
4.44	130
	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\rho$ และ $T$ ของฟิล์มบางข้างสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ $x = 0.4, 0.6, 0.8$ และ $1.0$ ตามลำดับ
4.45	132
	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ( $I_p$ ) กับเวลา ( $t$ ) ของฟิล์มบางข้างสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.09}(In_2S_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
4.46	134
	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$
4.47	134
	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$
4.48	137
	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$
4.49	138
	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ $I$ (A) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.50	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)(V)$ กับ $I$ (A) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	138
4.51	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่	141
4.52	แสดงการหาค่า $E_{00}$ โดยการพิศกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	141
4.53	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	142
4.54	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	142
4.55	แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	143
4.56	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	144
4.57	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	144
4.58	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	145
4.59	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	145
4.60	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	146

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.61	แสดงวงจรมูลของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	146
4.62 ก.	แสดงตัวอย่างการพิกกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปกับวงจรมูลที่ใช้ศึกษาของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$ ที่แรงดันไบแอส 0.2 โวลต์	147
4.62 ข.	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่วัดได้กับค่าทางทฤษฎีของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$ ที่แรงดันไบแอส 0.2 โวลต์	147
4.63	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ $C_1$ และ $C_2$ และค่าความจุของกัปดักพาหะ ( $C_T$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	150
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้นที่ $R_1$ และ $R_2$ และค่าความต้านทานชั้นของกัปดักพาหะ ( $R_T$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	150
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา $\tau_1$ และ $\tau_2$ และค่าคงตัวของเวลาของกัปดักพาหะ ( $\tau_T$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	151
4.66	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะ ( $N_T$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	151
4.67	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	152
4.68	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	153
4.69	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $G/\omega$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	153
4.70	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออิมพีแดนซ์	154

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
	$CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	
4.70	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	154
4.71	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{ADJ}$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	156
4.72	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $G_{ADJ}$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	156
4.73	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{OX}$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	157
4.74	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $R_S$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	157
4.75	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $D_{it}$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	158
4.76	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	160
4.77	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	160
4.78	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	161
4.79	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	161
4.80	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	162

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.81	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln\omega$ กับความถี่ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	162
4.82	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$ ที่ได้จากการพลความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln\omega$ กับความถี่	163
4.83	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$ ที่ได้จากการพลความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'-Z''$	164
4.84	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $N_t$ กับพลังงาน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	165
4.85	แสดงแผนภาพ ของแถบพลังงาน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$	167

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) นอกจากเป็นธาตุบริสุทธิ์ในหมู่ IV เช่น Si และ Ge แล้ว ยังมีสารประกอบอีกจำนวนมากที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบที่มีโครงสร้างผลึกที่เกิดจากพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) เช่นสารประกอบในกลุ่ม III-V และกลุ่ม II-VI ได้รับความสนใจในการศึกษา วิจัย และพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมานานแล้ว ทั้งนี้เพราะสารประกอบกลุ่มนี้สามารถนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [1] อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [2] อย่างแพร่หลาย รวมทั้งยังมีสมบัติการเรืองแสง (phosphor) ที่มีประสิทธิภาพสูง [3] และยังสามารถทำให้เรืองแสงได้สีต่าง ๆ รวมทั้งมีช่วงเวลาของการลดการส่องสว่าง (luminescence decay time) ที่เหมาะสม [4] และยังมีเสถียรภาพที่ดีในสภาวะที่สารถูกกระตุ้น ดังนั้นจึงได้มีการนำสารในกลุ่มนี้มาประยุกต์และใช้งานในเชิงพาณิชย์มากยิ่งขึ้น สารประกอบกลุ่ม II-VI ประกอบด้วยธาตุในหมู่ II (Zn, Cd, Hg) และธาตุในหมู่ VI (S, Se, Te) ของตารางธาตุ ซึ่งได้แก่ ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, HgS, HgSe และ HgTe พันธะของสารประกอบกลุ่มนี้มีสมบัติอยู่ระหว่างพันธะเชิงไอออนิก (ionic bond) ในกลุ่ม I-VII กับพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ในธาตุของสารกึ่งตัวนำหมู่ IV จึงทำให้สารกึ่งตัวนำในหมู่ II-VI นี้มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างที่มีค่าอยู่ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานของฉนวนและสารกึ่งตัวนำ [5] ด้วยเหตุที่สารกลุ่มนี้มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างและเป็นแถบพลังงานแบบตรง [6] นี้เองที่ทำให้สารกลุ่ม II-VI ได้รับความสนใจในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสง (optoelectronic properties) [7] ตัวอย่างเช่นปรากฏการณ์การส่องสว่างเชิงไฟฟ้าที่เกิดจากการกระตุ้นของพาหะข้างมากและที่เกิดจากการฉีด (injection) ของพาหะข้างน้อย [8] และปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (photovoltaic) [9-10]

สารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความโดดเด่นต่อการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [11] เนื่องจากมีชนิดการนำไฟฟ้าแบบเอ็น (n-type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง [12-13] สามารถที่จะปรับแต่งค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้ตั้งแต่ 1.73 อิเล็กตรอนโวลต์ (ในกรณีของ CdSe) จนถึง 2.44 อิเล็กตรอนโวลต์ (ในกรณีของ CdS) [14] ขึ้นกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ซึ่งสเปกตรัมของพลังงานคลอบคลุมเกือบตลอดช่วงของแสงย่านตามองเห็นได้ สารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง สภาพคล่องพาหะอิสระที่ค่อนข้างสูง [15] ประกอบด้วยธาตุมีเลขอะตอมที่สูงกว่าซิลิคอนซึ่งเหมาะกับการนำเอาไปประดิษฐ์เป็นเซลล์ตัวบน (top cell) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเต็มได้เป็นอย่างดี [16] การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  ทำให้มีโครงสร้างระดับไมโครเมตร และระดับนาโนเมตรสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธีทั้งทางด้านเคมี และทางด้านฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเช่น การ

เคลือบด้วยไอเคมีแบบพุ้งกระจาย (aerosol assisted chemical vapor deposition, AACVD) [17] เทคนิคการอบสารละลายเคมี (chemical bath deposited, CBD) [18] เทคนิคเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี (electro-chemical deposited) [19] เทคนิคการเคลือบด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition, CVD) [20] และ เทคนิคระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (vacuum thermal evaporation method, TE) [21] เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งในขณะที่ทำการระเหยสารเคมีจะทำการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการระเหยสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศต่ออีก 30 นาที จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่าน UV เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญ และยังใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงย่านรังสีอินฟราเรดเพื่อศึกษาโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอมในฟิล์มบาง ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง และวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 300-20 เคลวินตลอดจนทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อทำการคำนวณหาค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

นอกจากนี้ ยังได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อชนิดวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe:In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยอินเดียม (ITO) โดยที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdSSe:In}_2\text{S}_3$  จะเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO และ CuO เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง

- 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้
  3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
  4. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ด้วยเทคนิค EDS และเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้
  5. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
  6. เพื่อศึกษาและคำนวณหาพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการจำลองแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
  7. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดสเปกตรัมของการส่งผ่านแสงในย่านรังสีอินฟราเรด ด้วยเทคนิค FTIR และทำการตรวจสอบโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอม ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้
  8. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง รวมทั้งสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน
  9. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสงจากหลอดไฟฮาโลเจน ELH และทำการคำนวณค่าชีวิตของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้
  10. เพื่อศึกษาวิธีการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe:In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (ITO)
  11. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe:In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) โดยที่มีค่าเศษส่วนโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ตลอดจนศึกษาสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-CuO}$  โดยที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdSSe}:\text{In}_2\text{S}_3$  เตรียมด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO และ CuO เตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์ม  $n\text{-CdSSe}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-CuO}$  โดยทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) โดยที่มีค่าเศษส่วนโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
3. ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
4. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
5. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
6. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่ง

- ตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
7. ทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อนำไปหาค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
  8. ทำการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความยาวแสง
  9. ทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมีและการเกิดพันธะทางเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
  10. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และสภาพต้านทานไฟฟ้า
  11. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและทำการคำนวณค่าชีวิตของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
  12. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe:In}_2\text{S}_3/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (ITO) โดยที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdSSe:In}_2\text{S}_3$  เตรียมด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{ZnO}$  และ  $\text{Cu}_2\text{O}$  เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
  13. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe:In}_2\text{S}_3/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้
  14. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอะตอมธาตุ S ที่เข้าแทนที่อะตอมของธาตุ Se ในโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdSe}$  ที่มีต่อสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้

3. ทำให้ทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้
4. ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความยาวแสง โดยการจำลองแบบจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต และย่านที่ตามองเห็นได้ โดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงหลายลำผ่านตัวกลางโปร่งแสงหลายชั้นซ้อนกัน
5. กราฟความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวข้างต้นจะนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงอื่น ๆ ได้อีก โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวที่เสนอโดยแวมเพิล และโดโตเมนิโค
6. ทำให้ทราบสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางไฟฟ้าทางแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เตรียมได้ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์
7. ทำให้ทราบวิธีการเคลือบฟิล์มบางของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เคลือบลงฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (ITO)
8. ทำให้ทราบถึงสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdSSe}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมได้ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์
9. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการทำวิจัย เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไปได้

## บทที่ 2

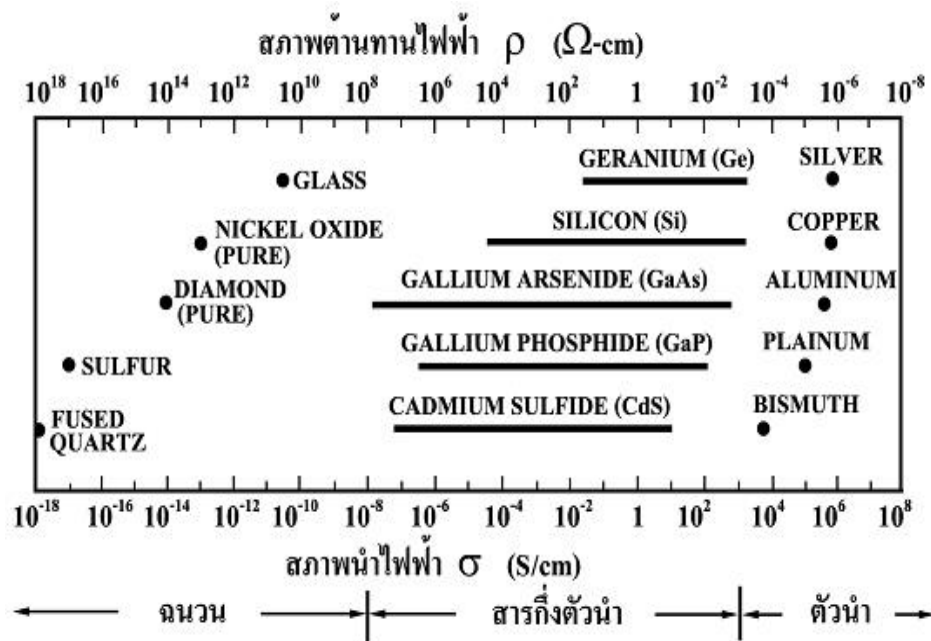
### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการที่ใช้ในการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

#### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) [22-25]

วัสดุในสถานะของแข็งจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน (Insulator) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และตัวนำ (conductor) จะพบว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากมีสมบัติพิเศษอื่น ๆ ที่แตกต่างจากวัสดุที่เป็นฉนวนและตัวนำ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน โดยพบว่าวัสดุที่ฉนวน เช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง  $10^{-18}$  ถึง  $10^{-8}$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำ ยกตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียม เงิน และ โลหะจะมีสมบัติความเป็นตัวนำที่ดี โดยวัสดุที่เป็นตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าสูงโดยทั่วไปอยู่ในช่วง  $10^3$  ถึง  $10^8$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.1



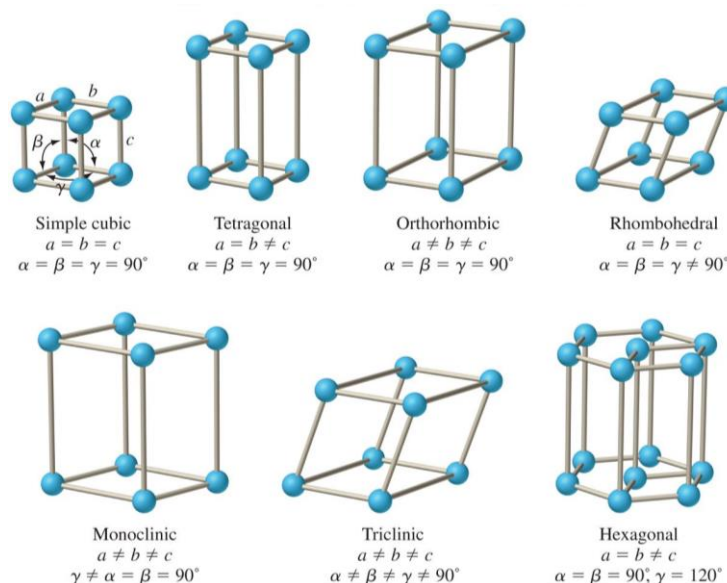
รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

และนอกจากนี้สารกึ่งตัวนำยังมีสมบัติที่แตกต่างจากสารอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

1. สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ (thermistor action) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามอุณหภูมิที่เป็นลบ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะลดลง
2. มีสมบัติในการยอมให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านทางเดียวหรือเปลี่ยนกระแสไฟสลับให้เป็นกระแสไฟตรง (rectifying effect)
3. สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือหรืออาจกล่าวได้ว่าสารเจือทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป
4. เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป (อาจจะเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป
5. เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนจะทำให้กำลังงานทางไฟฟ้าสูง (high thermoelectric power)
6. จะคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบสี่หน้า (tetrahedral bond) ถึงแม้ว่าลักษณะขงหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกจะแตกต่างกันไปก็ตาม

## 2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [22-36]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้น ๆ มารวมกันอยู่กันเป็นจำนวนมากโดยที่ระยะห่างระหว่างอะตอมที่มีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนและเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก ทั้งนี้อาจจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายอะตอม ๆ อะตอมหรือหลาย ๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่จะสามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้านำหน่วยเซลล์นี้มาทำการเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียงตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบที่ระบบสามมิติว่า โครงสร้างผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเซลล์ที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงสร้างผลึก 3 มิติดังรูปที่ 2.2 ในระบบสามมิติพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $a$   $b$  และ  $c$  และมุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสาม ชนิดของโคลงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีอยู่ 7 รูปแบบ คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนัล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)



รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ

## 2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [22-36]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นอยู่กับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุให้ชัดเจนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.3.1 การระบุตำแหน่ง

1. กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$  การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[uvw]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(hkl)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า  $hkl$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบ หรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
  - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น  $(x,y,z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ ( $\infty$ ) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น

3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ

3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

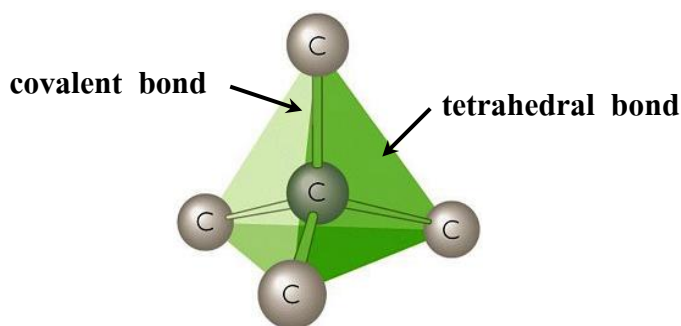
สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hkil) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลระนาบ(110) จะเรียกว่า  $(11\bar{2}0)$  นอกจากนี้มักพบว่าสำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีมิลเลอร์เหมือนกันนั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

## 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI [22-27, 30-36]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอมA) และกลุ่ม VI (อะตอมB) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)

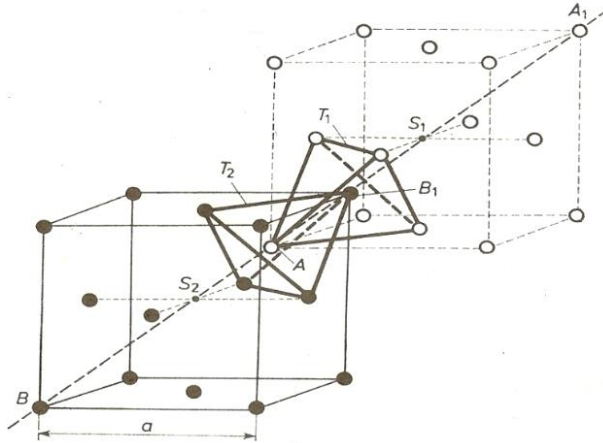


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

### 2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ

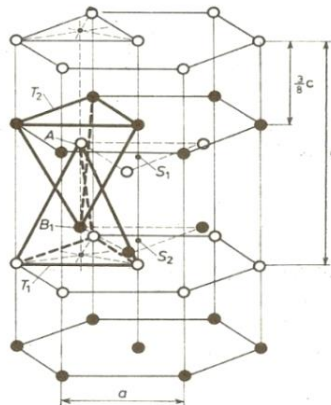
$a$  และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_2$  (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว  $A_1B_1$  ดังนั้นจะได้ระยะ  $AB = \frac{1}{4} AA_1 = \frac{1}{4} BB_1$  ฐานของพื้นที่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและหมุนทำมุม  $60^\circ$  อดรอบแกน  $A_1B_1$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

#### 2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์แสดงในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเอกซโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และ  $c$  มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  และ  $s_2$  เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน  $c$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{3}{8} c = \sqrt{\frac{3}{8}} a$  ฐานพื้นที่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน  $c$



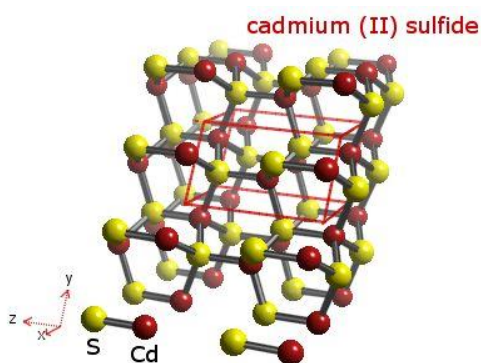
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

### 2.4.3 โครงสร้างของแคดเมียมซัลไฟด์

โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ทไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

### 2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างผลึกของเพชร โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างที่โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ  $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จะเกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S ตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

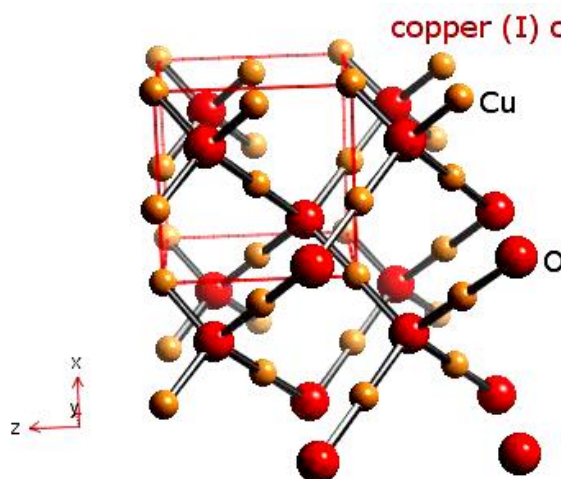


รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์

### 2.4.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$ และ $\text{CuO}$

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากซึบแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (BCC) ของอะตอมออกซิเจนกับซึบแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ของอะตอมของธาตุ Cu ซึบแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกันโดยที่แลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทแยงมุมของซึบแลตทิซแรกเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ของความยาวเส้นทแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอม

ของธาตุ O จำนวน 2 อะตอมรูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อราเคยนำไปใช้ทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



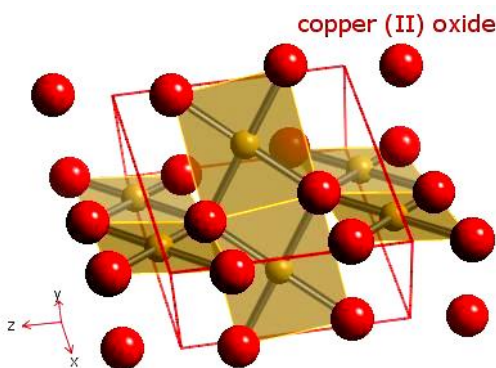
รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$

สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีสีแดงพบได้ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมนอคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  จะมีลักษณะ โดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็ว ในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนेट อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ  $\text{CuO}$  สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ  $\text{CuO}$  ให้เป็นส่วนผสมทำไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจแก้สรีรวิทยาต่างๆ

และฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือ เพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ  $3d^9$  ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง [37]

รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ  $\text{CuO}$  ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$



รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$

## 2.5 ผลึกจริง [22-36]

ที่ผ่านมาพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่าผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปทรงเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

### 2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 ดังนี้

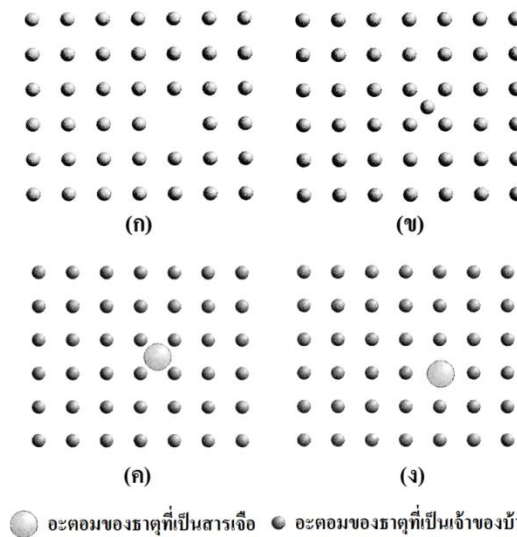
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่ (self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน (host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก (interstitial impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ (impurity atom) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่าง

อะตอมของโครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurityatom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



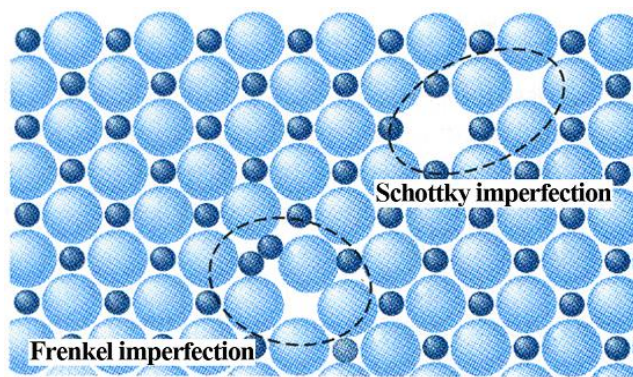
รูปที่ 2.9 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของ ผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก – ไอออนลบ (cation–anion divacancy)

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของ ผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)



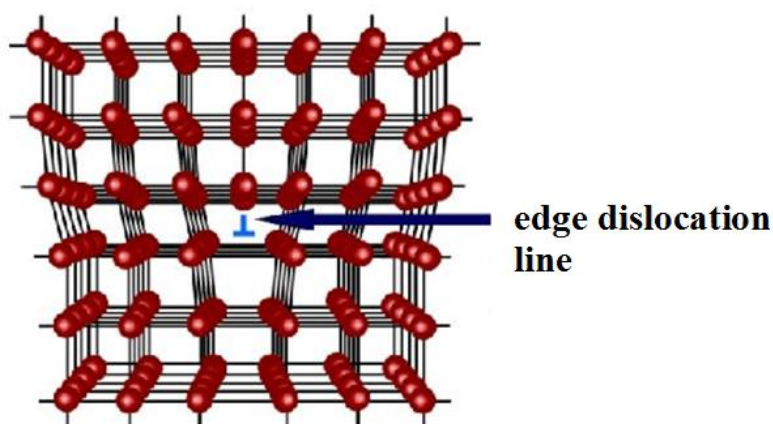
รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

### 2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

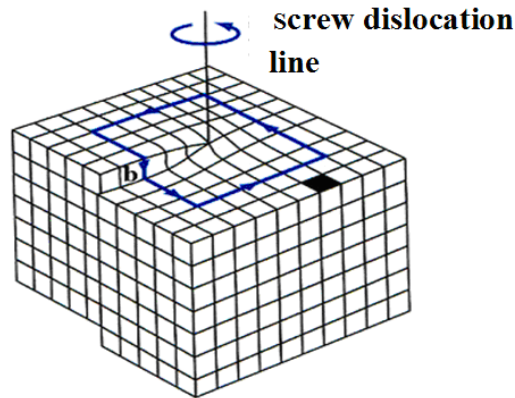
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเชิงเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector :  $\vec{b}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด นั้นเรียกว่า เบบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



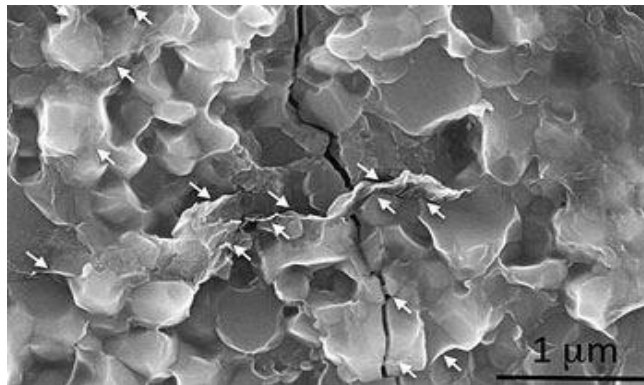
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

### 2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มักเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface- imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

#### 2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

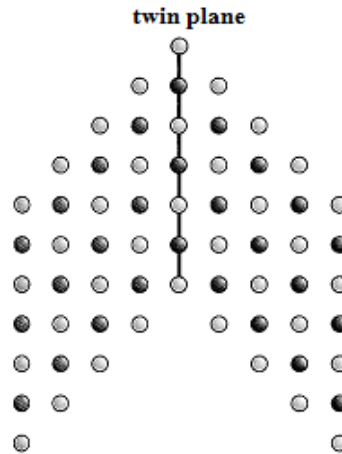
เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่าบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธุ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธุ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)



รูปที่ 2.13 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

#### 2.5.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

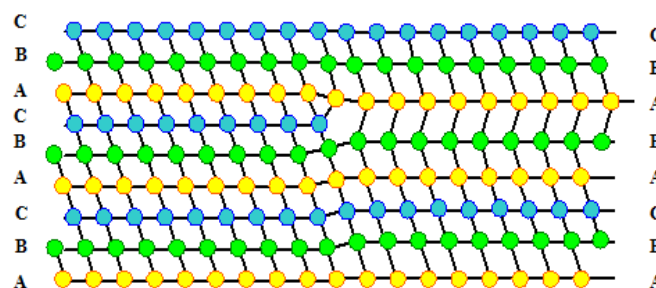
ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

### 2.5.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงผลึกอุดมคติแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดพลาดจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด

## 2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [22-27]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบ

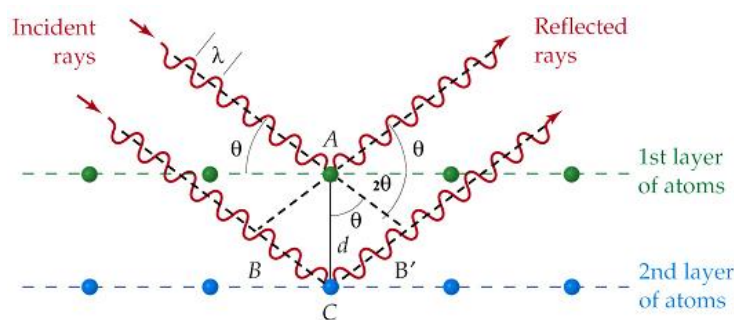
ใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทาง ฟิสิกส์ อื่น ๆ ต่อไป

ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ  $10^{-10}$  เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วย อะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวบนระนาบต่าง ๆ ของโครงผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์พ่อลูกตระกูลแบรกก์คือ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบรกก์ (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.2)

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

- เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก  
 $2\theta$  คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน  
 $n$  คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.16 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ( $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้

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

จากสมการที่ (2.2) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.3) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก(a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.4)$$

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล

( $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

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

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.2) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.5) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a,c) เมื่อทราบขนาดมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.6)$$

นอกจากนี้เรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพร่องการจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (stacking fault probability) ขนาดของเกรน (D) และความเครียด ( $\epsilon_s$ ) เราสามารถหาได้จากสมการ

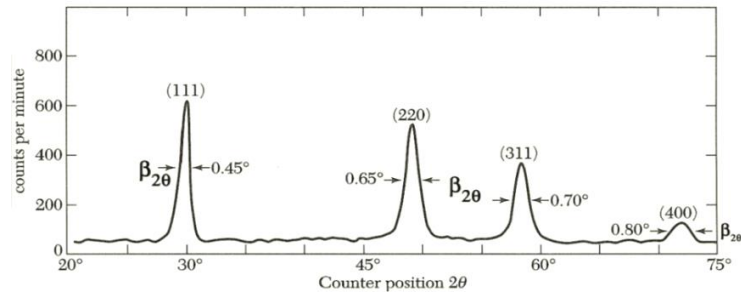
$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.8)$$

เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	$\beta$	คือ	ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (full width at half maximum : FWHM)
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	$\epsilon_s$	คือ	ความเครียด

จากสมการที่ (2.8) ถ้าเราให้  $\sin \theta = 0$  แล้วเราจะสามารถหาของเกรนได้ ส่วนขนาดของความเครียดสามารถหาได้จากกราฟความชันของกราฟระหว่าง  $\beta \cos \theta$  และ  $\sin \theta$  จำนวนของดิสโลเคชันในหน่วยพื้นที่ หรือที่เราเรียกว่า “ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน ( $\gamma$ )” จะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.9)



รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

$$\gamma = \frac{c}{D^2} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\gamma$  มีหน่วยเป็น  $\text{line}/\text{m}^2$ ,  $D$  มีหน่วยเป็น  $\text{m}$  และ  $C$  เป็นค่าคงที่ที่ทำความหนาแน่นของดิสโลเคชันมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เราให้มีค่าเท่ากับ 1

ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults,  $S_f$ ) หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)

$$S_f = \frac{2\pi^2\beta}{45(3\tan\theta_{hkl})^{1/2}} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\beta$  คือความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)

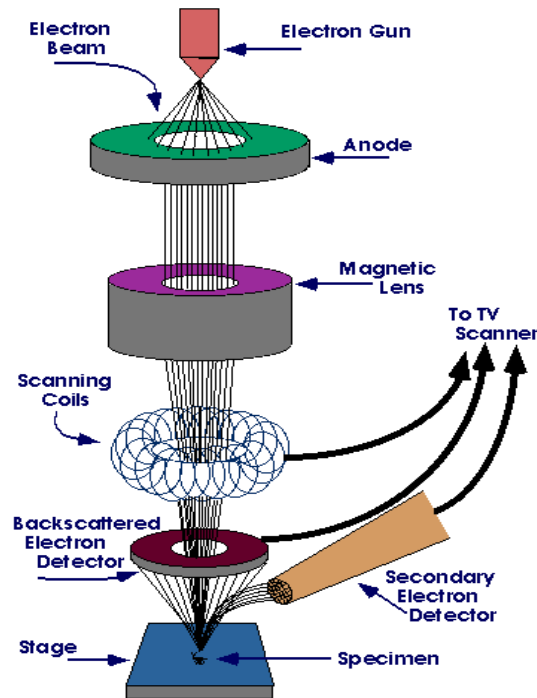
$\theta_{hkl}$  คือมุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงสุดในงานวิจัยนี้คือ  $\theta_{002}$

## 2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [28]

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

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

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



รูปที่ 2.18 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

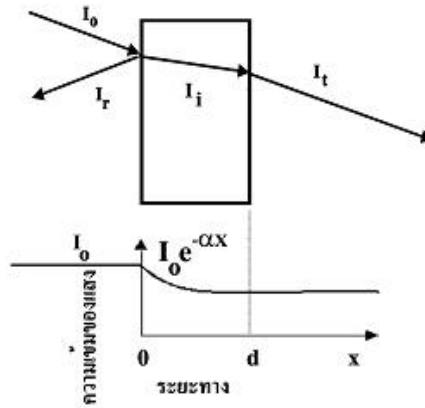
ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผกผันตรงกับ  $i_p$  แต่ผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $i_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

## 2.8 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [29-35]

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap:  $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.8.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  มีนิยามดังนี้

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.12)$$

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า  $R$  มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

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

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.13)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรง คือ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.14)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียง คือ

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.15)$$

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

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

## 2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง [30-36]

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่ มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

### 2.9.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระ ตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.16)

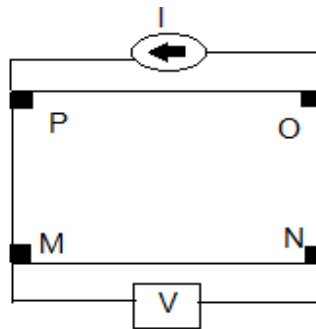
$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} \quad (2.16)$$

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

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

## 2.9.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.20 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.17)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.17)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.18)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.18)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.19)$$

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

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.20)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.21)$$

#### 2.9.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{n e \mu_e} \quad (2.22)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{p e \mu_p} \quad (2.23)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

$\mu_e$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

นั่นคือ หากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือ

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

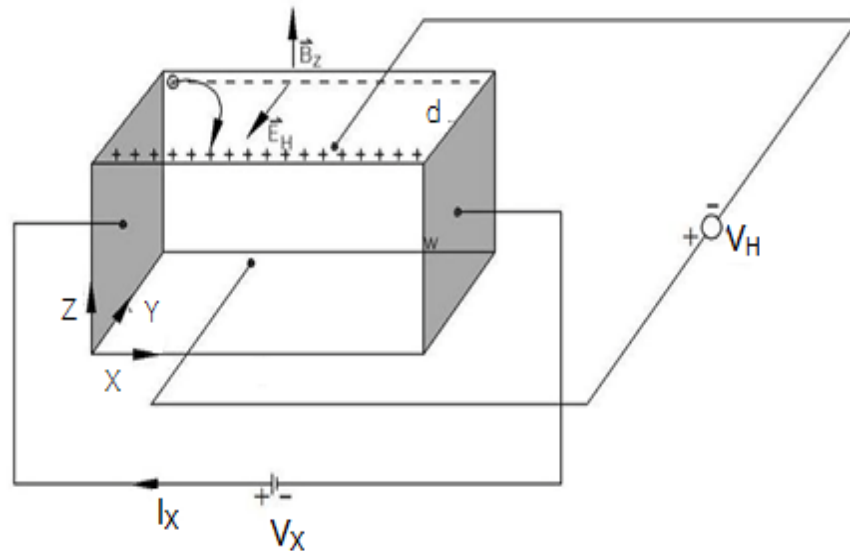
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.25)$$

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.26)$$

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



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $V_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.27)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.27)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_x = qnv_x(wd) \quad (2.28)$$

$$\text{จากกฎของโอห์ม} \quad V = IR \quad (2.29)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.30)$$

$$\text{จากรูปที่ 2.18} \quad A = w \cdot d \quad (2.31)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.28) และ (2.29) และ (2.31)

$$\rho = \frac{v_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{v_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.32)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall Voltage :  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วย แรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.33)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ  $x$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.34)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.34) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.35)$$

เมื่อ 
$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.36)$$

แล้ว 
$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.37)$$

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

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.38)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.39)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x \cdot B_z}{V_H \cdot qd} \quad (2.40)$$

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

$$\tau = \tau(E) \quad (2.41)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.42)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.43)$$

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

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.44)$$

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

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B=\infty)} \quad (2.45)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่จากสมการที่ (2.39) และ (2.40) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r\mu \quad (2.46)$$

หรือจากสมการที่ (2.37) และ (2.42)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.47)$$

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

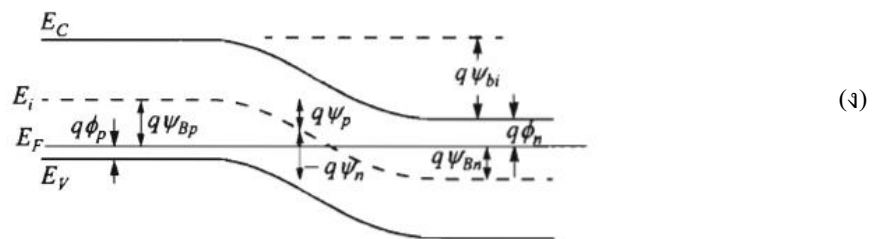
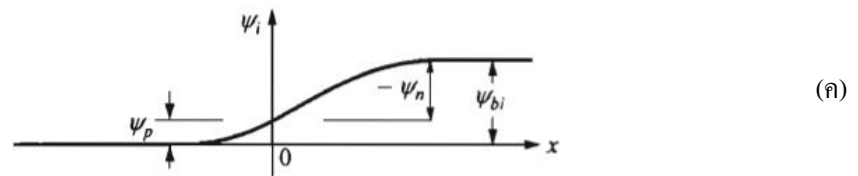
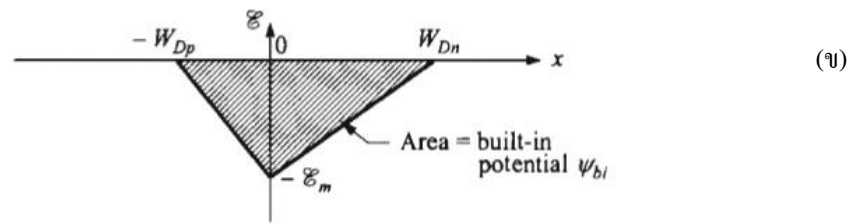
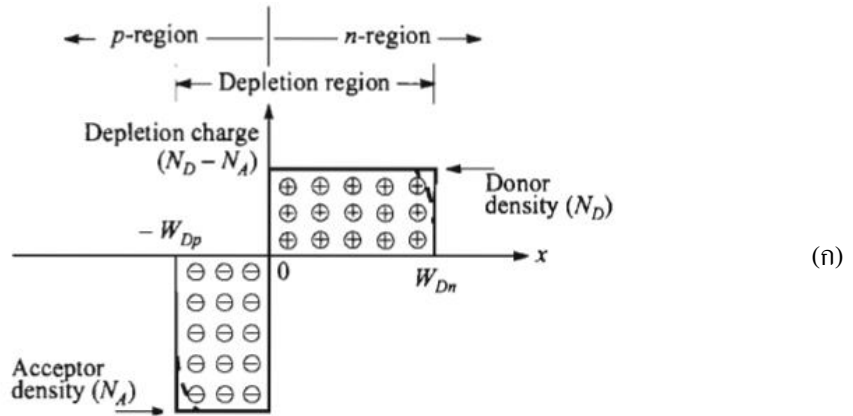
## 2.10 รอยต่อพี-เอ็น [22-27, 30-32, 36]

รอยต่อพี-เอ็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็นเป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็นได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอว์คีย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ซาห์ (Sah), นอยซี(Noyce), ชอว์คีย์(Shockley) และมอลล์(Moll) ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการเช่น การเกิดและการรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุที่บริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานอนุกรมเป็นต้น รอยต่อพี-เอ็นเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้วโดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิตของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็นมีสมบัติการเรียงกระแส กล่าวคือยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียวซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดชนิดต่าง ๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด อะวาลานซ์ไดโอด PIN ไดโอด วาริสเตอร์ และวาร์เรกเตอร์ เป็นต้น

### 2.10.1 บริเวณพร่องพาหะ ( depletion region )

#### 2.10.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน ( abrupt junction )

เมื่อความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จากสารเจือผู้รับ ( $N_A$ ) ไปยังสารเจือผู้ให้ ( $N_D$ ) แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 (ก) ผลที่ได้รับทำให้เกิดรอยต่อฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้า  $N_A \gg N_D$  ( หรือในทางกลับกัน ) ผลที่ได้รับจากรอยต่อฉับพลันทำให้เกิด  $p^+-n$  ( หรือ  $n^+-p$  )



รูปที่ 2.22 แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉบับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน

- ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)
- ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า
- ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่  $\psi_{bi}$  เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ
- ง. โครงสร้างแถบพลังงาน

ก่อนอื่นต้องพิจารณาสภาวะสมดุลทางความร้อนขณะที่ไม่มีแรงดันไบแอส กระแสพัดพาและกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้คือ

$$J_n = 0 = q\mu_n \left( n\xi + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) = \mu_n n \frac{dE_F}{dx} \quad (2.48)$$

หรือ

$$\frac{dE_F}{dx} = 0. \quad (2.49)$$

กระแสของโฮลก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ

$$J_p = 0 = \mu_n p \frac{dE_F}{dx} \quad (2.50)$$

ดังนั้นเงื่อนไขของกระแสโฮล และอิเล็กตรอนสุทธิขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ จะต้องกำหนดให้ระดับพลังงานเฟอร์มิคิงที่ตลอด ศักย์ตกคร่อมรอยต่อหรือศักย์แพร์ซิม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.22 (ข), 2.22 (ค) และ 2.22 (ง) มีค่าเท่ากับ

$$q\psi_{bi} = E_g - (q\phi_n + q\phi_p) = q\psi_{Bn} + q\psi_{Bp} \quad (2.51)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำอนดีเจนเนอเรต (non-degenerate semiconductor)

$$\begin{aligned} \psi_{bi} &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_{no}}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{P_{po}}{n_i}\right) \\ &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \end{aligned} \quad (2.52)$$

ที่สภาวะสมดุลความร้อน  $n_{no} p_{no} = n_{po} p_{po} = n_i^2$

$$\psi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{P_{po}}{P_{no}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_{no}}{n_{po}}\right) \quad (2.53)$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพาหะข้างมาก และพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแต่ละข้างของรอยต่อ ถัดไปเราจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า และการกระจายศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ โดยการประมาณว่าประจุบวกและประจุลบที่อยู่เฉพาะภายในบริเวณพร่องพาหะและจะอยู่แยกกันคนละด้านของบริเวณพร่องพาหะอิสระ ส่วนบริเวณที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะจะถือว่าเป็นสนามไฟฟ้ามืดค่าเป็นศูนย์ ประจุลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านพีจะต้องเท่ากับประจุบวกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านเอ็นดังสมการ

$$N_A W_{Dp} = N_D W_{Dn} \quad (2.54)$$

จากสมการปัวซอง (equation Poisson) จะได้ว่า

$$-\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = \frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} [N_D^+(x) - n(x) - N_A^-(x) + p(x)] \quad (2.55)$$

ภายในบริเวณพร่องพาหะ,  $n(x) \approx p(x) \approx 0$ , แล้วสมมติว่าเกิดการไอออไนซ์ที่สมบูรณ์,

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_A}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.56ก.)$$

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_D}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.56ข.)$$

สนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการรวมสมการข้างต้น (2.56ก) รวม (2. 56ข) ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.22(ข):

$$\xi(x) = -\frac{qN_A(x+W_{Dp})}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \xi(x) &= -\xi_m + \frac{qN_D x}{\epsilon_s} \\ &= -\frac{qN_D}{\epsilon_s}(W_{Dn} - x) \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \end{aligned} \quad (2.58)$$

โดยที่  $\xi_m$  คือ สนามไฟฟ้าสูงสุดที่  $x=0$  จะได้ว่า

$$|\xi(x)| = \frac{qN_D W_{Dn}}{\epsilon_s} = \frac{qN_A W_{Dp}}{\epsilon_s} \quad (2.59)$$

รวมสมการที่ (2.57) และ (2.58) อีกครั้งเพื่อหาค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้า  $\psi_i(x)$  (รูปที่ 2.22 (ค))

$$\psi_i(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(x+W_{Dp})^2 \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.60)$$

$$\psi_i(x) = \psi_i(0) + \frac{qN_D}{\epsilon_s}(W_{Dn} - \frac{x}{2})x \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.61)$$

ที่แต่ละด้านของบริเวณพ่องพาหะจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน เราสามารถคำนวณได้จาก

$$\psi_p = \frac{qN_A W_{Dp}^2}{2\epsilon_s}, \quad (2.62ก.)$$

$$\psi_n = \frac{qN_D W_{Dn}^2}{2\epsilon_s}, \quad (2.62ข.)$$

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ  $\psi_{bi}$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$\psi_{bi} = \psi_p + |\psi_n| = \psi_i(W_{Dn}) = \frac{|\xi_m|}{2}(W_{Dp} + W_{Dn}) \quad (2.63)$$

$\xi_m$  สามารถคำนวณได้จาก :

$$|\xi_m| = \sqrt{\frac{2qN_A\psi_p}{\epsilon_s}} = \sqrt{\frac{2qN_D\psi_n}{\epsilon_s}} \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (2.63) และ (2.64) บริเวณพ่องพาหะสามารถคำนวณได้ดังนี้ :

$$W_{Dp} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}} \quad (2.65ก.)$$

$$W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}} \quad (2.65ข.)$$

$$W_{Dp} + W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \psi_{bi}} \quad (2.66)$$

จากสมการที่ (2.65ก.), (2.65ข.) และ (2.66) สามารถอนุมานได้ดังนี้

$$\frac{|\psi_n|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dn}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \quad (2.67ก.)$$

$$\frac{|\psi_p|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dp}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad (2.67ข.)$$

สำหรับรอยต่อฉับพลันด้านใดด้านหนึ่ง ( $p^+, n^+, p$ ) ในกรณีนี้สมการที่ (2.51) จะใช้ในการคำนวณหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ โดยที่ศักย์ตกคร่อมรอยต่อและบริเวณพร่องพาหะจะปรากฏอยู่ในบริเวณสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนน้อยๆ เมื่อลดรูปสมการที่ (2.66) จะได้

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \psi_{bi}}{qN}} \quad (2.68)$$

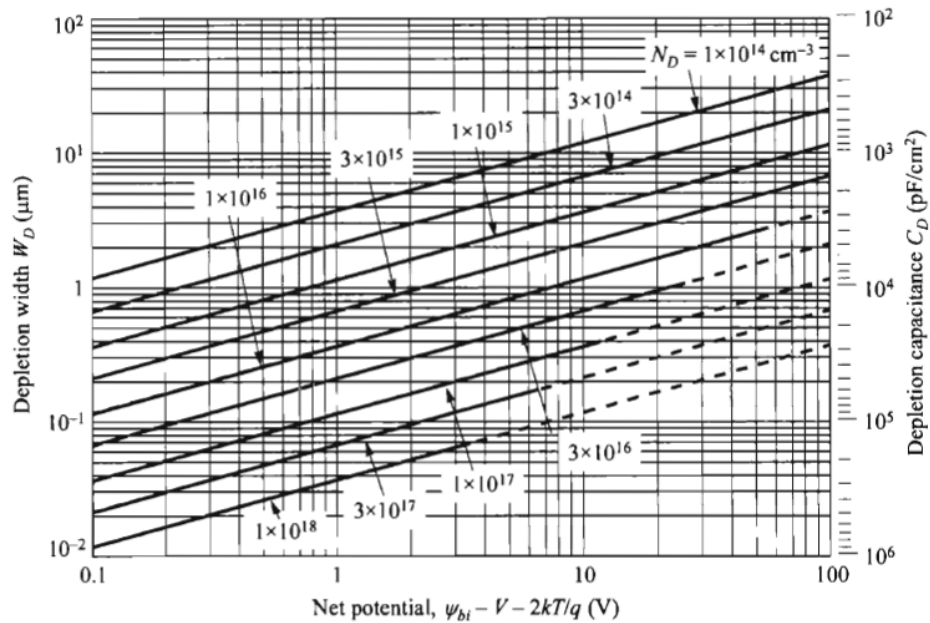
ที่  $N$  คือ  $N_D$  หรือ  $N_A$  โดยที่  $N_A \gg N_D$  หรือในทางตรงข้ามกัน, และ

$$\psi_i(x) = |\xi_m| \left( x - \frac{x^2}{2W_D} \right) \quad (2.69)$$

การอธิบายดังกล่าวข้างต้นนี้อาศัยการประมาณว่าประจุบวก และประจุลบจะปรากฏอยู่เฉพาะในบริเวณพร่องพาหะเท่านั้น แต่ถ้าต้องการความถูกต้องมากขึ้นเราจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายของความหนาแน่นของพาหะข้างมากเพิ่มเติมเข้าไปในสมการปัวซอง เช่น ด้านที่ีจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น  $\rho \approx -q[N_A - p(x)]$  ส่วนด้านอื่นจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น  $\rho \approx q[N_D - n(x)]$  ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.66) โดยการแทนที่  $\psi_{bi}$  ด้วย  $(\psi_{bi} - 2kT/q)$  โดยที่  $2kT/q$  เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับส่วนหางของการกระจายของพาหะข้างมาก เช่น พาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพาหะข้างมากเป็นโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่อยู่ใกล้ขอบบริเวณพร่องพาหะ โดยที่  $kT/q$  เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะที่สภาวะสมดุลความร้อน สำหรับรอยต่อฉับพลันที่ด้านใดด้านหนึ่งจะเป็น

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN} \left( \psi_{bi} - \frac{2kT}{q} \right)} \quad (2.70)$$

นอกจากนี้เมื่อ  $V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับรอยต่อพี-เอ็น, ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตในรอยต่อพี-เอ็นจะเป็น  $(\psi_{bi} - V)$  เมื่อ  $V$  มีค่าเป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง แทนค่า  $\psi_{bi}$  ด้วย  $(\psi_{bi} - V)$  ลงในสมการที่ (2.70) จะได้ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ของรอยต่อฉับพลันเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน แสดงไว้ในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะและความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ ( $\psi_{bi} - V - 2kT/q$ ) สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉนวนในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน

ศักย์ไฟฟ้าสุทธิที่ไบแอสเป็นศูนย์สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะมีค่าประมาณ 0.8 โวลต์ และสำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ประมาณ 1.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าสุทธิจะลดลงภายใต้ไบแอสตรง และจะเพิ่มขึ้นภายใต้ไบแอสกลับทาง ผลดังกล่าวนี้ใช้ได้กับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ เนื่องจากทั้งซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตเท่ากัน ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ เช่น เยอรมาเนียม ต้องคูณแฟกเตอร์ค่าแก้ของซิลิคอนเข้าไปด้วย  $\sqrt{\epsilon_s(Ge)/\epsilon_s(Si)}$  (=1.16) การคำนวณง่ายๆดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้กับรอยต่อพี-เอ็นฉนวนของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆได้

### 2.10.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ (depletion-layer capacitance)

ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถูกกำหนดเป็น

$C_D = dQ_D / dV = \epsilon_s / W_D$  ที่  $dQ_D$  คือ ประจุบริเวณพร่องพาหะที่เพิ่มขึ้นของรอยต่อด้านใดด้านหนึ่งเมื่อ  $dV$  เพิ่มขึ้น, ค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะได้

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{W_D} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N}{2}} \left( \psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.71)$$

ที่  $V$  เป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง ผลที่ได้จากความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะแสดงไว้ในรูปที่ 2.23 จากสมการที่ (2.71) จะได้

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2}{q\epsilon_s N} \left( \psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right), \quad (2.72)$$

$$\frac{d(1/C_D^2)}{dV} = -\frac{2}{q\epsilon_s N} \quad (2.73)$$

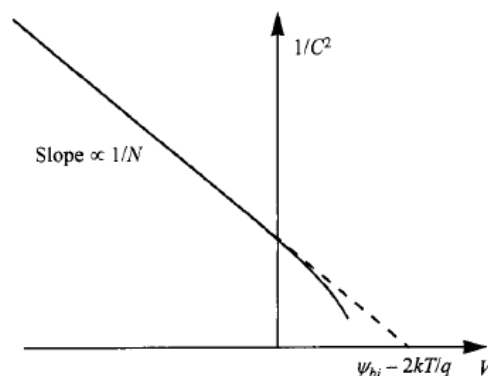
จากสมการที่ (2.72) และ (2.73) นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  กับ  $V$  (รูปที่ 2.24) ค่าความชันที่ได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารเจือ และที่  $1/C^2 = 0$  จุดตัดแกน x คือ  $\psi_{bi} - 2kT/q$  สำหรับไบแอสตรงจะมีความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากที่มีความจุของบริเวณพร่องพาหะ ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและข้อมูลความจุแรงดันไฟฟ้า จะไม่เปลี่ยนแปลงตามโพรไฟล์ของสารเจือที่ระยะทางน้อยกว่าความยาวเดอบายซึ่งความยาวเดอบาย (Debye length :  $L_D$ ) คือ ลักษณะเฉพาะของความยาวของสารกึ่งตัวนำ มีนิยามดังนี้คือ

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s kT}{q^2 N}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qN\beta_{th}}} \quad (2.74)$$

ความยาวเดอบายให้แนวคิดถึงขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนโพรไฟล์ของสารเจืออย่างฉับพลัน พิจารณาที่ปริมาณการเจือเพิ่มขึ้นทีละน้อย ๆ ลงในสารกึ่งตัวนำ ( $\Delta N_D$ ), ศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปคือ  $\Delta\psi_i(x)$  แล้ว

$$n = N_D \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \quad (2.75)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta\psi_i}{dx^2} &= -\frac{q}{\epsilon_s} (N_D + \Delta N_D - n) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[ 1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \right] \\ &\approx -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[ 1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \left( 1 + \frac{\Delta\psi_i q}{kT} \right) \right] \approx \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s kT} \Delta\psi_i \end{aligned} \quad (2.76)$$



รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$ - $V$  ซึ่งจะให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ

## 2.10.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

### 2.10.2.1 สมการของชอกเค์เลย์ในกรณีอุณหภูมิต่ำ

ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในกรณีอุณหภูมิต่ำจะอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐาน 4 ข้อ ดังนี้คือ

1. มีการประมาณว่าบริเวณพร่องพาหะเป็นแบบฉับพลัน กล่าวคือ เกิดศักย์ตกคร่อมรอยต่อเนื่องจากประจุของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับที่ถูกไอออนไนซ์ และแรงดันไบแอสจะตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อนี้ ส่วนนอกบริเวณพร่องพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. การประมาณแบบโบลตซ์มันน์จะยังใช้ได้ดี
3. การฉีดกระแสอยู่ในระดับต่ำ กล่าวคือ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสที่เกิดจากกลไกการเกิด-การรวมตัวของพาหะ ในบริเวณพร่องพาหะดังนั้น ประมาณกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบริเวณพร่องพาหะ

อันดับแรกเราพิจารณาความสัมพันธ์ของโบลตซ์มันน์ที่สภาวะสมดุลความร้อน จะได้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (2.77ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (2.77ข.)$$

ที่สภาวะสมดุลความร้อนผลลัพธ์ของ  $pn$  จากสมการข้างต้นจะเท่ากับ  $n_i^2$  เมื่อมีการป้อนแรงดัน ไฟฟ้าให้กับรอยต่อ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยของรอยต่อทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง และผลลัพธ์ของ  $pn$  ไม่เท่ากับ  $n_i^2$  เราจึงกำหนดระดับควอซี-เฟอร์มิ (quasi-Fermi) ได้ดังนี้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) \quad (2.78ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.78ข.)$$

ที่  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  คือ ระดับควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.78ก.) และ (2.78ข.) เราจะได้

$$E_{Fn} = E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right), \quad (2.79ก.)$$

$$E_{Fp} = E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (2.79ข.)$$

ผลลัพธ์ของ  $pn$  กลายเป็น

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.80)$$

สำหรับไบแอสตรง,  $(E_{Fn} - E_{Fp}) > 0$  และ  $pn > n_i^2$ ; สำหรับไบแอสกลับทาง  $(E_{Fn} - E_{Fp}) < 0$  และ  $pn < n_i^2$

จากสมการที่ (2.78ก.) และความจริงที่ว่า  $\xi \equiv \nabla E_i / q$  เราจะได้

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n \left( n\xi + \frac{kT}{q} \nabla n \right) = \mu_n n \nabla E_i + \mu_n kT \left[ \frac{n}{kT} (\nabla E_{Fn} - \nabla E_i) \right] \\ &= \mu_n n \nabla E_{Fn} \end{aligned} \quad (2.81)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$J_p = \mu_p p \nabla E_{Fp} \quad (2.82)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และโฮล จะแปรตรงกับเกรเดียนต์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิของอิเล็กทรอนิกส์และโฮล, ถ้า  $E_{Fn} = E_{Fp} =$  ค่าคงที่ (สมดุลความร้อน) แล้ว  $J_n = J_p = 0$  การกระจายของศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ และความหนาแน่นของพาหะในรอยต่อพี-เอ็น ภายใต้เงื่อนไขการไบแอสตรงและการไบแอสกลับทางแสดงในรูปที่ 2.23 ระดับ  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะดังแสดงในสมการที่ (2.79ก.) และ (2.79ข.) ในบริเวณพร่องพาหะระดับ  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  จะยังคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะในบริเวณพร่องพาหะนี้ยังคงมีปริมาณสูงอยู่มาก อีกทั้งกระแสของพาหะจะมีค่าคงที่ ดังนั้นเกรเดียนต์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิจะต้องมีค่าน้อยลง ยิ่งไปกว่านั้นความกว้างของบริเวณพร่องพาหะสั้นกว่าระยะการแพร่ซึม ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่ลดต่ำลงในบริเวณพร่องพาหะจะไม่มีนัยสำคัญ

แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับรอยต่อจะแสดงดังสมการ

$$qV = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (2.83)$$

รวมสมการที่ (2.83) เข้ากับสมการที่ (2.80) เราจะได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์ที่ขอบ ( $x = -W_{Dp}$ ) ของบริเวณพร่องพาหะในด้านพี (p-side) ดังสมการ

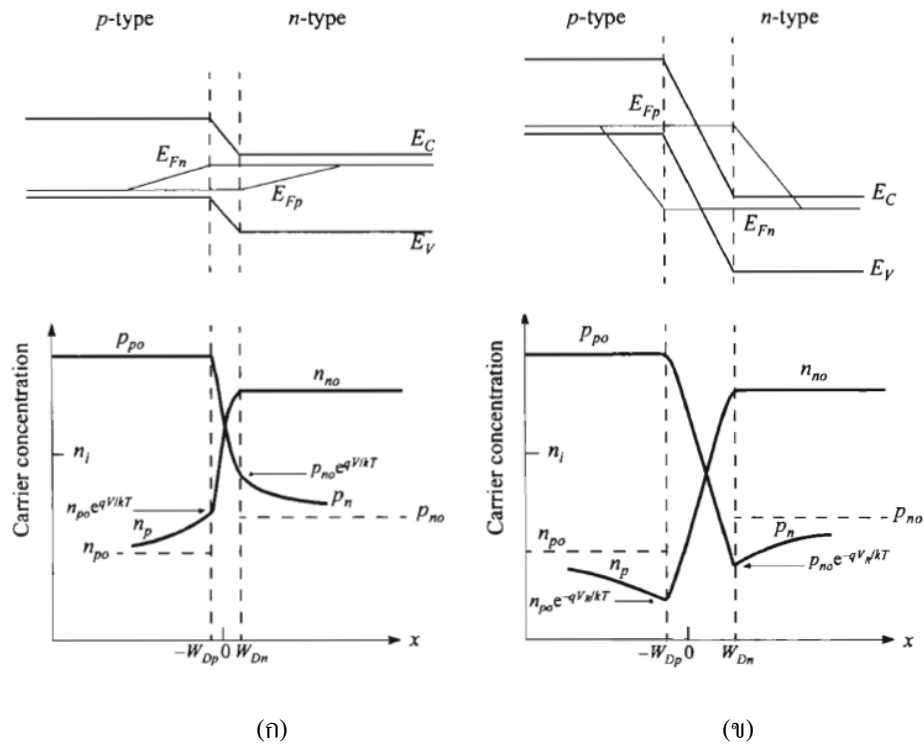
$$n_p(-W_{Dp}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.84ก.)$$

ที่  $p_p \approx p_{po}$  สำหรับการฉีดพาหะในระดับต่ำ (low level injection) และ  $n_{po}$  คือความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์ที่สภาวะสมดุลความร้อนด้านพี (p-side)

ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบ ( $x = W_{Dn}$ ) ของบริเวณพร่องพาหะในด้านเอ็น (n-side) ดังสมการ

$$p_n(W_{Dn}) = p_{no} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.84ข.)$$

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวข้างต้นมีความสำคัญมากต่อสมการกระแส-แรงดันไฟฟ้าของกรณีอุดมคติ



รูปที่ 2.25 แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอเล็กตรอนและโฮล และการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข

- ก. ไบแอสตรง
- ข. ไบแอสกลับทาง

สมการต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขสภาวะคงตัว (steady-state) ในรอยต่อทางด้านเอ็นคือ

$$-U + \mu_n \xi \frac{dn_n}{dx} + \mu_n n_n \frac{d\xi}{dx} + D_n \frac{d^2 n_n}{dx^2} = 0 \tag{2.85ก.}$$

$$-U + \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + \mu_p p_n \frac{d\xi}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \tag{2.85ข.}$$

ในสมการนี้  $U$  คือ อัตราการรวมตัวจากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะข้างมากจะเกิดการปรับตัวดังเช่น  $(n_n - n_{no}) = (p_n - p_{no})$  ซึ่งเป็นไปตาม  $dn_n / dx = dp_n / dx$  นำ  $\mu_p p_n$  คูณกับสมการที่ (2.85ก.) และ  $\mu_n n_n$  คูณกับสมการที่ (2.85ข.) แล้วนำไปใช้รวมกับความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์  $D = (kT / q)\mu$  จะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \frac{n_n - p_n}{(n_n / \mu_p) + (p_n / \mu_n)} \frac{d\xi}{dx} + D_a \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \tag{2.86}$$

ซึ่ง

$$D_a = \frac{n_n + p_n}{(n_n / D_p) + (p_n / D_n)} \quad (2.87)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะคู่ (ambipolar) คือ

$$\tau_p = \frac{p_n - p_{no}}{U} \quad (2.88)$$

จากข้อสมมติฐานการฉีดกระแสระดับต่ำ [ $p_n \ll (n_n \approx n_{no})$ ] ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สมการที่ (2.86) ลดรูปสมการลงจะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (2.89)$$

ถ้าไม่คิดพจน์  $\mu_p p_n d\xi/dx$  แล้วสมการที่ (2.87) ก็เหมือนกับสมการที่ (2.85ข.) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ นอกบริเวณพ่วงพาหะจะไม่มีสนามไฟฟ้า, จากสมการที่ (2.84) จะได้

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{no}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (2.90)$$

จากสมการที่ (2.90) กับเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (2.58ข.) และ  $p_n(x = \infty) = p_{no}$ , จะได้ว่า

$$p_n(x) - p_{no} = p_{no} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) \quad (2.91)$$

ซึ่ง

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.92)$$

ที่  $x = W_{Dn}$  กระแสแพร่ซึมของโฮลคือ

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{W_{Dn}} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.93ก.)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในด้านพีคือ

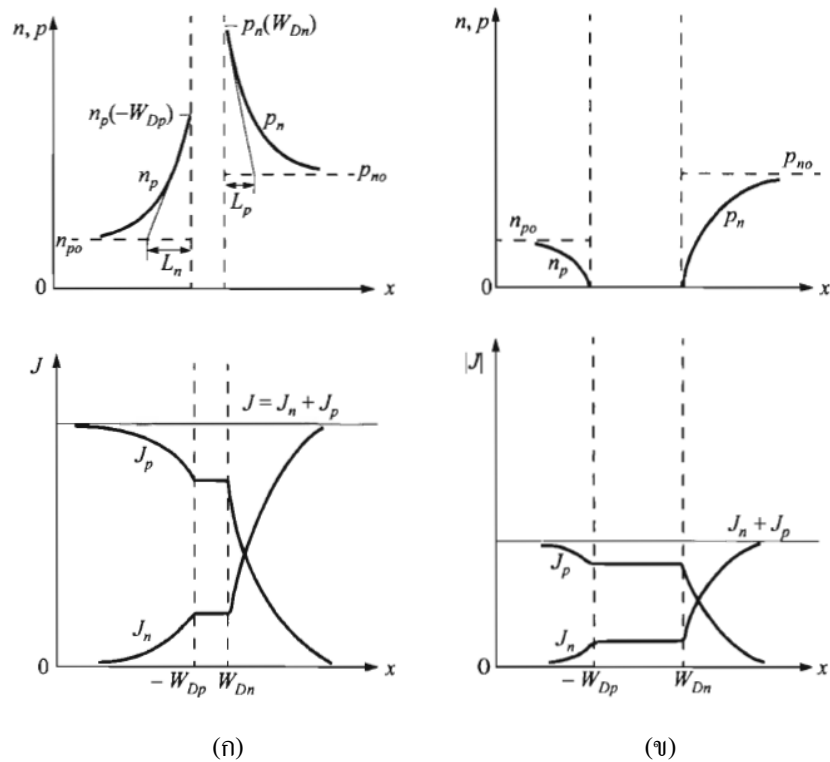
$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{-W_{Dn}} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.93ข.)$$

ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย และความหนาแน่นของกระแสภายใต้ไบแอสตรง และไบแอสกลับทาง แสดงไว้ในรูปที่ 2.24 เป็นที่น่าสนใจที่จะต้องกล่าวว่าการแพร่โฮลจะถูกฉีดจากด้านพีไปด้านเอ็น แต่ขนาดของกระแสโฮลจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์  $D_p, L_p$  และ  $p_{no}$  ที่อยู่ในด้านเอ็น ส่วนการฉีดกระแสอิเล็กตรอนก็คล้ายคลึงกับกระแสโฮลเช่นเดียวกัน

ผลรวมของกระแสโฮลและอิเล็กตรอนได้จากการนำสมการที่ (2.93ก.) และ (2.93ข.) มารวมกันจะได้

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.94)$$

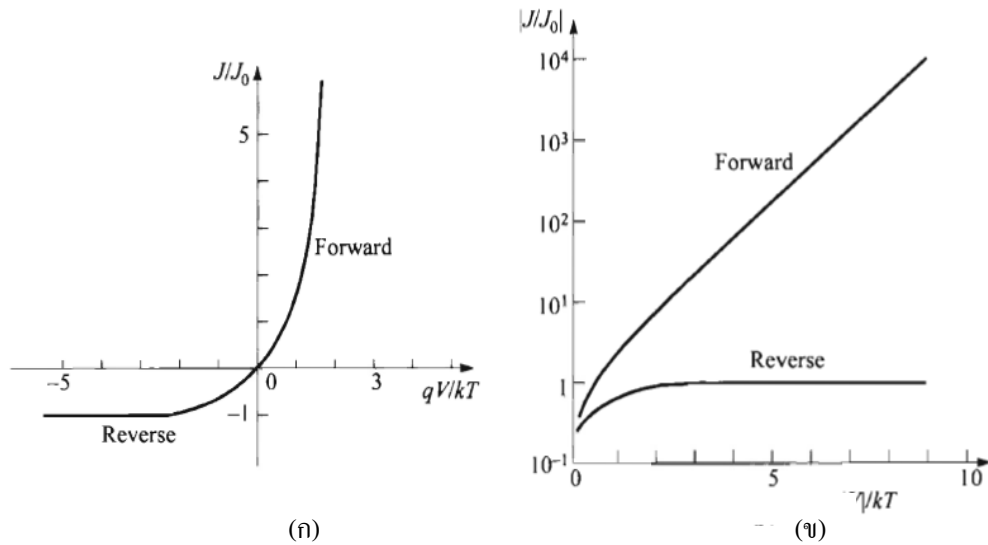
$$J_0 = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \equiv \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (2.95)$$



รูปที่ 2.26 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ

- ก. เจ็อนไซไบแอสตรง
- ข. เจ็อนไซไบแอสกลับทาง

สมการที่ (2.94) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของชอกค์เลย์ซึ่งเป็นกฎของไดโอดอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงไว้ในรูปที่ 2.26 (ก) และ 2.26 (ข) โดยเขียนกราฟแบบเชิงเส้นและแบบกึ่งลอการิทึมตามลำดับ ทางด้านไบแอสตรง (แรงดันไฟบวกทางด้านพี) สำหรับ  $V > 3kT/q$  จากรูปที่ 2.26 (ข) อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสจะเป็นแบบเชิงเส้นที่ 300 เคลวิน ที่ทุกๆ 10 มิลลิแอมป์, แรงดันจะเท่ากับ 59.5 มิลลิโวลต์ ( $2.3kT/q$ ) ส่วนทางด้านไบแอสกลับทาง กระแสอิ่มตัวที่  $-J_0$



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ

- ก. กราฟเชิงเส้น  
ข. กราฟกึ่งลอการิทึม

พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว  $J_0$  พจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ของสมการที่ (2.95) มีลักษณะคล้ายกันดังนั้นเราจะพิจารณาเฉพาะพจน์ที่ 1 เท่านั้นก็เป็นการเพียงพอสำหรับกรณีรอยต่อ  $p^+ - n$  แล้ว  $p_{no} \gg n_{po}$ , ปริมาณ  $n_i, D_p, p_{no}$  และ  $L_p (\equiv \sqrt{D_p \tau_p})$  จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้า  $D_p / \tau_p$  แปรตรงกับ  $T^\gamma$  ที่  $\gamma$  เป็นค่าคงที่แล้ว

$$J_0 \approx \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \approx q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \propto T^{\gamma/2} \left[ T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \right] \propto T^{(3+(\gamma/2))} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.96)$$

การขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ  $T^{(3+(\gamma/2))}$  ไม่สำคัญเท่าไรนักเมื่อเทียบกับพจน์เอกโพเนนเชียล ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_0$  กับ  $\frac{1}{T}$  จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  และคาดว่าในขณะไบแอสกลับทาง,  $|J_R| \approx J_0$  ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ  $\exp(-E_g/kT)$  ตามอุณหภูมิ และในขณะไบแอสตรง  $J_F \approx J_0 \exp(qV/kT)$  ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ  $\exp[-(E_g - qV)/kT]$

### 2.10.3 กระบวนการเกิด-การรวมตัวของพาหะอิสระ (generation-recombination process)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการเกิดกระแสของพาหะอิสระภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง เนื่องจากขณะไบแอสกลับทางจะมีปริมาณพาหะอิสระน้อยมาก ( $pn \leq n_i^2$ ) กระบวนการเกิดพาหะอิสระจึงมาจากกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและปลดปล่อยโฮลออกมาจากกับดักประจุ อัตราการเกิดคู่

อิเล็กตรอน-โฮลได้จากทฤษฎีของชอว์คส์-รีด-ฮอลล์ (SRH relation) โดยมีเงื่อนไขว่า  $p \leq n_i$  และ  $n \leq n_i$  และจะได้อัตราการทรานซิชันสุทธิ (net transition rate) คือ

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_t}{\sigma_n \exp[(E_t - E_i)/kT] + \sigma_p \exp[(E_i - E_t)/kT]} \right\} n_i \equiv - \frac{n_i}{\tau_g} \quad (2.97)$$

เมื่อ  $\sigma_n$  และ  $\sigma_p$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอนและการจับโฮลตามลำดับ ส่วน  $\tau_g$  คือ ช่วงชีวิตของการเกิดพาหะ (generation time)

$$\begin{aligned} \text{ซึ่ง} \quad \tau_g &= \frac{1 + (n/n_i)}{\sigma_p v_{th} N_t} + \frac{1 + (p/n_i)}{\sigma_n v_{th} N_t} \\ &= \left(1 + \frac{n}{n_i}\right) \tau_p + \left(1 + \frac{p}{n_i}\right) \tau_n \end{aligned}$$

โดยที่  $\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t}$  และ  $\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t}$  ซึ่งเป็นช่วงชีวิตของโฮลและช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนตามลำดับ  $N_t$  คือ ความหนาแน่นของกักตักประจุ ส่วน  $v_{th}$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของพาหะเนื่องจากพลังงานความร้อน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$J_{ge} = \int_0^{W_D} q|U|dx \approx q|U|W_D \approx \frac{qn_i W_D}{\tau_g} \quad (2.98)$$

เมื่อ  $W_D$  คือ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ ถ้าช่วงชีวิตของการเกิดพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิน้อยมาก แล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะจะขึ้นกับอุณหภูมิตามค่า  $n_i$  ดังนั้นที่อุณหภูมิใดๆ  $\tau_{ge}$  จะแปรตามความกว้างของบริเวณพร่องพาหะซึ่งจะขึ้นกับแรงดันไบแอสสำหรับรอยต่อฉับพลัน

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/2} \quad (2.99)$$

สำหรับรอยต่อเชิงเส้น

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/3} \quad (2.100)$$

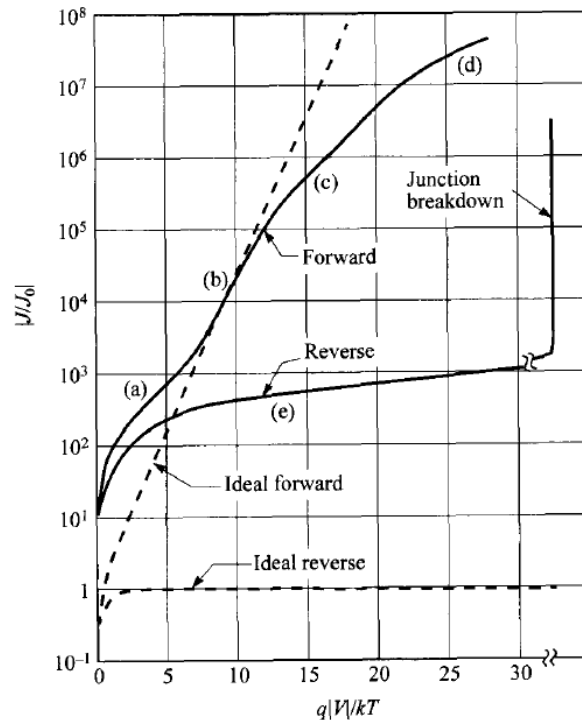
กระแสรวมขณะไบแอสกลับทาง (สำหรับ  $p_{no} \gg n_{po}$  และ  $|V| > 3kT/q$ ) สามารถหาได้จากผลรวมของกระแสแพร่ซึมที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะกับกระแสที่เกิดจากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะ

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_i W_D}{\tau_g}} \quad (2.101)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่  $n_i$  มีค่ามาก (เช่น เยอรมาเนียม) กระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่นที่อุณหภูมิห้อง และกระแสไบแอสกลับทางจะเป็นไปตามสมการชอว์คส์ แต่ถ้า  $n_i$  มีค่าน้อยๆ (เช่น ซิลิคอน) กระบวนการเกิดพาหะจะมีบทบาทโดดเด่นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.27, เส้นโค้ง (จ) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอกระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่น

ภายใต้ไบแอสตรงกระบวนกรเกิด - การรวมตัวของพาหะในบริเวณพร่องพาหะเป็น กระบวนกรจับพาหะผ่านกับดักประจุ เราจะได้กระแสที่เกิดจากกระบวนกรรวมตัวของพาหะ นอกเหนือไปจากกระแสแพร่ซึม เมื่อแทนสมการที่ (2.80) ลงในสมการที่ (2.97) จะได้

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_t n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{\sigma_n \{n + n_i \exp[(E_t - E_i)/kT]\} + \sigma_p \{p + n_i \exp[(E_i - E_t)/kT]\}} \right\} \quad (2.102)$$



รูปที่ 2.28 ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน

- ก. กระบวนกรเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ
- ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม
- ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง
- ง. ผลของความต้านทานอนุกรม
- จ. การสลับไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด - การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

ภายใต้สมมติฐาน  $E_t = E_i$  และ  $\sigma_n = \sigma_p = \sigma$  สามารถลดรูปสมการที่ (2.102) ได้ดังนี้

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_t n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n + p + 2n_i} = \left\{ \frac{\sigma v_{th} N_t n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n_i \left\{ \exp[(E_{Fn} - E_i)/kT] + \exp[(E_i - E_{Fp})/kT] + 2 \right\}} \right\} \quad (2.103)$$

$U$  มีค่าสูงสุดอยู่ในบริเวณพ่วงพาหะ เมื่อ  $E_i$  อยู่ที่ระดับครึ่งทางระหว่าง  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  ดังนั้นตัวหารของสมการที่ (2.103) กลายเป็น  $2n_i [\exp(qV/2kT) + 1]$  ที่  $V > kT/q$  จะได้

$$U \approx \frac{1}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.104)$$

และ

$$J_{re} = \int_0^{W_D} qU dx \approx \frac{qW_D}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \approx \frac{qW_D n_i}{2\tau} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.105)$$

สมการที่ (2.105) เป็นการประมาณว่าบริเวณพ่วงพาหะเกือบทั้งหมดมีอัตราการรวมตัวของพาหะได้สูงสุด ซึ่งจะได้ค่า  $J_{re}$  สูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นสมการที่ (2.106) จะให้ผลน่าเชื่อถือมากกว่าดังนี้ คือ

$$J_{re} = \int_0^{W_D} qU dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kT n_i}{\tau \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.106)$$

ที่  $\xi_0$  คือ สนามไฟฟ้าที่บริเวณที่มีอัตราการรวมตัวสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{qN(2\psi_B - V)}{\epsilon_s}} \quad (2.107)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะแปรตรงกับ  $n_i$  ผลรวมของกระแสไบแอสตรงสามารถหาได้จากผลรวมของสมการที่ (2.94) และสมการที่ (2.106) สำหรับรอยต่อ  $p^+ - n$  ( $p_{no} \gg n_{po}$ ) และ  $V \gg kT/q$

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kT n_i}{\tau_p \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.108)$$

ผลการทดลองทั่วไปสามารถแสดงในรูปแบบดังนี้ คือ

$$J_F \propto \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.109)$$

โดยที่แฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 2 เมื่อมีกระบวนการรวมตัวของพาหะโดดเด่นกว่า (รูปที่ 2.27, เส้นโค้ง (ก)) และแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีกระแสแพร่ซึมโดดเด่นกว่า (รูปที่ 2.27, เส้นโค้ง(ข)) เมื่อกระแสของการรวมตัวของพาหะและกระแสแพร่ซึมมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติจะมีค่าระหว่าง 1 และ 2

#### 2.10.4 ความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance)

ค่าความจุของบริเวณพ่วงพาหะที่ศึกษามาก่อนหน้าจะถือว่าเป็นความจุทั้งหมดของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับการไบแอสกลับทาง แต่ถ้ายรอยต่อพี-เอ็นได้รับการไบแอสตรง จะมีค่าความจุอีกส่วนหนึ่งเพิ่มเติมเข้ามา เนื่องจากพาหะข้างน้อยซึ่งจะเรียกความจุนี้ว่าความจุแพร่ซึม หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง ความจุแพร่ซึมเกิดจากการฉีดประจุของพาหะข้างน้อยผ่านรอยต่อ ส่วนความจุที่วัดภายใต้ไบแอสกลับทางจะเป็นความจุของประจุค้างในบริเวณพ่วงพาหะ เมื่อทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็ก (small ac signal) ให้กับรอยต่อพร้อมกับแรงดันไฟตรงขนาด

$V_0$  และความหนาแน่นของกระแสไฟตรงขนาด  $J_0$  เราจะได้ว่าแรงดันรวมและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมจะนิยามดังนี้ คือ

$$V(t) = V_0 + V_1 \exp(j\omega t) \quad (2.110)$$

$$J(t) = J_0 + J_1 \exp(j\omega t) \quad (2.111)$$

ที่  $V_1$  และ  $J_1$  คือ แรงดันและกระแสของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็กตามลำดับ จากแอดมิตแตนซ์  $J_1 / V_1$  จะได้ค่าความนำแพร่ซึม และความจุแพร่ซึ้ดังสมการ

$$Y \equiv \frac{J_1}{V_1} \equiv G_d + j\omega C_d \quad (2.112)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ขอบของบริเวณพร่องพาหะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.84ก.) และ (2.84ข.) โดยการแทน  $V_0$  ด้วย  $V_0 + V_1 \exp(j\omega t)$

สำหรับรอยต่อด้านเอ็น (n-side) เมื่อ  $V_1 \ll V_0$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} p_n(W_{Dn}) &= p_{no} \exp \left\{ \frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ &\approx p_{no} \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) + \frac{p_{no} q V_1}{kT} \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) \exp(j\omega t) \approx p_{no} \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) + \tilde{p}_n(t) \end{aligned} \quad (2.113)$$

ส่วนรอยต่อด้านพี (p-side) จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังสมการ

$$n_p(W_{Dp}) \approx n_{po} \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) + n_p(t) \quad (2.114)$$

พจน์แรกของสมการที่ (2.113) คือ ความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากแรงดันไบแอสตรง ( $V_0$ ) ส่วนพจน์ที่สองเป็นความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าสลับ จากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ที่กล่าวว่า

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial \xi}{\partial x} - \mu_p \xi \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (2.115)$$

แทน  $\tilde{p}_n$  ลงในสมการความต่อเนื่องนี้ โดยกำหนดให้  $G = \xi = \frac{d\xi}{dx} = 0$  แล้วจะได้ว่า

$$j\omega \tilde{p}_n = -\frac{\tilde{p}_n}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} \quad (2.116)$$

หรือ

$$\frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} - \frac{\tilde{p}_n}{D_p \tau_p / (1 + j\omega \tau_p)} = 0 \quad (2.117)$$

สมการที่ (2.117) จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.90) ถ้ากำหนดให้ช่วงชีวิตพาหะเป็นดังนี้

$$\tau_p^* = \frac{\tau_p}{1 + j\omega \tau_p} \quad (2.118)$$

และสามารถหาความหนาแน่นของกระแสได้จากสมการที่ (2.93) และจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม

$$J = \left( qp_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + qn_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \exp \left\{ \frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\}$$

$$\approx \left( qp_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + qn_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \left[ \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) \right] \left[ 1 + \frac{qV_1}{kT} \exp(j\omega t) \right] \quad (2.119)$$

ความหนาแน่นไฟฟ้ากระแสกลับ  $J_1$  คือ

$$J_1 = \left( \frac{qD_p p_{no} \sqrt{1 + j\omega\tau_p}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po} \sqrt{1 + j\omega\tau_n}}{L_n} \right) \left[ \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) \right] \frac{qV_1}{kT}$$

ค่า  $J_1 / V_1$  ทั้ง  $G_d$  และ  $C_d$  สามารถหาค่าได้และพบว่าทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับความถี่

สำหรับความสัมพันธ์ที่ความถี่ต่ำ ( $\omega\tau_p, \omega\tau_n \ll 1$ ) ความนำแพร่ซึม ( $G_{d0}$ ) หาได้จาก

$$G_{d0} = \frac{q}{kT} \left( \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \right) \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) \quad \text{mho / cm}^2 \quad (2.120)$$

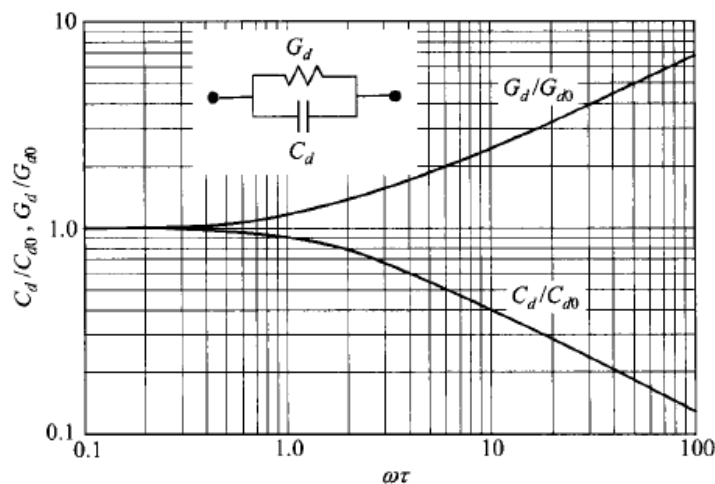
ที่ความถี่ต่ำความจุแพร่ซึมสามารถคำนวณได้โดยใช้การประมาณค่า  $\sqrt{1 + j\omega\tau} \approx (1 + 0.5j\omega\tau)$

$$C_{d0} = \frac{q^2}{2kT} (L_p p_{no} + L_n n_{po}) \exp \left( \frac{qV_0}{kT} \right) \quad \text{F / cm}^2 \quad (2.121)$$

ค่าความจุแพร่ซึมนี้จะแปรตามแรงดันไบแอสตรงสำหรับรอยต่อ  $n^+ - p$  จะได้ว่า

$$C_{d0} = \frac{qL_n^2}{2kTD_n} J_F \quad (2.122)$$

ความจุแพร่ซึมและความนำแพร่ซึมที่ขึ้นอยู่กับความถี่จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 ซึ่งแกนนอนจะเป็นค่า  $\omega\tau$



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ  $\omega\tau$

พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง

วงจรสมมูลของไฟฟ้ากระแสกลับแอดมิตแตนซ์จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 ด้วย เพื่อแสดงว่าค่าความจุแพร่ซึมจะลดลงเมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความถี่สูงๆ  $C_d$  จะสัมพันธ์กับ  $\omega^{-1/2}$  นอกจากนี้ความจุแพร่ซึมยังแปรตามไฟฟ้ากระแสตรง  $\propto \exp(qV_0/kT)$  เพราะฉะนั้น  $C_d$  จึงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ต่ำ และภายใต้สภาวะไบแอสตรง

## 2.11 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์ [22-25]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.28 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสที่ขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบอัสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.123)$$

เมื่อ  $J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.124)$

โดยที่  $V$  คือ แรงดันไบอัสตรง  
 $n$  คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด  
 $J_0$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  
 $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์  
 $J_{00}$  คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

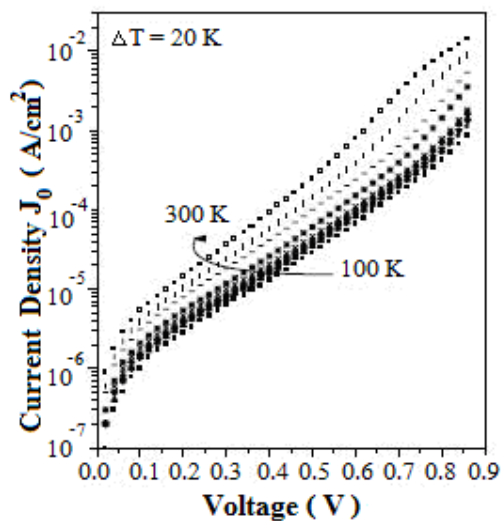
ซึ่ง  $J_{00}$  จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน ( $V_b$ ) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_v \left[ \frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[ \frac{-qV_n}{kT} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.125)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.126)$$

เมื่อ  $S_p$  คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล,  $N_v$  ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ( $\phi_b^p$ ) คือค่าแฟกซ์กึ่งขวางกันโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> ที่แปรตามอุณหภูมิ

ค่า  $J_0$  นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อวิวิธพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแสเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่คิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์) คือแพกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกัฏประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี และ  $\ln J_0$  จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ( $\ln J_0 \propto T^{-1}$ )

### 2.11.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ [22-24,30-36]

ชอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกัฏประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

จากแบบจำลองของ ชอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแพกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) มีค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง  $J_0$  จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น  $E_g/2$  สำหรับกรณีที่กัฏประจุมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แพกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cds/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น  $p-n^+$ ) ปริมาณ  $N_d > N_A$  กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแพกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กัฏ  $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$  ซึ่ง  $N_D$  และ  $N_A$  คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า  $\epsilon_n$  และ  $\epsilon_p$  คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี ตามลำดับ

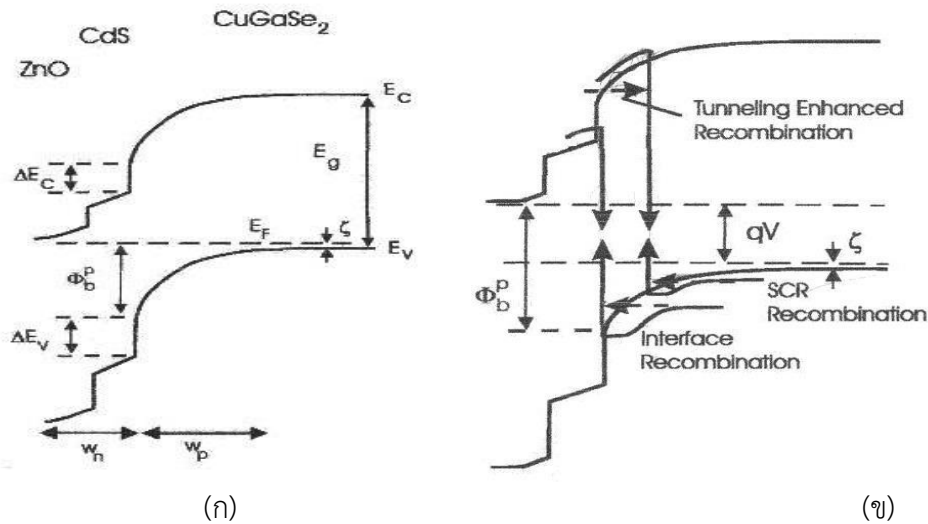
### 2.11.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ [22-23]

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.127)$$

โดยที่  $A$  คือ ความชันของกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับ  $V$  ซึ่งค่าของ  $A$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่าแพกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น  $\ln J_0$  จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง  $\ln J_0$  ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อชอตต์กี การโค้งงอของแถบพลังงาน

โดยเฉพาะการโค้งของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องกัน จนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้  $J_0$  จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.31 แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย

- ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิธีพันธะของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.128) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln (J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln (J_{00}) \quad (2.128)$$

พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $n \ln J_0$  กับ  $1/T$  พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดการนำกระแสเกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ แล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของตัวดูดกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสงขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แพกเตอร์อุณหภูมิของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.129)$$

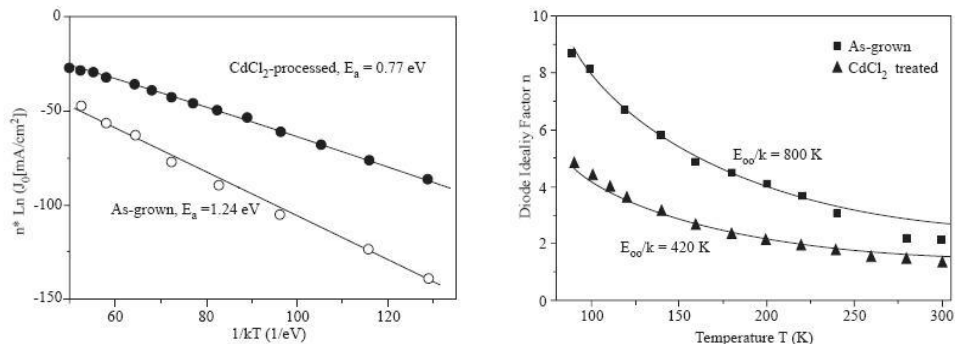
โดย  $E_{00}$  คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม  $E_{00}$  คือ

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.130)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ  $\epsilon_s$  คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง แพลกเตอร์อุดมคติของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \quad (2.131)$$

ซึ่ง  $kT^*$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.32 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ  $J_0$  และแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนัลและเมื่อผ่านการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl<sub>2</sub>

## 2.12 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [22-25]

อัตราการรวมตัวของพาหะ ( $R$ ) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \quad (2.132)$$

เมื่อ

$$n^* = N_C \exp[-(E_C - E_T)/kT]$$

และ

$$p^* = N_V \exp[-(E_T - E_V)/kT]$$

ซึ่ง  $N_C$  และ  $N_V$  คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกักตักประจุ,  $n$  และ  $p$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ,  $\eta_i$  คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือโฮล (electron/hole cross section:  $\gamma_{n/p}$ ) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1+\Gamma)] \quad (2.133)$$

หรือ

$$\gamma_{n/p} = \frac{\tau_{n/p}}{1+\Gamma}$$

เมื่อ  $S_{n/p}$  คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กตรอน หรือโฮล,  $\tau_{n/p}$  คือค่าชีวิตของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ส่วน  $\Gamma$  คือ แฟกเตอร์แก้ไข (correction factor) ของการชดเชยโมเมนต์ผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\Gamma = 2(3\pi)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.134)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลาดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (W-x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.135)$$

เมื่อ  $F(x)$  คือ สนามไฟฟ้าท้องถิ่น (local electrical field) ที่ตำแหน่งกับดักประจุ

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวดักกลืนแสง จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.136)$$

เมื่อ  $kT^*$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของการกระจายตัวของกักตักประจุ และ  $\eta = E_v - \frac{E_T}{\eta}$  หรือ

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกักตักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.120) ร่วมกับสมการ (2.123) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดักกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.137)$$

ซึ่ง  $J_{00}$  จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) จะมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*} \right) \quad (2.138)$$

จากสมการที่ 2.138 นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ  $T^* \rightarrow \infty$  กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี  $E_{00} \rightarrow 0$  จะได้ว่า  $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$  ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนี้ยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิริทพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.139)$$

เมื่อ  $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ถ้าประมาณว่าทั้ง  $n$ ,  $J_{sc}$  และ  $J_{00}$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  และ  $T$  ควรจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันคือ  $-\frac{nk}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right)$  และจุดตัดแกน  $V_{oc}$  (เมื่อ  $T = 0$  เคลวิน) คือค่า  $E_g/q$  ในกรณีของการรวมตัวกันของพาหะโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อโดยไม่มีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องและความสูงของกำแพงศักย์ยังขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าจะได้ว่า  $E_a = \phi_b^p$  ซึ่ง  $\phi_b^p$  ก็คือ  $\phi_b^i$  นั่นเองเมื่อ  $\phi_b^i$  คือ กำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงานของตัวดุกกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ซึ่ง  $V_{oc}$  นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ซอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ในสมการ (2.113) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.123) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )

### 2.13 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [22-30]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีการไบแอสกระแสดังรูปที่ 2.32 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การ

ไบแอสหรือไม่มีการไบแอส ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใด ๆ ปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆ ไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.31 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

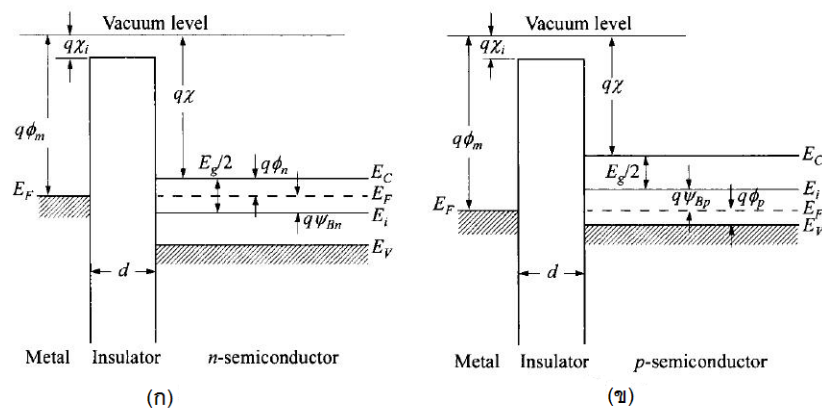
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (2.140ก)}$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (2.140ข)}$$

เมื่อ  $\chi, \chi_i$  คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

$\psi_{Bn}, \psi_{Bp}$  คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน

$\phi_n, \phi_p$  คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน



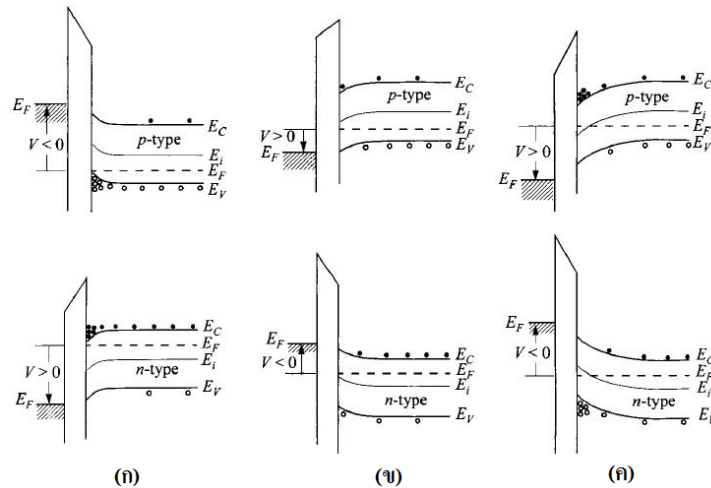
รูปที่ 2.33 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุล เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V=0$ )

ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้นโดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.33 (ก) โดยกรณีแรกตามรูปที่ 2.33(ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันโพลให้กับขั้วโลหะ ( $V < 0$ ) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมุกขมูของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อโดยกรณีนี้จะเรียกว่าบริเวณขมุกขมูพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นโพลบวก ( $V > 0$ ) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทริสิก ( $E_i$ ) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะ

เรียกว่าบริเวณพร่องพาหะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.33(ข) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรินสิค ( $E_i$ ) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนชุมนุมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.33(ค) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกรณีนี้อาบริเวณชั้นกลับกลาย (inversion case)

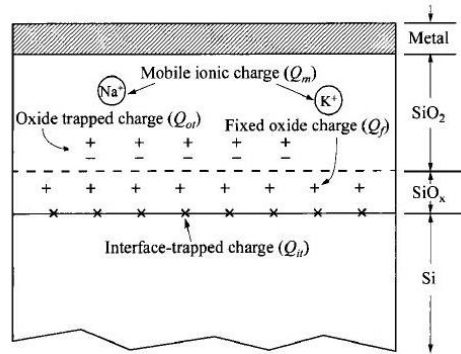


รูปที่ 2.34 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด

- ก. บริเวณชุมนุมพาหะ
- ข. บริเวณพร่องพาหะ
- ค. บริเวณชั้นกลับกลาย

## 2.14 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน [22-25, 36]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.34 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) และประจุค้างภายในกัณฑ์ ( $Q_{it}$ ) ที่อยู่ในบริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO<sub>2</sub> โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ  $Q_{it}$  จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ ( $Q_f$ ) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ ( $Q_{ot}$ ) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอกซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนร้อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



รูปที่ 2.35 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

2.15 กับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [24-30]

กับดักที่ผิวเชื่อมต่อจะแสดงลักษณะถึงความเป็นอะตอมผู้ให้ (donor) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุบวก (+) โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกไป และเช่นเดียวกับลักษณะของอะตอมผู้รับ (accepter) จะมีการรับเอาอิเล็กตรอนเข้ามาจนเปลี่ยนลักษณะทางไฟฟ้าจากเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุลบ (-) ฟังก์ชันการแจกแจงของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อสามารถเขียนได้ 2 กรณี ได้แก่

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้ให้

$$F_{SD}(E_t) = \left[ 1 - \frac{1}{1 + (1/g_D) \exp[(E_t - E_F)/kT]} \right] = \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]} \tag{2.141ก}$$

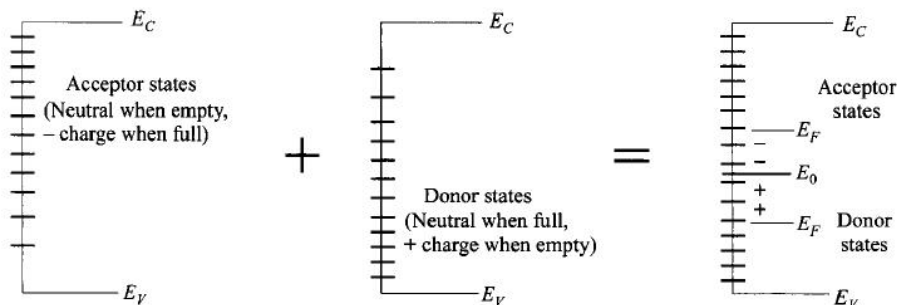
สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้รับ

$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_t - E_F)/kT]} \tag{2.141ข}$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$g_D$  คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้ให้

$g_A$  คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้รับ



รูปที่ 2.36 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากรูปที่ 2.36 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ  $E_0$

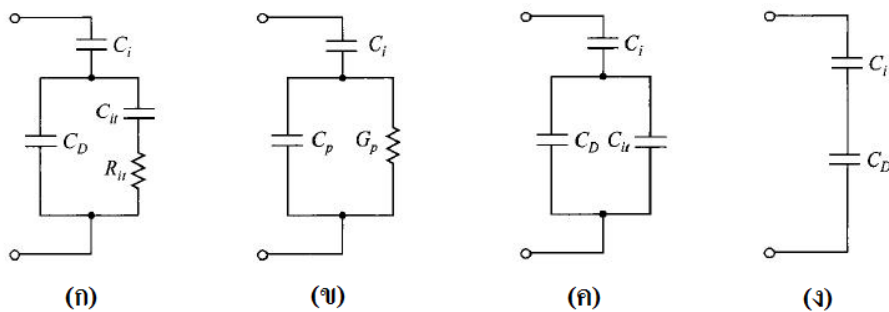
ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\ &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \end{aligned} \quad (2.142)$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (2.143)$$

สมการที่ (2.143) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด  $Q_{it}$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_s$ ) ที่เปลี่ยนไป



**รูปที่ 2.37** ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี  $C_{it}$  และ  $R_{it}$  ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อรวมอยู่ด้วย

ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ

ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกับดักประจุนี้จะส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน ( $C-V$ ) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกับดักประจรวมอยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.36 (ก) โดยที่  $C_i$  และ  $C_D$  เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ  $C_{it}$  และ  $R_{it}$  คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกับดักประจุซึ่งกับดักประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ

$C_{it}R_{it}$  จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ( $\tau_{it}$ ) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรม การตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก  $C_p$  และ  $G_p$  จะต่อขนานกันทั้ง  $C_p$  และ  $G_p$  จะขึ้นกับ ความถี่ด้วยเช่นเดียวกันโดยที่

เมื่อ

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.144)$$

และ

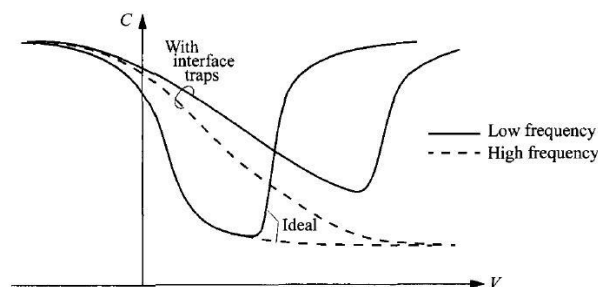
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.145)$$

สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ  $R_{it}$  ของวงจรมุมูลในรูปที่ 2.36(ก) จะกำหนดให้มีค่าเป็น ศูนย์ แล้ว  $C_D$  จะขนานกับ  $C_{it}$  ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด  $C_{it}$  และ  $R_{it}$  ออกไปได้ หรือพิจารณา ว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

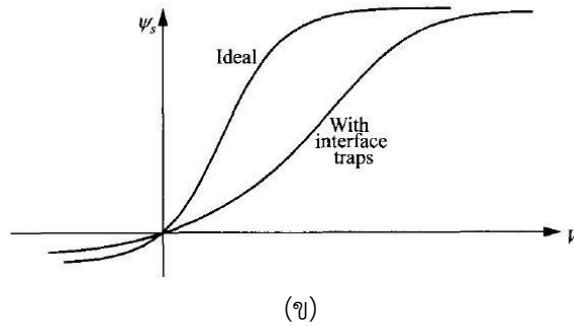
$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{it})}{C_i + C_D + C_{it}} \quad (2.146)$$

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง (C}_{HF}\text{)} \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.147)$$

รูปที่ 2.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูง และที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยึดออกไป ทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้ แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_s$ ) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า  $\psi_s$  ในรูปที่ 2.37ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\psi_s - V$  สามารถนำไปคำนวณหา  $D_{it}$  ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดัก ประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิด เป็นขั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ  $D_{it}$



(ก)



รูปที่ 2.38 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS

ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ  $\psi_s$

## 2.16 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ [30-32, 36]

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการเจือสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ 2.147 และสมการที่ 2.146 จะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} C_{it} &= \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - C_D \\ &= \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.148)$$

โดยกำหนดให้ ผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า  $\Delta C \equiv C_{LF} - C_{HF}$  และเมื่อใช้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ  $D_{it} = C_{it} / q^2$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} D_{it} &= \frac{C_i}{q^2} \left[ \left( \frac{1}{\Delta C / C_i + C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} \right] \\ &= \frac{\Delta C}{q^2} \left[ \left( 1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_i} \right)^{-1} - \left( 1 - \frac{C_{HF}}{C_i} \right)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (2.149)$$

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกับดักประจุนั้นแปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า ( $\Delta C$ ) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ  $D_{it}$  ได้ก็สามารถที่จะหาค่า  $\psi_s$  ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

### 2.16.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ความแตกต่างของของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่

ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.34 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพิกัดค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ช่วงความถี่เดียวกัน จากภาพวงจรสมมูลในรูปที่ 2.36(ก) ความจุของฉนวน  $C_i$  ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการชุมนุมพาหะอย่างมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนจะถูกนำเอาไปหักออก

จากค่าอิมพีแดนซ์ สุดท้ายแล้ววงจรสมมูลจะเป็น  $C_D$  ต่อขนานกันกับ  $R_{it} C_{it}$  สำหรับค่า  $\frac{G_p}{\omega}$  ในสมการที่ (2.145) จะไม่มีพจน์  $C_D$  ปรากฏอยู่นั้นคือ  $\frac{G_p}{\omega}$  จะสัมพันธ์กับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อให้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_{in}}{G_{in}^2 + \omega^2 (C_i + C_{in})^2} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.150)$$

เมื่อทำการไบแอสแรงดันจะสามารถวัดค่า  $\frac{G_p}{\omega}$  ที่สัมพันธ์กับความถี่ได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{G_p}{\omega}$  และ  $\omega$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\omega \tau_{it} = 1$  จุดที่ค่า  $\frac{G_p}{\omega}$  สูงสุดจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ  $C_{it}$  ดังนั้นจากวงจรสมมูลได้มีการแก้ไขโดยการหักค่า  $C_i$  ออกไปจะได้  $C_{it}$  และ  $\tau_{it} (= R_{it} C_{it})$  เมื่อรู้ค่า  $C_{it}$  แล้วจะสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อได้มาจากการใช้ความสัมพันธ์  $D_{it} = C_{it} / q^2$  แล้วจะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{2}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.151)$$

โดยที่  $\frac{G_p}{\omega}$  จะมีหน่วยเป็นฟารัดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.151) นี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุก็มีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q D_{it}}{2 \omega \tau_{it}} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2) \quad (2.152)$$

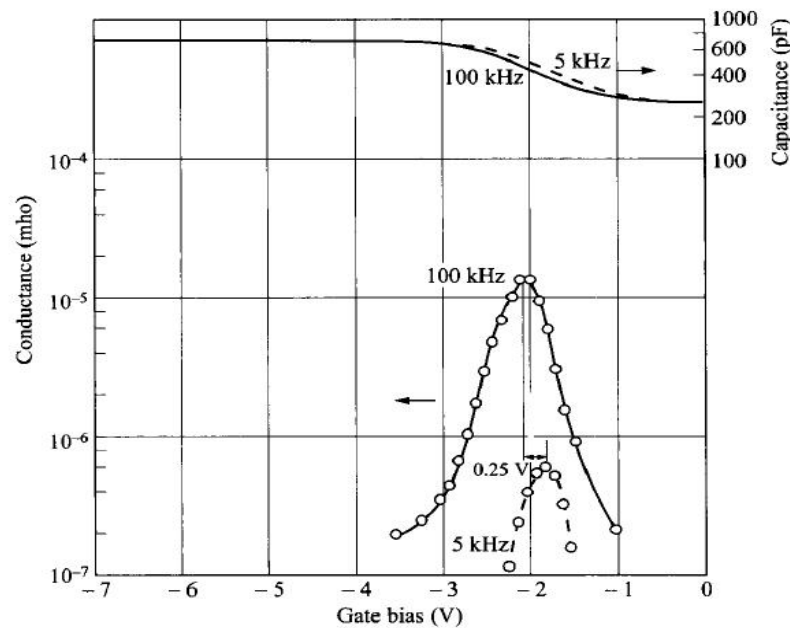
ซึ่ง  $\frac{G_p}{\omega}$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\omega \tau_{it} = 1.98$  และจากความสัมพันธ์  $D_{it} = C_{it} / q^2$  จะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{\left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}}{0.402q}$$

$$\approx \frac{2.5}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.153)$$

$$\text{และ} \quad \tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_{C,V})^{-1} \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.154)$$

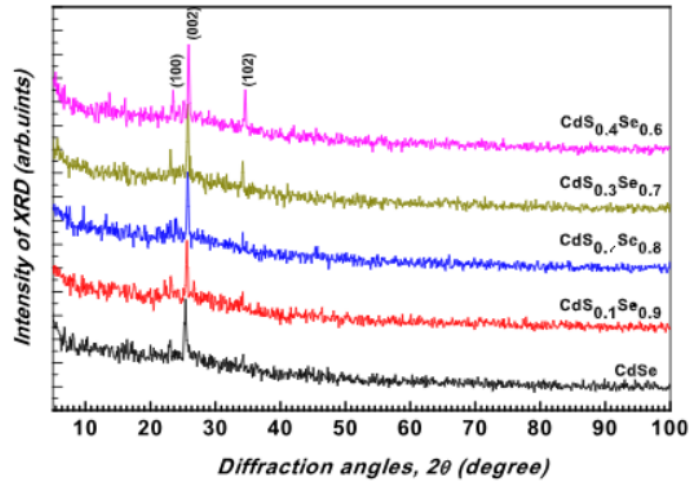
เมื่อ  $\sigma_T$  คือพื้นที่ภาคตัดขวางของการจับประจุของกับดักประจุมีค่าประมาณ  $10^{-15}$  ต่อดารางเซนติเมตร ส่วน  $v_{th}$  คือความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน มีค่าประมาณ  $10^7$  เซนติเมตรต่อวินาที และ  $N_{C,V}$  คือค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ สำหรับ  $E_T$  คือระดับพลังงานของกับดักประจุ



รูปที่ 2.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันขอรอยต่อ MIS

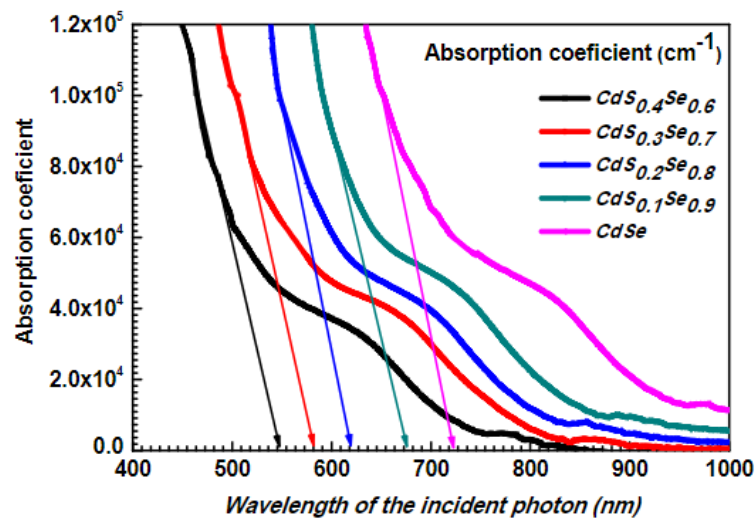
## 2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [37]

จากการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ พบว่า Hassanien และคณะได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  ด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากการศึกษารูป XRD พบว่ามีระนาบ (100), (002) และ (102) โดยที่ระนาบ (002) เป็นระนาบที่เด่นที่สุดซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ดังแสดงในรูปที่ 2.39

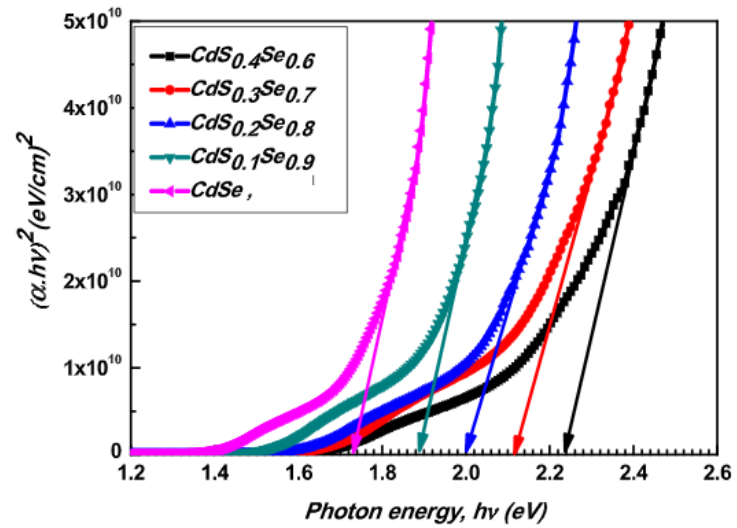


รูปที่ 2.40 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$

นอกจากนี้ยังพบว่าการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$  พบว่าเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Se เพิ่มขึ้น ทำให้ขอบการดูดกลืนเลื่อนไปทางด้านที่ความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลง ดังรูปที่ 2.40 และ 2.41 ตามลำดับ



รูปที่ 2.41 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $CdS_xSe_{1-x}$



รูปที่ 2.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบาง  $CdS_xSe_{1-x}$

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไปนี้เป็นศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ความบริสุทธิ์สูง 99.995, 99.99 และ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งในขณะที่ทำการระเหยสารเคมีจะทำการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการระเหยสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศต่ออีก 30 นาที จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานสูง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรือเซนเซอร์ต่อไป

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร
2. ที่ตัดกระจกสไลด์
3. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
4. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
5. เครื่องเป่าลมร้อน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคีบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
  - 9.1 น้ำยาล้างจาน
  - 9.2 น้ำปอดประจุ
  - 9.3 อะซิโตน
  - 9.4 เอทานอล

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP93
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius

4. แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม (mask) ที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ
5. สารตั้งต้น CdS บริสุทธิ์ชนิดผง 99.995 เปอร์เซ็นต์
6. สารตั้งต้น CdSe บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
7. สารตั้งต้น  $\text{In}_2\text{S}_3$  บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
8. ซ้อนตักสารเคมี

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

#### 3.1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

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



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

#### 3.1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM)

ในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) MODEL : EVO®MA10 สามารถวัดในโหมด

Secondary Electron ,Backscattered Electrons และ VP Mode ซึ่งวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการส่งผ่านทางแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

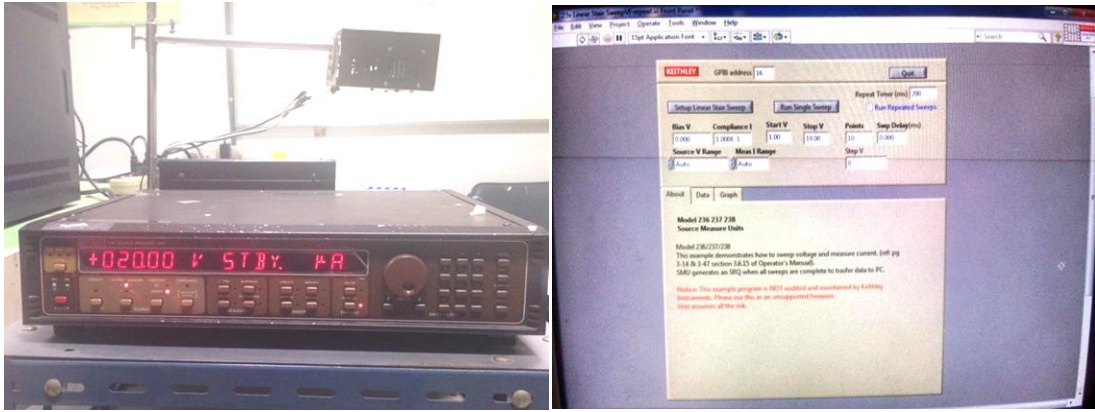
ในการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $\text{He } \lambda \text{ ios } \alpha$ ) ความยาวคลื่นแสงในช่วง 200-1,000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น ( $\text{He } \lambda \text{ ios } \alpha$ )

### 3.1.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

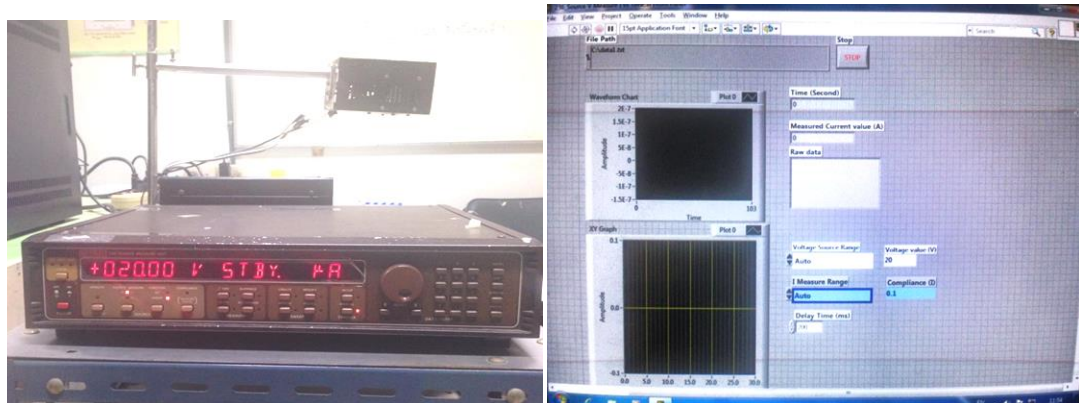
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น

### 3.1.3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง

- อิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- หลอดฮาโลเจนชนิด ELH (120 โวลต์, 300 วัตต์)
- โปรแกรม Lab View



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

### 3.1.3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

### 3.1.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง

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

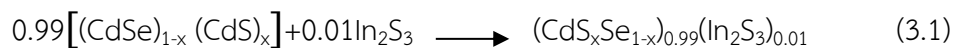


รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ องค์ประกอบต่าง ๆ ( $x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ $1$ ตามลำดับ) เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

#### 3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq X \leq 1$ )

ปฏิกิริยาเคมี คือ



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  จำนวน 1 กรัม ตามตารางที่ 3.1 บดคลุกเคล้าให้เข้ากันในโครกอากาศเป็น

มวลอะตอมของ Cd = 112.40 กรัม/โมล

S = 32.06 กรัม/โมล

Se = 78.96 กรัม/โมล

In = 114.82 กรัม/โมล

มวลโมเลกุลของ CdS = 144.46 กรัม/โมล

CdSe = 191.36 กรัม/โมล

$\text{In}_2\text{S}_3$  = 325.82 กรัม/โมล

#### กรณี $x = 0.00$

มวลโมเลกุลของผลึก

$$(\text{CdS}_{0.0}\text{Se}_{1.0})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} = 0.99[(1.0 \times 191.36)] + [(0.01 \times 325.82)] \\ = 192.7046 \text{ กรัม/โมล}$$

ถ้าต้องการเตรียมผลึก  $(\text{CdSe}_{1.0})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม

$$\text{จะต้องใช้ CdSe} = \frac{(0.99)(1.0)(191.36)}{192.7046} \\ = 0.9830 \text{ กรัม}$$

$$\text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 = \frac{(0.01)(325.82)}{192.7046} \\ = 0.0169 \text{ กรัม}$$

#### กรณี $x = 0.20$

มวลโมเลกุลของผลึก

$$(\text{CdS}_{0.2}\text{Se}_{0.8})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} = 0.99[112.40 + (0.2)(32.06) + (0.8)(78.96)] + [(0.01 \times 325.82)] \\ = 183.4184 \text{ กรัม/โมล}$$

ถ้าต้องการเตรียมผลึก  $(\text{CdS}_{0.2}\text{Se}_{0.8})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม

$$\text{จะต้องใช้ CdS} = \frac{(0.99)(0.2)(144.46)}{183.4184} \\ = 0.1559 \text{ กรัม}$$

$$\text{จะต้องใช้ CdSe} = \frac{(0.99)(0.8)(191.36)}{183.4184} \\ = 0.8262 \text{ กรัม}$$

$$\text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 = \frac{(0.01)(325.82)}{183.4184} \\ = 0.0177 \text{ กรัม}$$

#### กรณี $x = 0.40$

มวลโมเลกุลของผลึก

$$(\text{CdS}_{0.4}\text{Se}_{0.6})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} = 0.99[112.40 + (0.4)(32.06) + (0.6)(78.96)] + [(0.01 \times 325.82)]$$

$$= 174.1322 \text{ กรัม/โมล}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.4}\text{Se}_{0.6})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.99)(0.4)(144.46)}{174.1322} \\ &= 0.3285 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(0.99)(0.6)(191.36)}{174.1322} \\ &= 0.6527 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.01)(325.82)}{174.1322} \\ &= 0.0187 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

### กรณี x = 0.60

มวลโมเลกุลของผงผลึก

$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.6}\text{Se}_{0.4})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} &= 0.99[112.40+(0.6)(32.06)+(0.4)(78.96)] + [(0.01 \times 325.82)] \\ &= 164.8460 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.6}\text{Se}_{0.4})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.99)(0.6)(144.46)}{164.8460} \\ &= 0.5205 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(0.99)(0.4)(191.36)}{164.8460} \\ &= 0.4596 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.01)(325.82)}{164.8460} \\ &= 0.0197 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

### กรณี x = 0.80

มวลโมเลกุลของผงผลึก

$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{0.8}\text{Se}_{0.2})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} &= 0.99[112.40+(0.8)(32.06)+(0.2)(78.96)] + [(0.01 \times 325.82)] \\ &= 155.5598 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{0.8}\text{Se}_{0.2})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.99)(0.8)(144.46)}{155.5598} \\ &= 0.7354 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdSe} &= \frac{(0.99)(0.2)(191.36)}{155.5598} \\ &= 0.2435 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.01)(325.82)}{155.5598} \\ &= 0.0209 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

### กรณี x = 1.00

มวลโมเลกุลของผงผลึก

$$\begin{aligned} (\text{CdS}_{1.0}\text{Se}_{0.0})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} &= 0.99[(1.0 \times 144.46)] + [(0.01 \times 325.82)] \\ &= 146.2736 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก  $(\text{CdS}_{1.0}\text{Se}_{0.0})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{จะต้องใช้ CdS} &= \frac{(0.99)(1.0)(144.46)}{146.2736} \end{aligned}$$

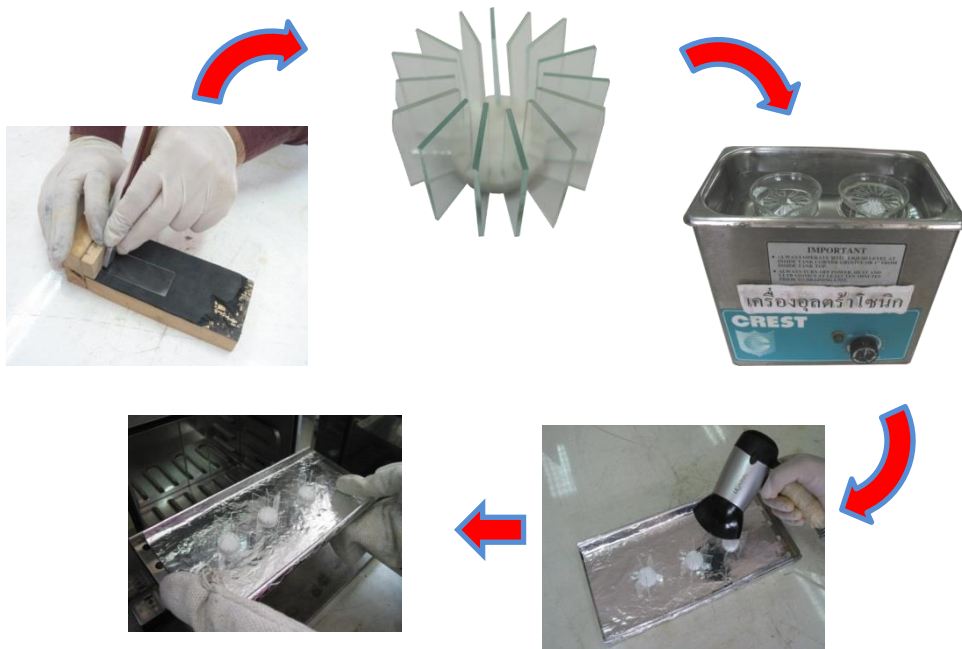
$$\begin{aligned} &= 0.9777 \text{ กรัม} \\ \text{จะต้องใช้ } \text{In}_2\text{S}_3 &= \frac{(0.01)(325.82)}{146.2736} \\ &= 0.0223 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ CdS, CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe}_{1-x}\text{S}_x)_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq X \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Mold Fraction	Starting Materials Content (g)			Substrate Temperature (°C)
	CdS	CdSe	$\text{In}_2\text{S}_3$	
0.00		0.9830	0.0169	100
0.20	0.1559	0.8262	0.0177	100
0.40	0.3285	0.6527	0.0187	100
0.60	0.5205	0.4596	0.0197	100
0.80	0.7354	0.2435	0.0209	100
1.00	0.9777		0.0223	100

### 3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ให้มีขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร นำไปแช่ทำความสะอาดด้วยฟองน้ำและน้ำยาล้างจานทั้งสองด้านเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่นออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดปกติ
2. เสียบแผ่นกระจกสไลด์เข้ากับตัวยึดเทฟลอนแล้วนำไปล้างด้วยน้ำป้อนประจุ
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำป้อนประจุ 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้งโดยไม่ต้องถอดกระจกสไลด์ออกจากตัวยึดที่ทำด้วยแท่งเทฟลอน ไม่ควรเป่าลมร้อนที่บริเวณเดียวและใกล้เกินไปเพราะจะส่งผลให้น้ำที่ติดอยู่ที่ผิวกระจกแห้งอย่างรวดเร็วแล้วทิ้งคราบน้ำเอาไว้ ควรเป่าวนรอบ ๆ
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
8. เมื่อกระจกสไลด์เย็นตัวเก็บใส่ถุงซิปล็อคแยกจากกันในแต่ละชิ้น เพื่อป้องกันกระจกสไลด์ชูดกันเป็นรอย จากนั้นเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

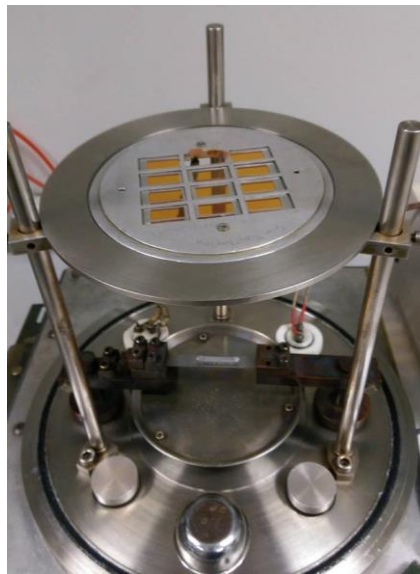
### 3.2.3 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบ ลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ

1. ใช้สาลีเช็ดผิวภายในภาชนะสุญญากาศและกระจกมองด้านหน้า ผิวหน้าหัววัดความหนาและชิ้นส่วนภายในอื่นๆด้วยอะซิโตน ยกเว้นโอริงบริเวณฐานของระบบสุญญากาศ จะต้องเช็ดด้วยเมทานอลเพราะหากเช็ดด้วยอะซิโตนอาจทำให้โอริงเสียหายได้
2. เช็ดทำความสะอาดแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมด้วยอะซิโตนแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง
3. ชั่งสารเคมีตามปริมาณ ดังนี้
  - การเคลือบฟิล์ม  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ตามองค์ประกอบ  $x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  และ  $1.0$  ชั่งสารตั้งต้นให้มือน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม ตักใส่ภาชนะที่ใส่สารตั้งต้น (boat) ที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศ

### 3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ปรับระยะห่างของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมกับขอบด้านบนของภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศให้มีระยะเท่ากับ 17 เซนติเมตร
2. ตักสารตั้งต้นใส่ให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศพอดี
3. วางแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับระเหยสารตั้งต้นลงบนขาตั้งในระบบสุญญากาศ

4. วางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วลงบนช่องของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม แล้ววางแผ่นทำความร้อน (heater) ทับลงบนกระจกสไลด์อีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. ตรวจสอบระบบวัดอุณหภูมิ ปิดระบบสุญญากาศ แล้วทำการสูบล้างอากาศออกจนได้ความดันอยู่ในระดับ  $3 \times 10^{-5}$  ถึง  $4 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์
6. ใช้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆ จ่ายกระแสไฟฟ้าทีละน้อยจนได้กระแสไฟฟ้าประมาณ 100-150 แอมแปร์ ในขณะนี้อ่างตั้งต้นจะเริ่มระเหิด ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นกับปริมาณสารตั้งต้นและความดันเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า
7. เมื่อสังเกตเห็นสารตั้งต้นระเหิดจนหมด ลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจนเป็นศูนย์ ปิดระบบที่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบสุญญากาศลดลงจนมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงปิดระบบปั๊มสุญญากาศและนำฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วไปเก็บไว้ในหม้ออูดความชื้น



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

### 3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

#### 3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นา

โนเมตร เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

### 3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยมีมุม  $2\theta$  เริ่มจาก 20-70 องศา นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกขนาดของเกรน และตรวจสอบระนาบผลึกที่ปรากฏ

### 3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า ยี่ห้อ Oxford รุ่น JEOL, JSM-7610F และ Oxford, X-MaxN 20 โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 50,000 และ 100,000 เท่า นำข้อมูลที่ได้มาประมาณขนาดของเกรนและศึกษาลักษณะของชั้นฟิล์มจากภาพตัดขวาง

### 3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

#### 3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R$ ) ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) และสภาพ

ต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร ( $\rho_B$ ) ด้วยวิธีสองขั้ว

1. ทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วโดยใช้สายไฟขนาดเล็กสองเส้นมาทำให้เป็นเส้นตรงวางห่างกันโดยประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และป้ายด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$
2. ต่อปลายลวดตัวนำเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง Keithley รุ่น 236
3. โบแอสแรงดันไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง โดยขนาดของแรงดันโบแอส จะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำจากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าไปคำนวณหาความต้านทานไฟฟ้า
4. หาค่า  $R_s$  จากสมการ  $R_s = R \frac{w}{l}$  โดย  $R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง,  $w$  คือ ความกว้างของฟิล์มบาง และ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างกาวเงินนำไฟฟ้าแต่ละเส้น
5. หาค่า  $\rho_B$  จากสมการ  $\rho_B = \frac{RA}{l}$  โดย  $R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $w \cdot d$  และ  $d$  คือ ความหนาของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

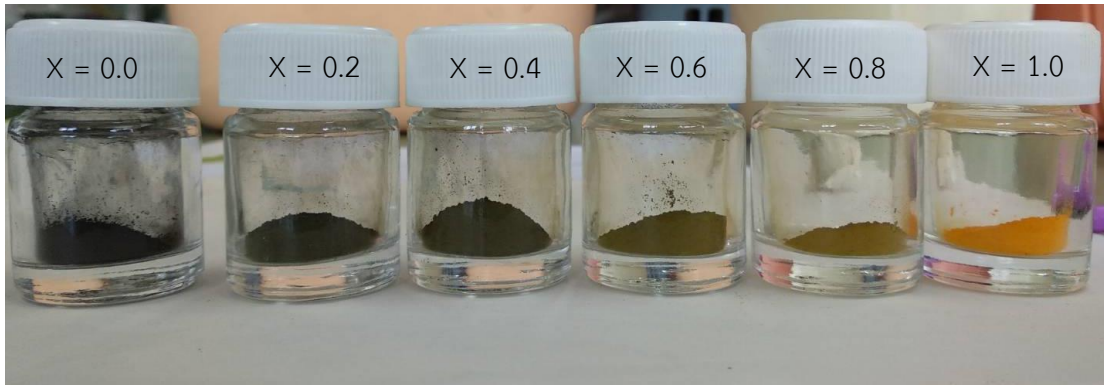
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

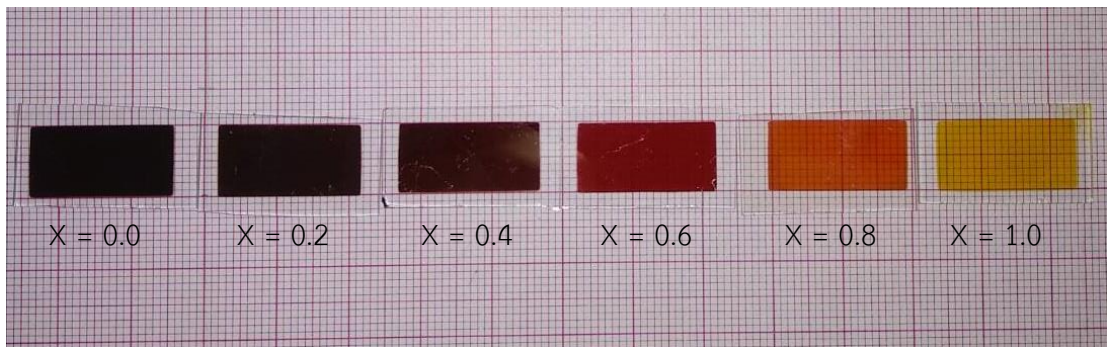
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐาน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่มีปริมาณของเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งทำการเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ ความดันต่ำประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ ซึ่งในขณะที่ทำการระเหยสารเคมีจะทำการควบคุมอุณหภูมิ ของแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการระเหยสารเคมีเสร็จ เรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศต่ออีก 30 นาที จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษา สมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญ และยังใช้เทคนิค FTIR ในการตรวจสอบสัมประสิทธิ์ในการส่งผ่าน แสงย่านรังสีอินฟราเรดเพื่อศึกษาโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอมในฟิล์มบาง ศึกษาสมบัติ ทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และตลอดจนทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพ นำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อทำการคำนวณหาค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลง บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศ

ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดงเข้ม และ เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ  $x \geq 0.2$  ลักษณะสีของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเริ่มอ่อนลงตามลำดับ จนกระทั่งที่ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ  $x = 1$  พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเป็นสีเหลือง โดยที่ ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำทั้งหมดเกาะติดบนแผ่นฐานรองรับแก้วกระจกสไลด์ได้ดี ไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มี รุพรุณ ฟิล์มบางนี้ได้จากการเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ความ ดันต่ำประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์ ซึ่งในขณะที่ทำการระเหยสารเคมีจะทำการควบคุมอุณหภูมิของแผ่น ฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการระเหยสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้วจึง ได้ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศต่ออีก 30 นาที รูปถ่ายจะ แสดงในรูปที่ 4.1และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงผงผลึกของสารสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



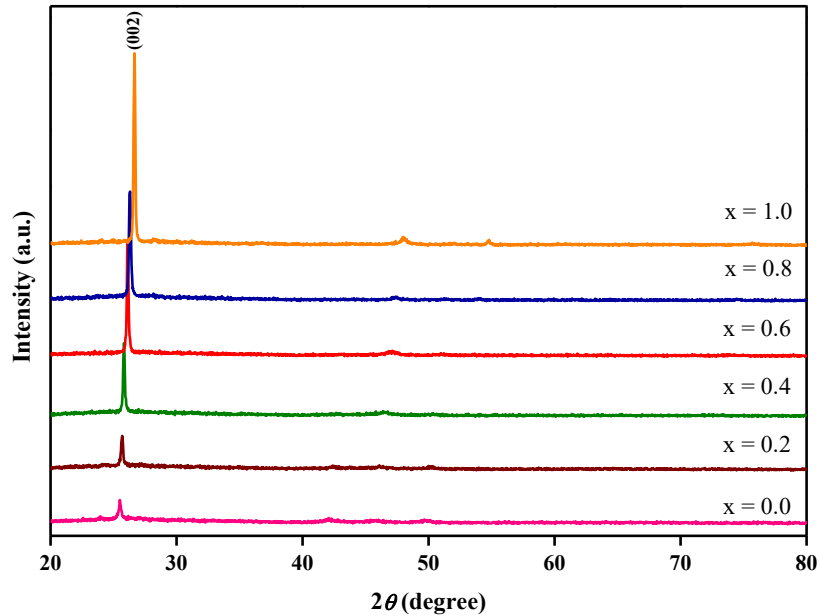
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2 ผลศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) เด่นชัด

ที่สุดอยู่ที่มุม  $2\theta \approx 25.50$  องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 77-2306 พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐานเป็นการบ่งบอกว่าระนาบการเลี้ยวเบน (002) มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลดังรูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.3** แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้ [33,34]

$$a_H = a/(2)^{1/2} \quad (4.1)$$

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

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าทุกค่าของเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $0 \leq x \leq 1$ ) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดียวและมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล

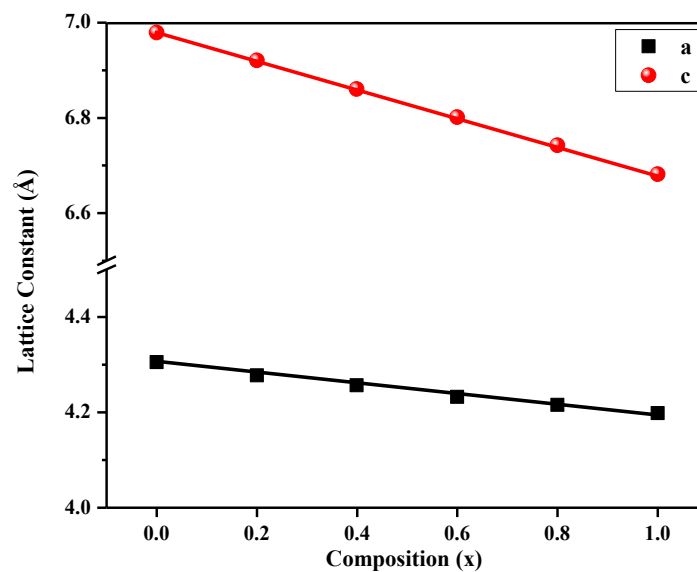
จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าความเข้มของพีคของระนาบ (002) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเศษส่วนโมลที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าฟิล์มบางเป็นเฟสเดี่ยวและเป็นโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัล

เมื่อพิจารณาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $a_H$ ,  $c_H$  กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าเป็นระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

$$\text{จาก} \quad 2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n=1,2,3,\dots \quad (4.3)$$

$$\text{และ} \quad \frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.4)$$

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกที่สอดคล้องกับระนาบ (111) แสดงว่า  $h=1, k=1, l=1$  ค่าคงที่ของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล ( $a_H, c_H$ ) สามารถเขียนได้ในรูปของค่าคงที่ของโครงผลึกแบบคิวบิก ( $a$ ) แทนได้



**รูปที่ 4.4** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก  $a_H$  และ  $c_H$  กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

$$\text{จากกฎของแบรกก์} \quad 2d\sin\theta = \lambda \quad (4.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงผลึกในระบบคิวบิก กับ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d) และ ดัชนีมิลเลอร์ (hkl) คือ

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

แล้วจะได้ว่า 
$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (4.6)$$

หรือ 
$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

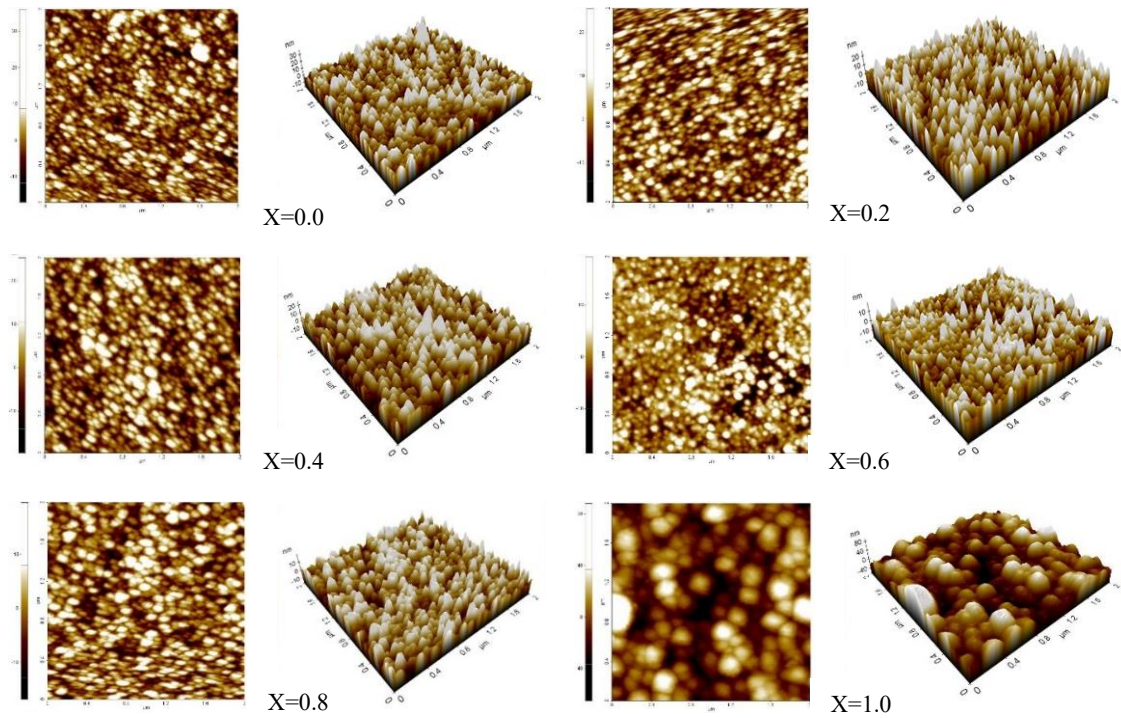
ส่วนระบบผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะได้ว่า

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.7)$$

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	$2\theta$	Lattice Constant (Å)		Grain Size (nm)	Dislocation Density (line/m <sup>2</sup> )	Strain	Stacking Fault Probability
		a <sub>c</sub>	a <sub>H</sub>				
0.0	25.50	4.305	6.979	42.52	$3.860 \times 10^{15}$	$2.975 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$
0.2	25.68	4.277	6.920	47.26	$3.104 \times 10^{15}$	$2.378 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-3}$
0.4	25.82	4.256	6.860	48.35	$2.949 \times 10^{15}$	$2.070 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^{-3}$
0.6	26.12	4.232	6.801	50.68	$2.654 \times 10^{15}$	$1.462 \times 10^{-3}$	$1.63 \times 10^{-3}$
0.8	26.41	4.215	6.742	53.57	$2.350 \times 10^{15}$	$1.043 \times 10^{-3}$	$1.71 \times 10^{-3}$
1.0	26.66	4.198	6.682	55.71	$2.152 \times 10^{15}$	$2.340 \times 10^{-3}$	$1.98 \times 10^{-3}$

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



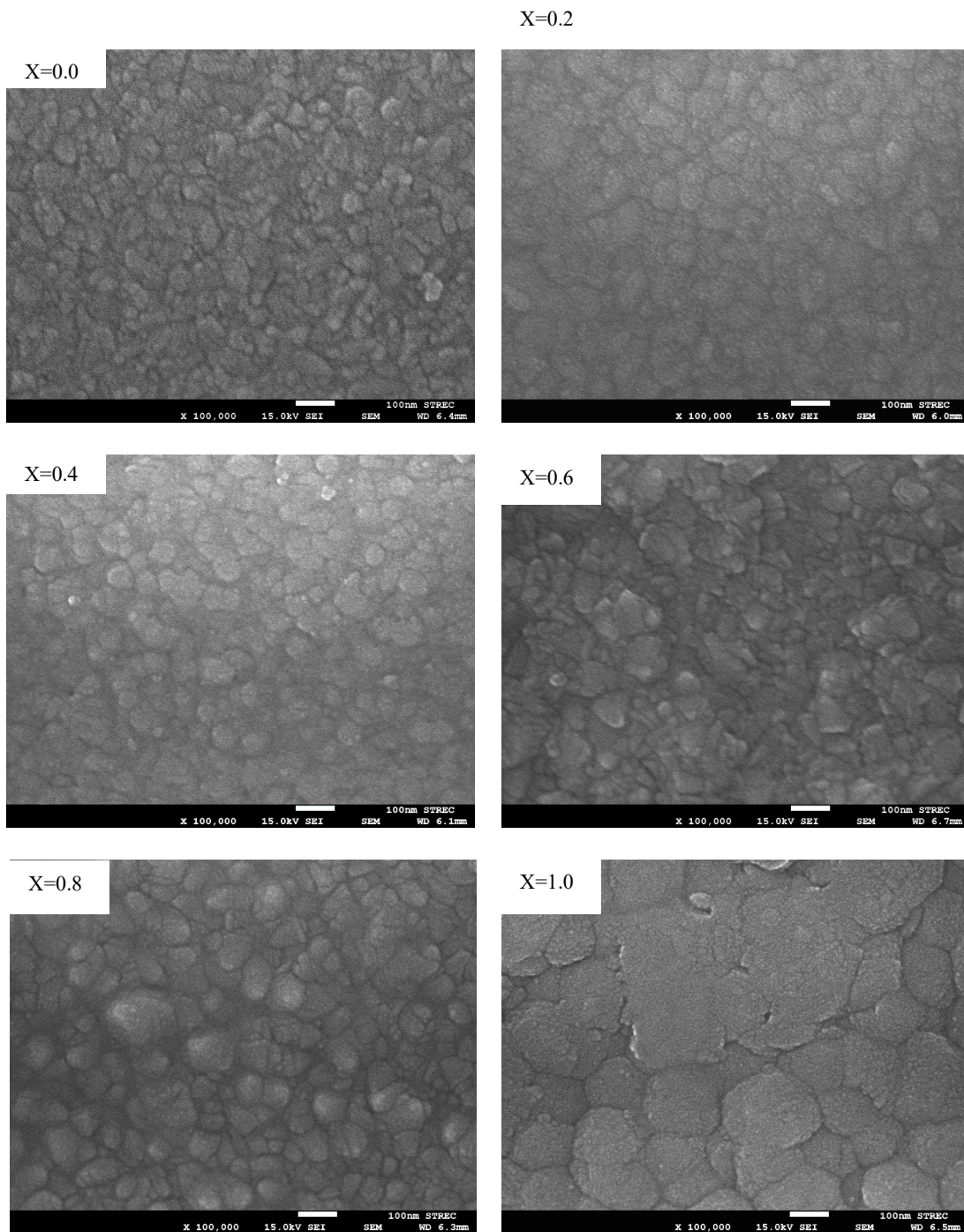
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Roughness (nm)	Grain Size (nm)
0.0	5.49	70
0.2	6.05	54
0.4	6.29	58
0.6	3.93	62
0.8	5.33	78
1.0	17.04	82

#### 4.2.3 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

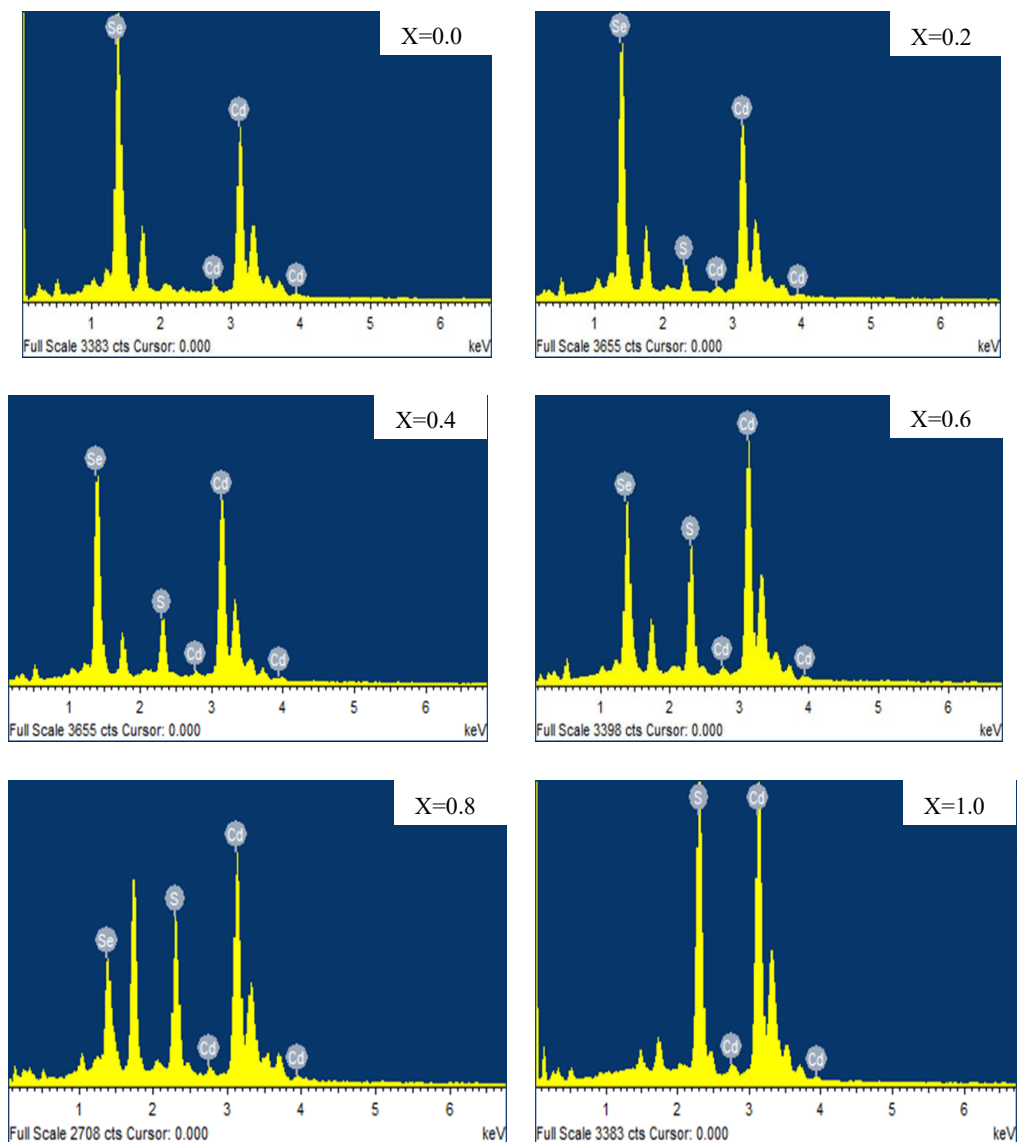
การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า เป็นการศึกษาถึงลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่กำลังขยาย 100,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการแสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ สังเกตได้ว่าที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีการรวมตัวของกลุ่มก้อนอนุภาค (cluster) ที่มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป และสังเกตได้ว่าขนาดของกลุ่มก้อนอนุภาคจะมีแนวโน้มโตขึ้นเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ x ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย FESEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

การวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

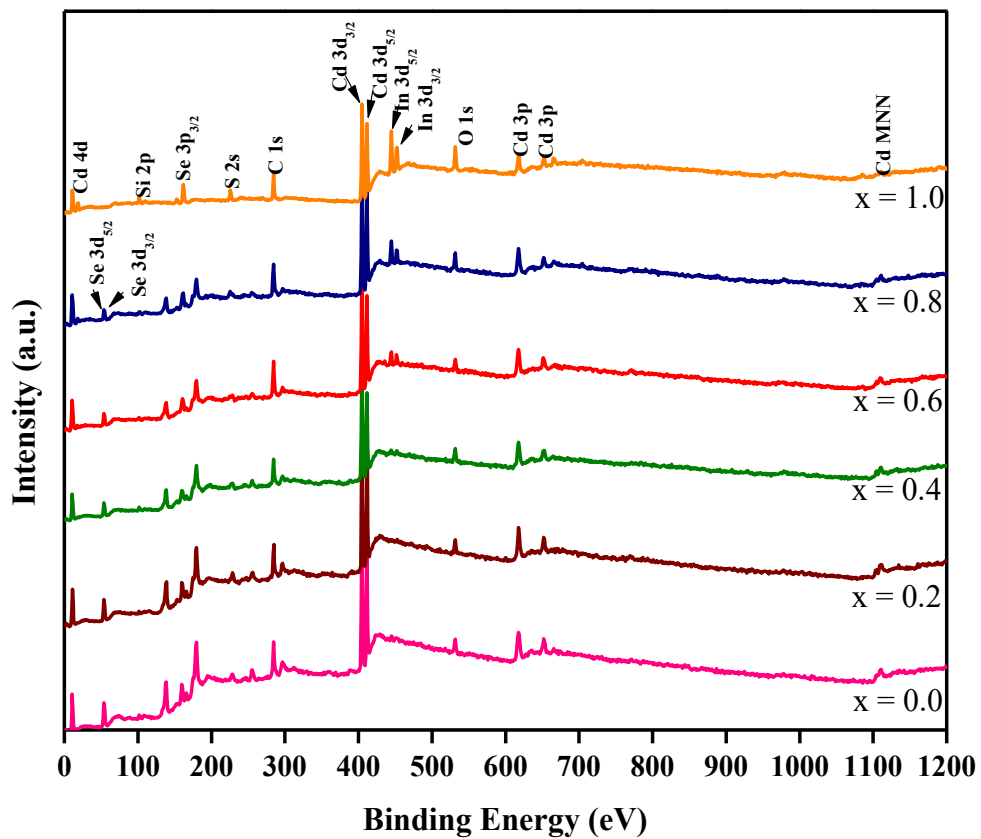
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสูงตรงพีคที่ตรงกับธาตุ S จะมีค่าสูงขึ้น แต่ความสูงของพีคที่ตรงกับธาตุ Se จะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าปริมาณของธาตุ S ที่อยู่ในฟิล์มบางมีมากขึ้น ซึ่งช่วยยืนยันได้ถึงกาแทนที่อะตอมของธาตุ Se ด้วยอะตอมของธาตุ S ในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งนี้จากสเปกตรัม EDS ข้างต้นจะเห็นได้ชัดว่าไม่ปรากฏพีคของธาตุ In เนื่องจากปริมาณการเจืออะตอม In ค่อนข้างที่จะน้อยทำให้เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบเกินขอบเขตของเครื่องที่จะสามารถวัดได้ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Cd, Se และ S ที่อยู่ในรูปแบบของน้ำหนักและจำนวนอะตอม แสดงดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

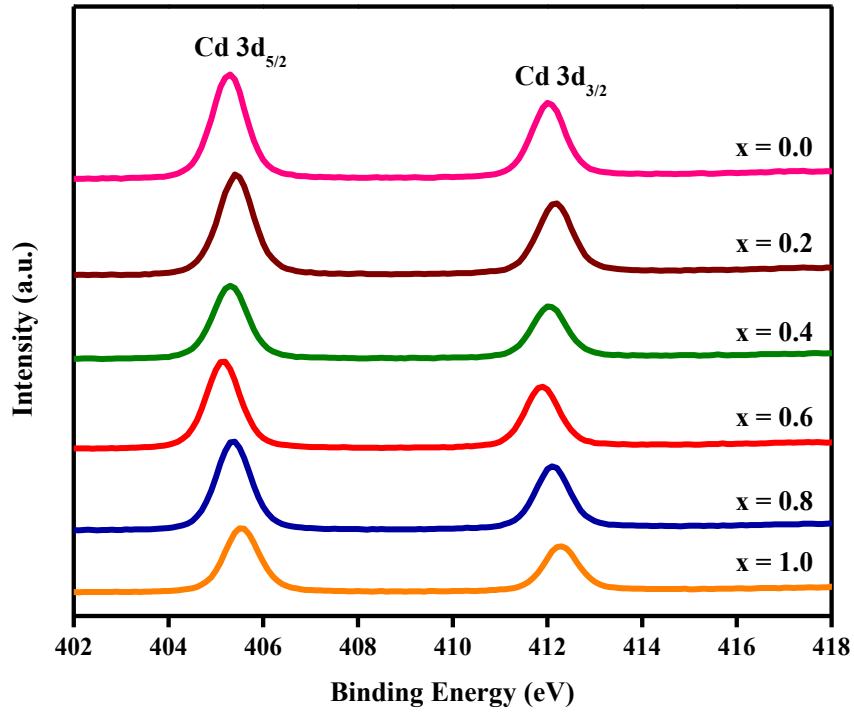
Composition (x)	Elements					
	Cd		Se		S	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
0.0	59.27	50.55	40.73	49.75	-	-
0.2	59.27	47.94	37.67	43.37	3.07	8.69
0.4	62.37	48.32	31.32	34.54	6.31	17.14
0.6	66.67	48.17	22.66	22.28	11.67	29.55
0.8	70.19	48.61	14.52	14.34	15.26	37.05
1.0	77.43	49.46	-	-	22.57	50.54

#### 4.2.5 ผลการศึกษาสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ปลูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

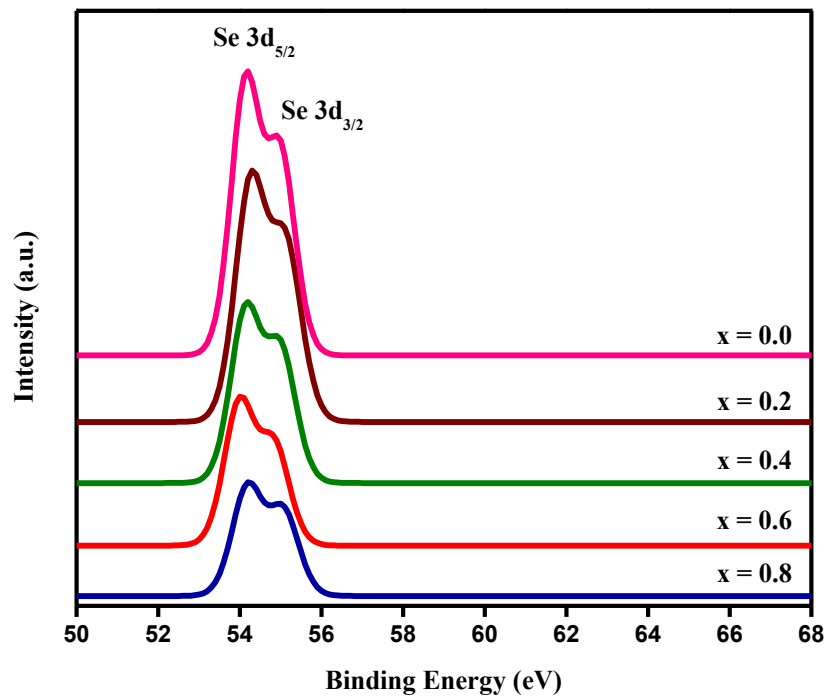
การศึกษาสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ปลูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับแก้วกระจกสไลด์ โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ปลูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) เพื่อเป็นการระบุชนิดของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบาง



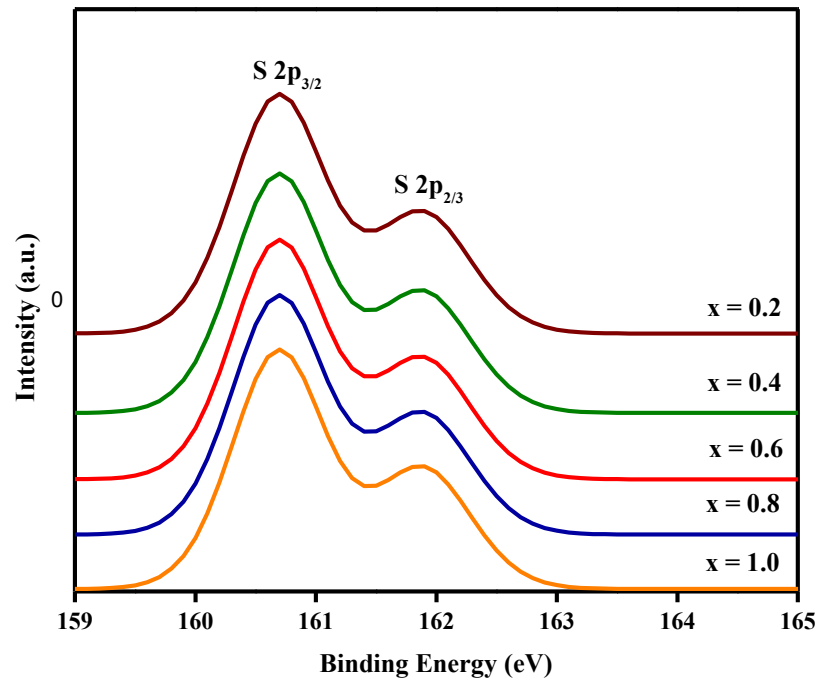
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



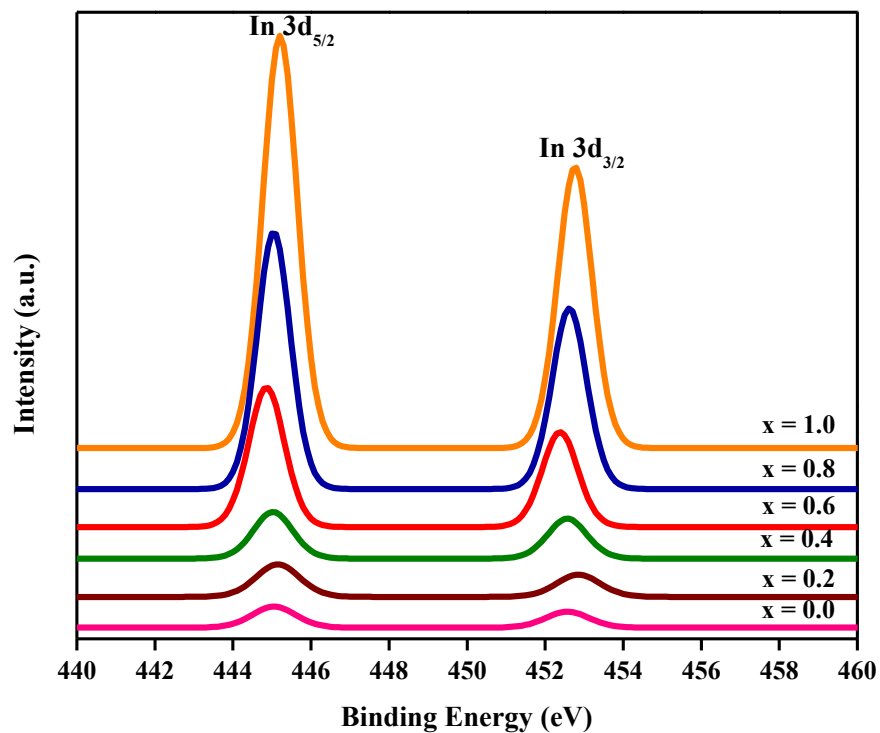
รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 50-68 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 159-165 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 440-460 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

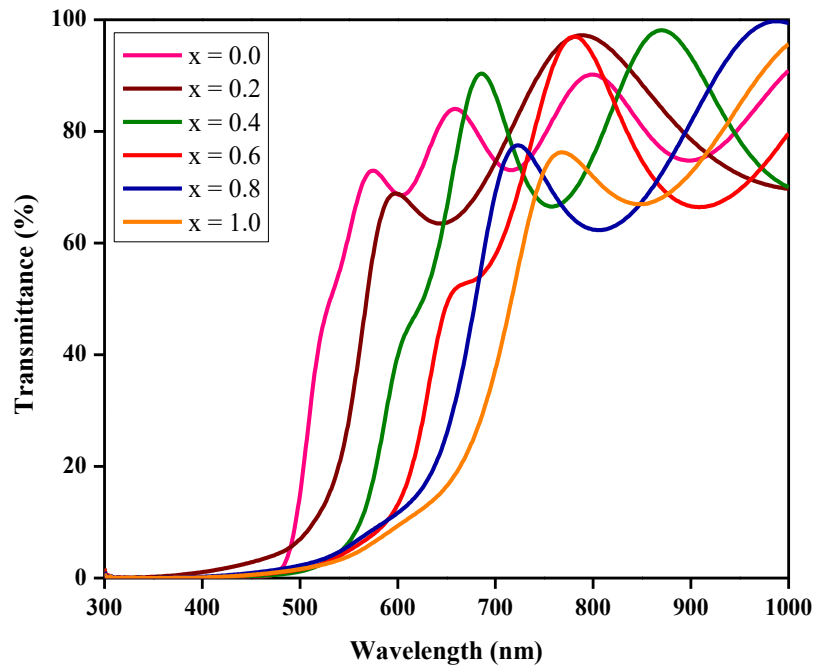
จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS พบธาตุ Cd คือ  $Cd3d_{5/2}$  และ  $Cd3d_{3/2}$  ที่พลังงาน 405.3-405.5 และ 412.0-412.3 eV ดังรูปที่ 4.9 ตามลำดับ ธาตุ Se คือพบ  $Se3d_{5/2}$  และ  $Se3d_{3/2}$  ที่พลังงาน 42.1-42.2 และ 54.9-55.0 eV ดังรูปที่ 4.10 ตามลำดับ และธาตุ In คือพบ  $In3d_{5/2}$  และ  $In3d_{3/2}$  ที่ระดับพลังงาน 445.0-445.2 eV ดังรูปที่ 4.12 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งในการตรวจสอบของธาตุ In ในกรณีการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค EDS ไม่ปรากฏพีคของธาตุ In แต่เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS ปรากฏว่าพบพีคของธาตุ In ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีอะตอมของธาตุ In อยู่ในฟิล์มบางจริง

**ตารางที่ 4.4** แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Binding Energy (eV)							
	Cd		Se		S		In	
	$3d_{5/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{1/2}$	$3d_{5/2}$	$3d_{3/2}$
0.0	405.3	412.0	54.2	55.0	-	-	445.1	452.6
0.2	405.4	412.2	54.3	55.1	161.9	161.3	445.2	452.9
0.4	405.3	412.0	54.1	55.0	161.9	161.3	445.5	452.5
0.6	405.2	411.9	53.9	54.8	161.9	161.3	445.8	452.4
0.8	405.4	412.1	54.1	55.2	161.9	161.3	445.0	452.6
1.0	405.5	412.3			161.9	161.3	445.2	452.7

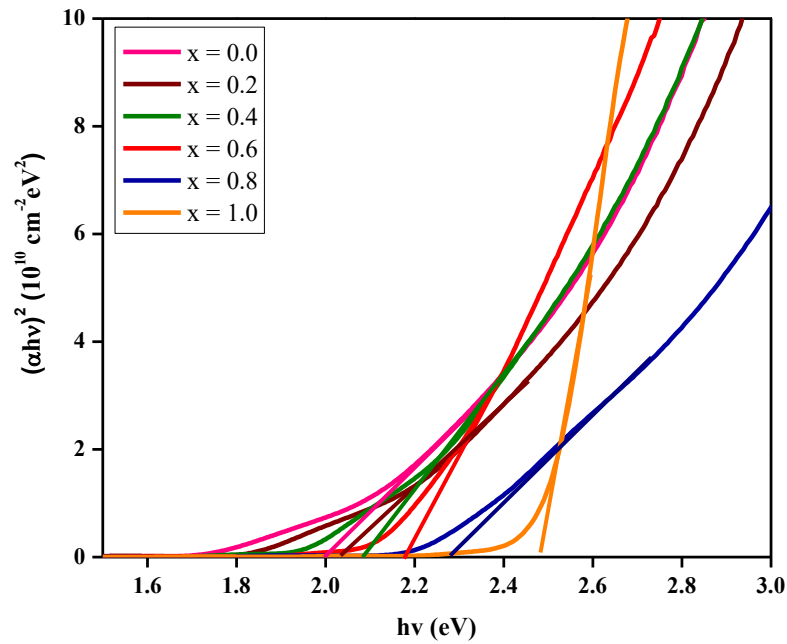
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เราสามารถที่จะหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  โดยทำการลากเส้นตรงการประมาณค่า (extrapolation) ของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

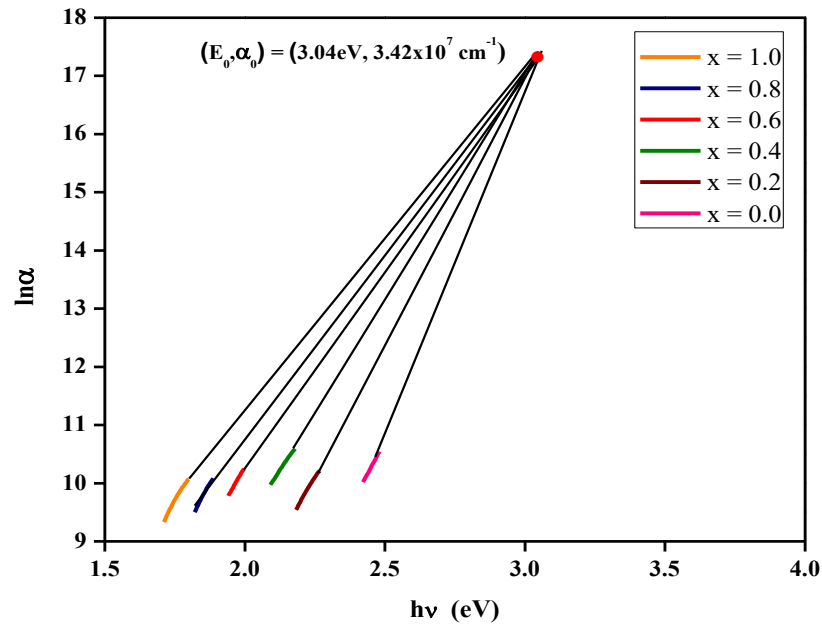
ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จาก การวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเป็นฟังก์ชันแบบเอกซ์โพเนนเชียลของพลังงาน ( $h\nu$ ) ดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_t}\right) \quad (4.8)$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก และ  $\alpha$  คือ ค่าคงตัว

ดังนั้น  $E_t$  จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \alpha$  กับ พลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ดังสมการ

$$\ln \alpha = \left(\frac{1}{E_t}\right)h\nu + \ln \alpha_0 \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\ln\alpha)$  กับ พลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) เพื่อหาค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

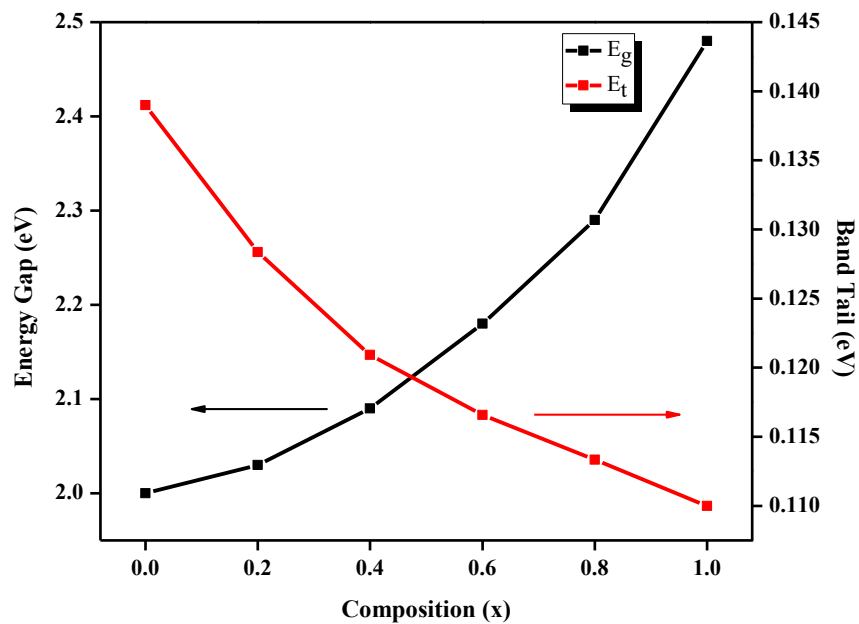
สมการส่วนหางของแถบพลังงานอาจเขียนได้อีกในแบบดังนี้ คือ [38]

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu - E_0}{E_t}\right) \quad (4.10)$$

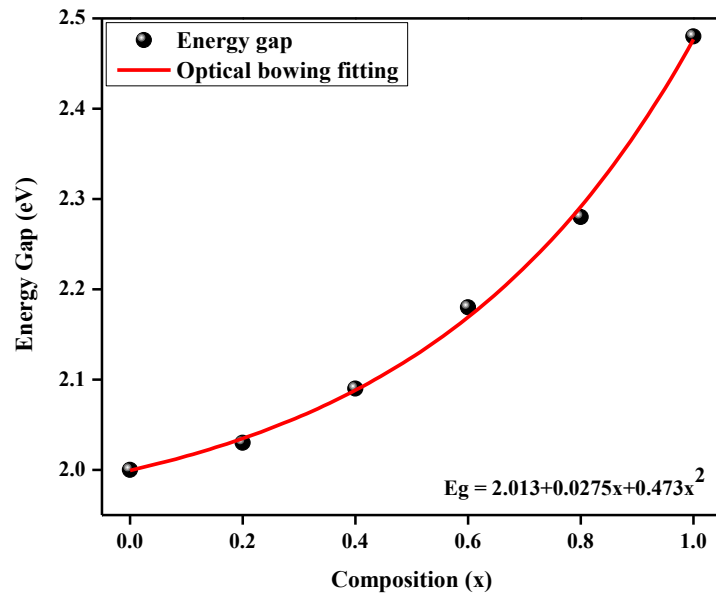
โดยที่  $E_0$  และ  $\alpha_0$  เป็นโคออร์ดิเนตของจุดตัดของเส้นตรงที่ลู่อเข้าหากัน โดยพบว่า  $E_0$  และ  $\alpha_0$  มีค่าเท่ากับ 3.04 อิเล็กตรอนโวลต์ และ  $3.42 \times 10^7$  (เซนติเมตร)<sup>-1</sup> ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน และค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Energy gap (eV)	Band Tail (meV)
0.0	2.00	139
0.2	2.03	128
0.4	2.08	120
0.6	2.18	116
0.8	2.27	113
1.0	2.48	110



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนหางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



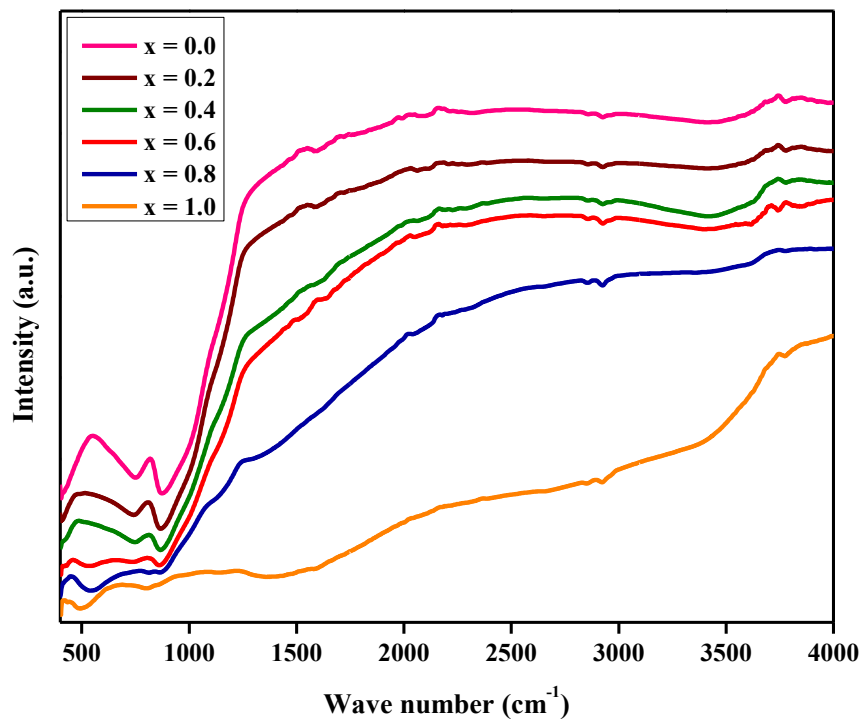
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ในแบบสมการกำลังสองดังนี้ คือ

$$E_g = 2.013 + 0.0275x + 0.473x^2$$

ดังนั้น พารามิเตอร์ความโค้งงอ (bowing parameter) เท่ากับ 0.473

4.3.2 ผลการศึกษาฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 500 – 4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ สามารถอธิบายได้โดยการที่สารดูดกลืนรังสีอินฟราเรด โดยความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบเท่านั้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับเลขคลื่นในช่วงเลขคลื่น 500-4000 ต่อเซนติเมตร ปรากฏแถบการสั่นแบบยืด-หด (stretching mode) ของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Cd-S ที่เลขคลื่น 398-414 ต่อเซนติเมตร S-S ที่เลขคลื่น 498-532 ต่อเซนติเมตร Cd-Se ที่เลขคลื่น 725-746 ต่อเซนติเมตร และแถบการสั่นแบบยืด-หดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่เลขคลื่น 791-808 ต่อเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นแบบยืด-หดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ C-O, C-H และ O-H ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )						
		S-S	Cd-Se	$\text{In}_2\text{S}_3$	C-O	C-H	O-H
0.0	-	-	746	-	1593	2897	3430
0.2	398	-	738	791	1595	2891	3434
0.4	405	-	734	801	1597	2897	3432
0.6	410	534	730	803	1593	2894	3434
0.8	413	518	725	807	1594	2895	3438
1.0	414	498	-	808	1595	2890	3436

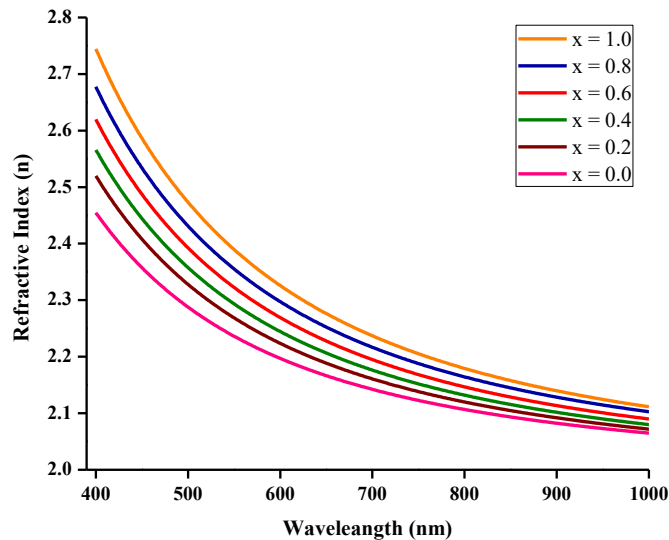
#### 4.3.3 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางแสงของตัวกลาง ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางนิยามได้จาก 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 และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรูปแบบคำสั่งของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  โดยโปรแกรม PARAV 2.0 [39]

**รูปที่ 4.19** แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

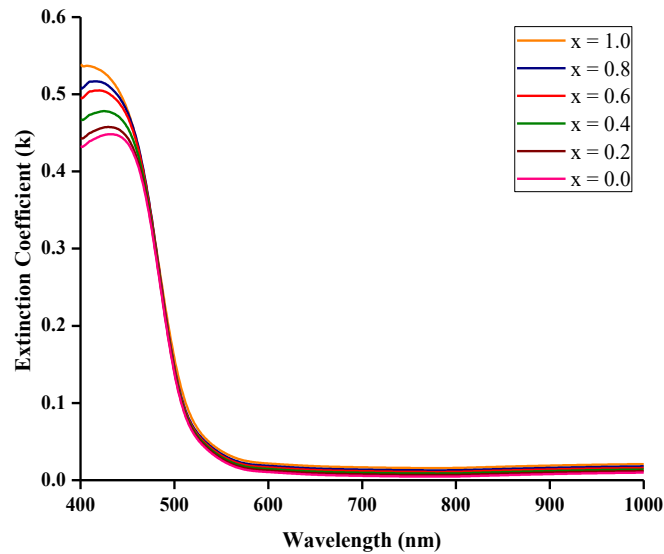
โปรแกรม PARAV 2.0 จะทำการคำนวณค่าดัชนีหักเหโดยอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยข้อมูลความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กันกับสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ให้อยู่ในช่วง 400-1000 นาโนเมตร โปรแกรม PARAV 2.0 จะต้องอาศัยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงในรูปของ notepad จึงทำการสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง หลังจากทีโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกเป็น

ไฟล์ notepad ถูกบันทึกเป็นนามสกุล .txt ภายในไฟล์จะประกอบไปด้วยข้อมูลของ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงในช่วงต่าง ๆ และค่าช่องว่างแถบพลังงาน ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณเสร็จเพื่อมาหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.20-4.26



**รูปที่ 4.20** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

หากพิจารณาความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) จะแสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าเมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจะมีแนวโน้มลดลง โดยในช่วงความยาวคลื่นสั้น ๆ (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 650 นาโนเมตร) ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วแต่เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น (ความยาวคลื่นสูงกว่า 650 นาโนเมตร) แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำตามความยาวคลื่นสอดคล้องดีกับสมการคอดี  $n = a + (b/\lambda^2)$

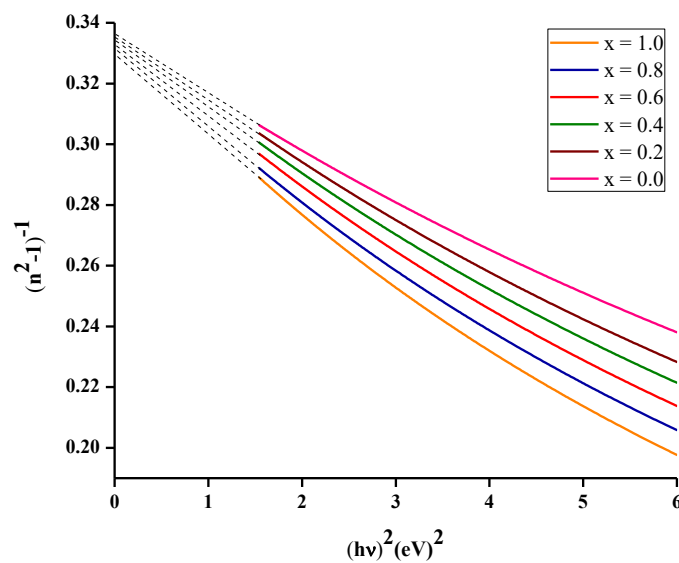


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง โดยรูปทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีค่าลดลงช้า ๆ เข้าสู่ศูนย์นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีบทบาทมากที่ช่วงพลังงานมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดังกล่าวและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีบทบาทลดลงจนน้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงที่ความยาวคลื่นแสงมีค่าสูง หรือในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่าง ๆ ดังความสัมพันธ์  $k = \alpha\lambda/4\pi$  ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงในช่วงที่มีค่าพลังงานสูงจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อใช้ในการทรานซิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำของสารกึ่งตัวนำ

4.3.4 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เวมเพิม-โดโตเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.22-4.24 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ [40,41]

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (h\nu)^2} \quad (4.11)$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2 \quad (4.12)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.12) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (4.13)$$

$$\text{และ จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.13) และ (4.14) 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

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (4.15)$$

เมื่อ  $\beta = 0.26 \pm 0.03$  อิเล็กตรอนโวลต์

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

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

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (4.16)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (4.17)$$

เมื่อ  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง เมื่อเป็นกรณีโมเมนต์ลำดับที่  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  ตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ( $n^*$ ) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (4.18)$$

$$\text{เมื่อ} \quad n^* = n - ik \quad (4.19)$$

เมื่อ  $n$  = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

$k$  = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (4.20)$$

$$\text{โดยที่} \quad \varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (4.22)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity;  $\sigma$ ) ไว้ดังนี้

$$\text{คือ} \quad \sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

$$\text{เมื่อ} \quad \sigma_1 = \omega \varepsilon_2 \varepsilon_0 \quad (4.23)$$

$$\text{และ} \quad \sigma_2 = \omega \varepsilon_1 \varepsilon_0 \quad (4.24)$$

ตารางที่ 4.7 เป็นตารางแสดงผลของการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลอง ออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณ และแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสง ค่าพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ  $M_{-1}$  และ  $M_3$  จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ลำดับอนันต์ ( $\varepsilon_\infty$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการคوشي  $n = a + (b/\lambda^2)$  เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงอยู่ในระดับอนันต์ แล้วในพจน์ของ  $(b/\lambda^2)$  มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ลำดับอนันต์ ( $\varepsilon_\infty$ ) จึงมีค่าเทียบเท่าตัวแปร  $a$  และจากสมการที่ (4.25) ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสงของฟิล์มบาง ลำดับอนันต์ได้จากสมการคوشي (Cauchy's equation)

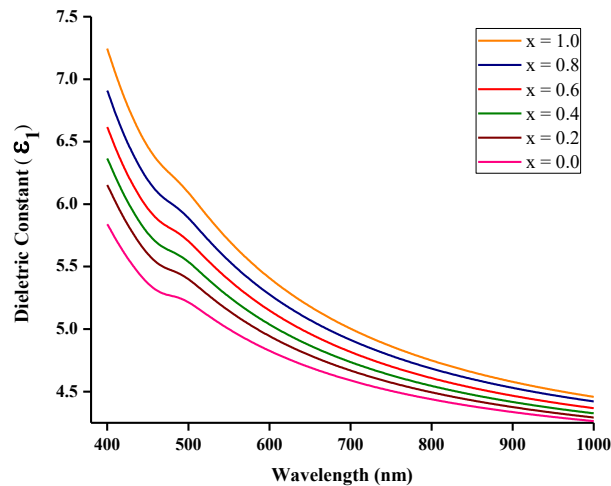
$$n = a + \left( \frac{b}{\lambda^2} \right) \quad (4.25)$$

Composition (x)	$n = a + b/\lambda^2$		Wemple-DiDomenico Analysis						$E_t$ (eV)	$E_g$ (eV)	$E_0/E_g$	$\epsilon_L$	(N/m*) $cm^{-3} \cdot g^{-1}$
	a	$b(nm)^2$	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$M_{-1}$	$M_3$ (eV) <sup>-2</sup>	$f(eV)^2$	$(\epsilon_\infty)$					
0.0	1.990	$1.206 \times 10^5$	4.925	14.645	2.973	0.122	72.126	4.639	0.139	2.00	2.462	4.675	$4.420 \times 10^{54}$
0.2	1.993	$1.094 \times 10^5$	4.714	14.062	3.982	0.134	66.288	4.682	0.128	2.03	2.322	4.769	$5.097 \times 10^{54}$
0.4	1.989	$1.008 \times 10^5$	4.613	13.804	2.992	0.140	63.677	4.727	0.120	2.09	2.207	4.839	$5.551 \times 10^{54}$
0.6	1.987	$9.258 \times 10^4$	4.513	13.565	3.005	0.147	61.218	4.795	0.116	2.18	2.070	4.928	$5.524 \times 10^{54}$
0.8	1.986	$8.535 \times 10^4$	4.440	13.394	3.016	0.152	59.469	4.835	0.113	2.29	1.938	5.017	$6.635 \times 10^{54}$
1.0	1.990	$7.430 \times 10^4$	4.323	13.110	3.032	0.162	56.674	4.883	0.110	2.48	1.743	5.087	$7.350 \times 10^{54}$

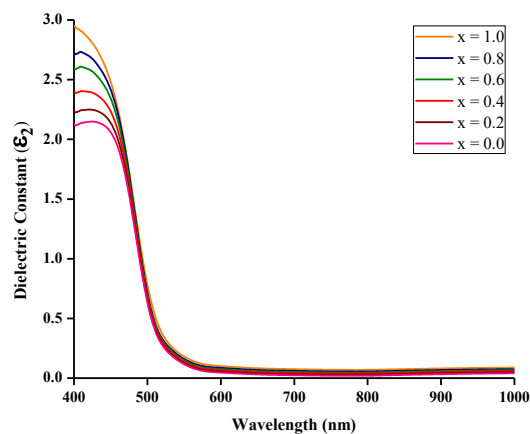
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.5 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สื่อถึงควมมีขั้วของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ วัสดุใดที่มีความเป็นขั้วสูงและจะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้ได้ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ประกอบไปด้วยส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

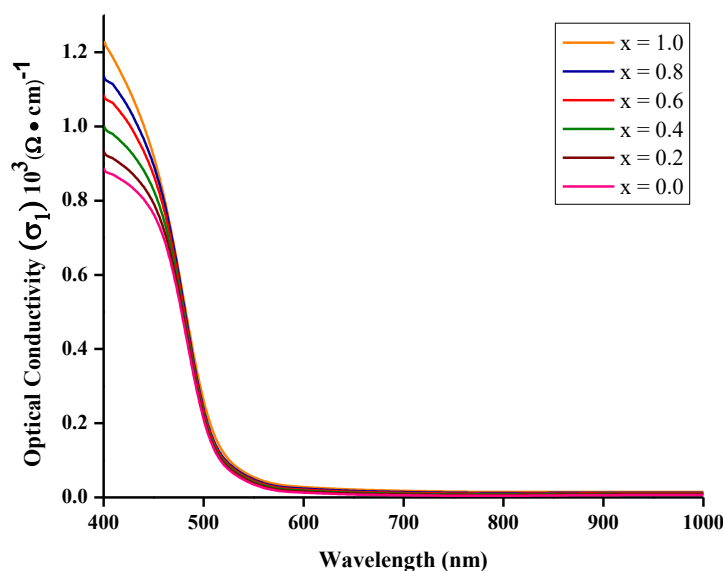


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

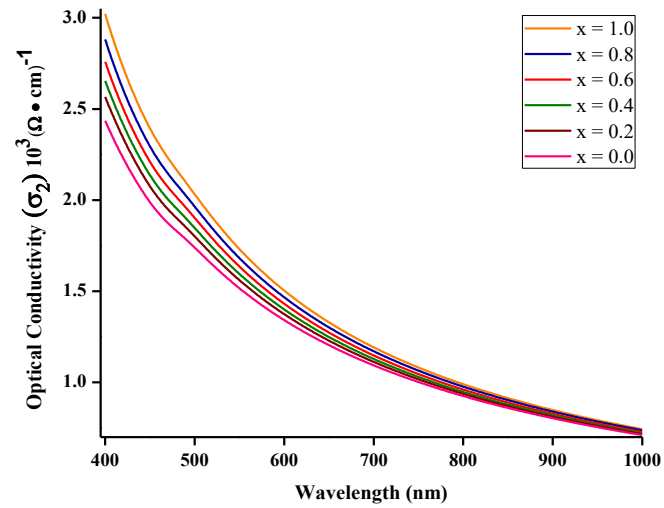
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) พบว่าที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะเพิ่มขึ้น ส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของฟิล์มบางทุกค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าสูงขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.25 และ 4.26 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลของอะตอม (x) ที่แตกต่างกัน พิจารณาที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลของอะตอม (x) เพิ่มขึ้น แล้วจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงจะมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาค่าเศษส่วนโดยโมล (x) ค่าใดค่าหนึ่งทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น

เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งเป็นความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) แสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนแสงที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ดี ส่วนจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

#### 4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้สนามแม่เหล็กถาวรและไม่มีสนามแม่เหล็ก ตลอดจนการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบาง เพื่อใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ

##### 4.4.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ( $0 \leq x \leq 1$ ) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีความกว้างเป็น  $w$  มีความยาว  $l$  มีความต้านทาน  $R$  และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบแผ่น ( $R_{sh}$ ) จะแสดงดังความสัมพันธ์

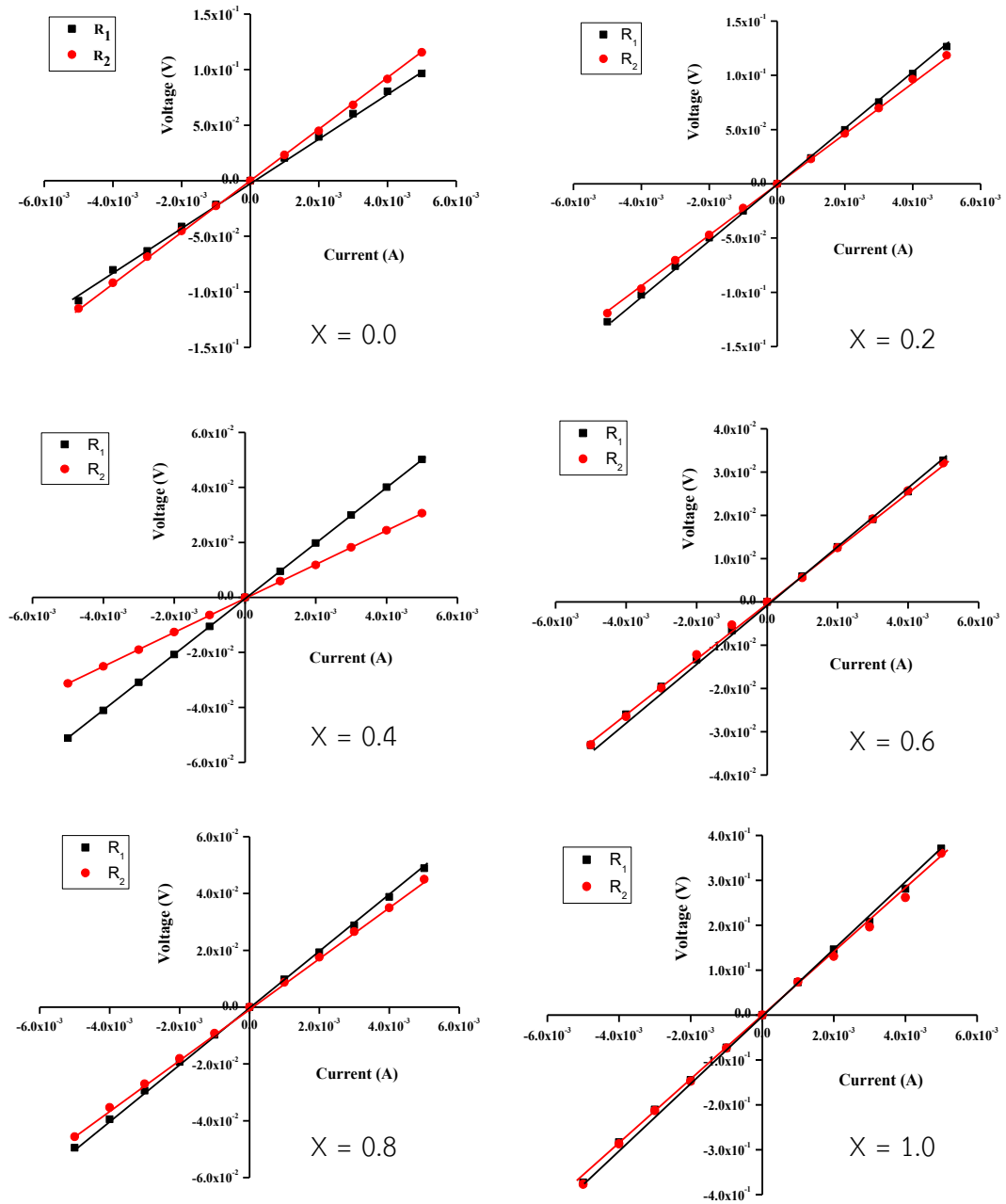
$$R_{sh} = R \left( \frac{w}{l} \right) \quad (4.26)$$

โดยที่  $R$  คือ ความต้านทานที่วัดได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์สามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ได้ ดังนี้

$$f = - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (4.27)$$

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (4.28)$$

$$\rho = R_{sh} \times d \quad (4.29)$$

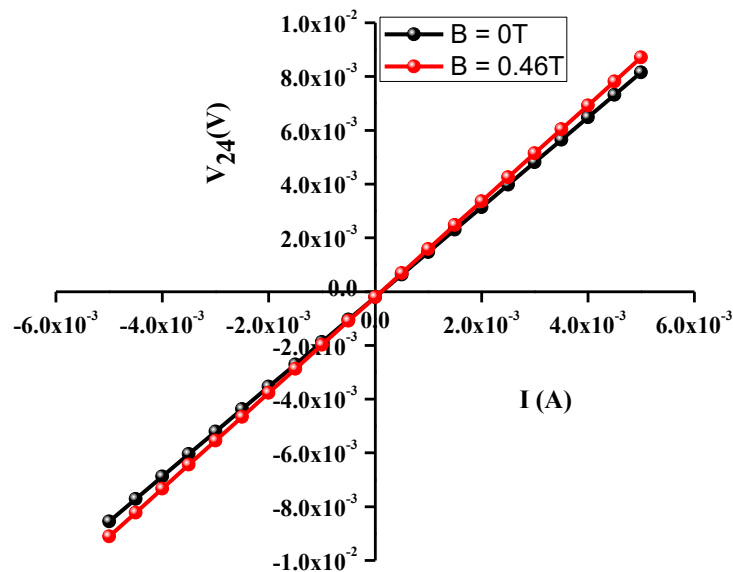


รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

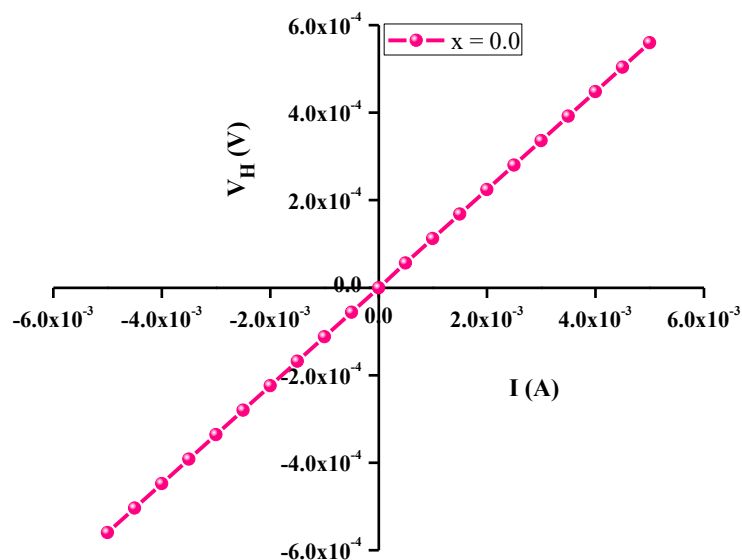
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	f	Sheet Resistance ( $\Omega/sq$ )	Resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
0.0	0.9995	69.179	$3.21 \times 10^{-3}$
0.2	0.9909	42.074	$2.10 \times 10^{-3}$
0.4	0.9999	29.423	$1.47 \times 10^{-3}$
0.6	0.9793	36.230	$1.81 \times 10^{-3}$
0.8	0.9988	98.027	$3.29 \times 10^{-3}$
1.0	0.9996	111.215	$5.51 \times 10^{-3}$

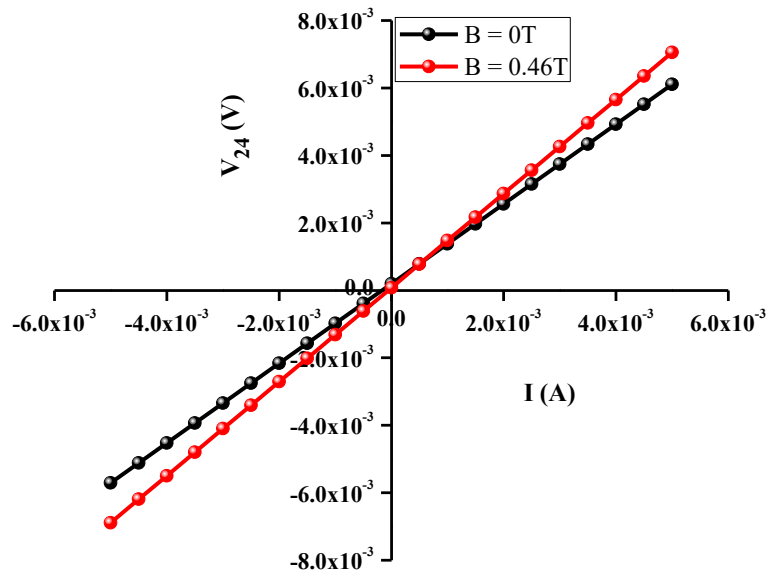
4.4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}$   $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



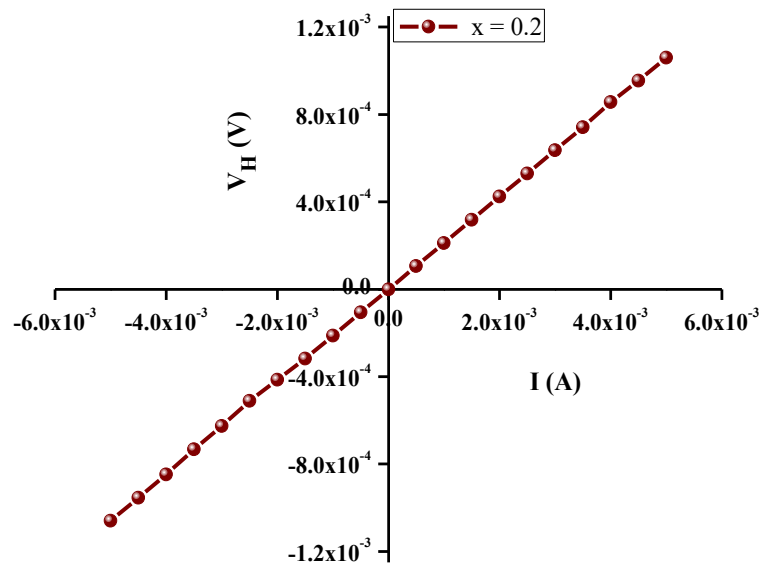
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.0$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



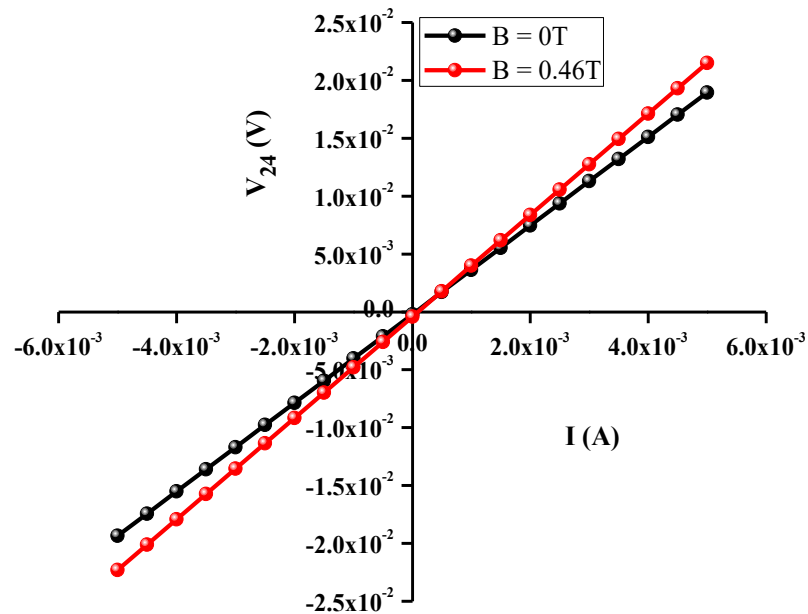
รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.0$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



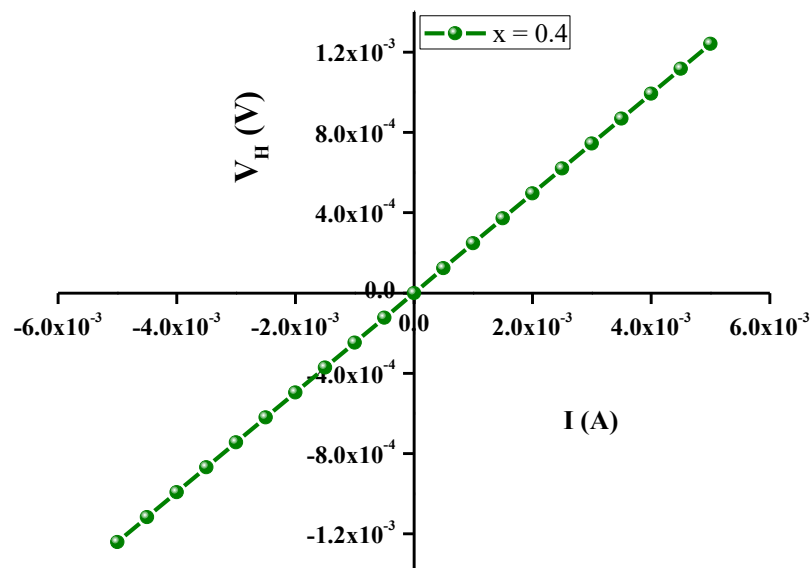
รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.2$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



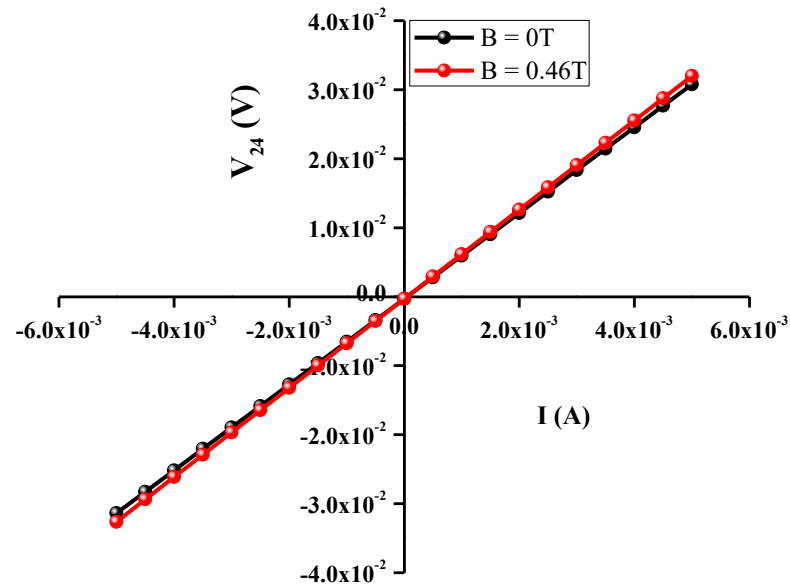
รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.2$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



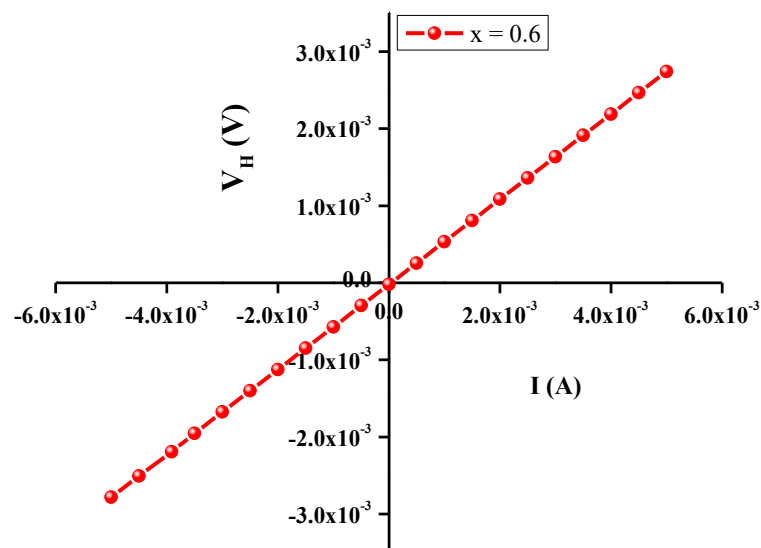
รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.4$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



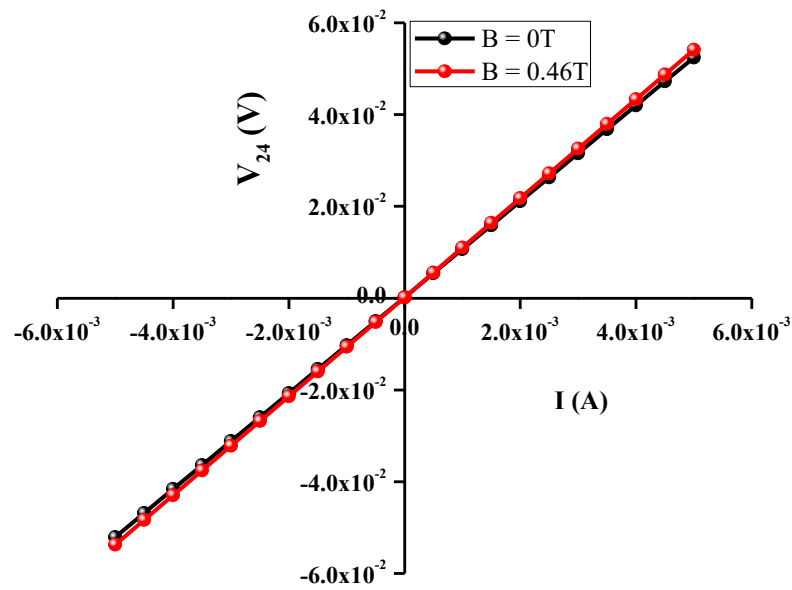
รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.4$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



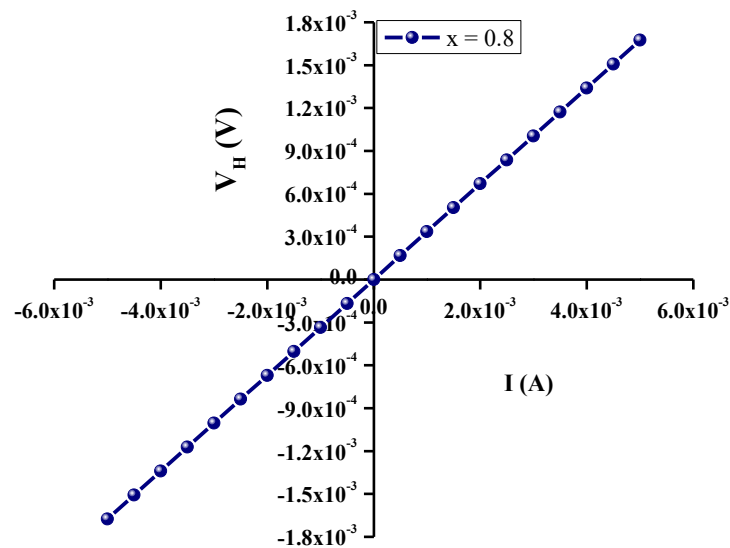
รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.6$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



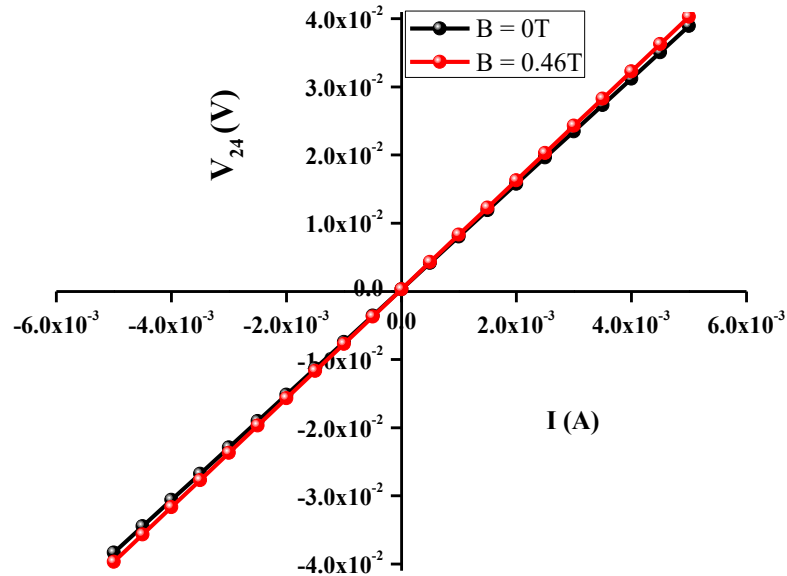
รูปที่ 4.35 แสดง กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.6$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



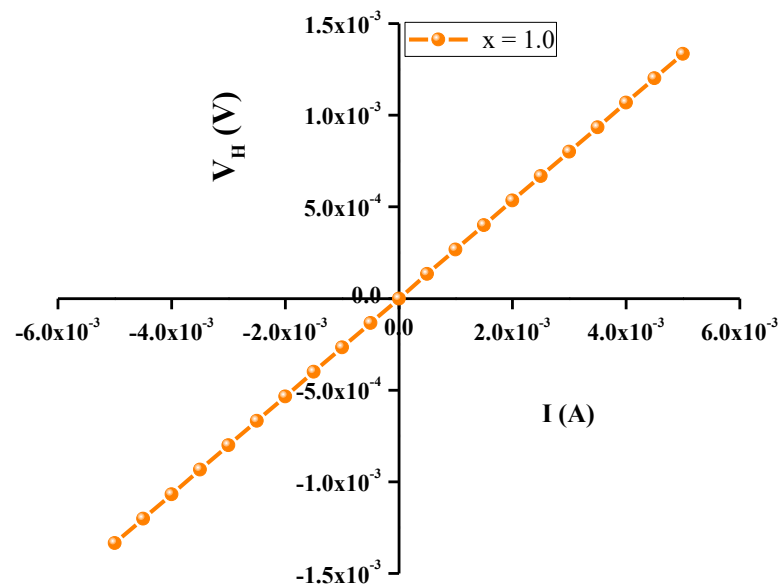
รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.8$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 0.8$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 1.0$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  เมื่อ  $x = 1.0$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}$   $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (4.30)$$

$$\rho = (69.179)(5 \times 10^5) = 3.21 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$R_H = 10^8 \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (4.31)$$

$$R_H = 10^8 (8 \times 10^5) \left( \frac{5 \times 10^{-5}}{4600} \right) = 2.50 \times 10^{-1} \text{ cm}^3 / \text{C}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$n = \frac{1}{qR_H} \quad (4.32)$$

$$n = \frac{1}{(1.60 \times 10^{-19})(2.50 \times 10^{-1})} = 2.50 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

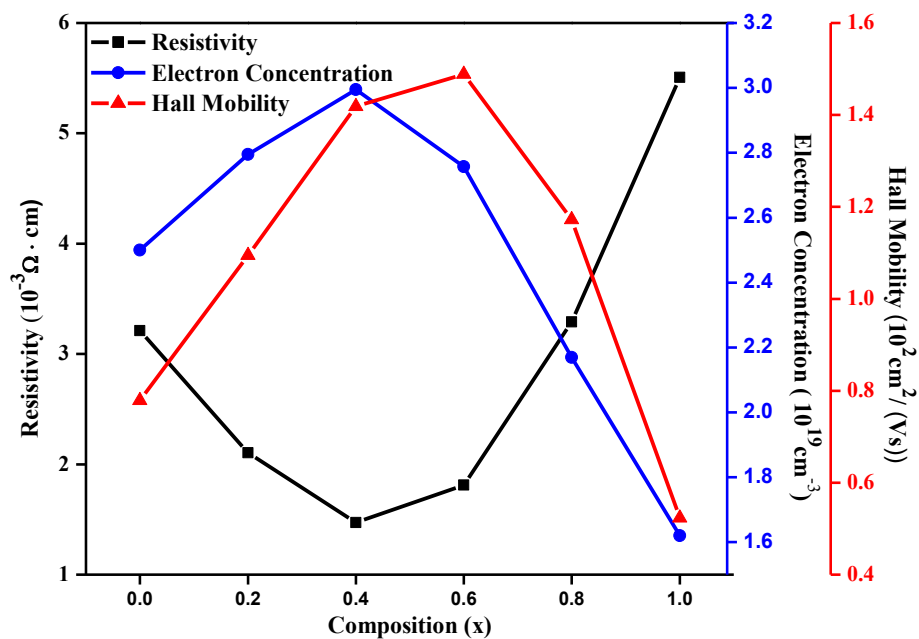
และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวพาหะ ได้ดังนี้

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (4.33)$$

$$\mu_H = \frac{2.50 \times 10^{-1}}{3.21 \times 10^{-3}} = 77.86 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$$

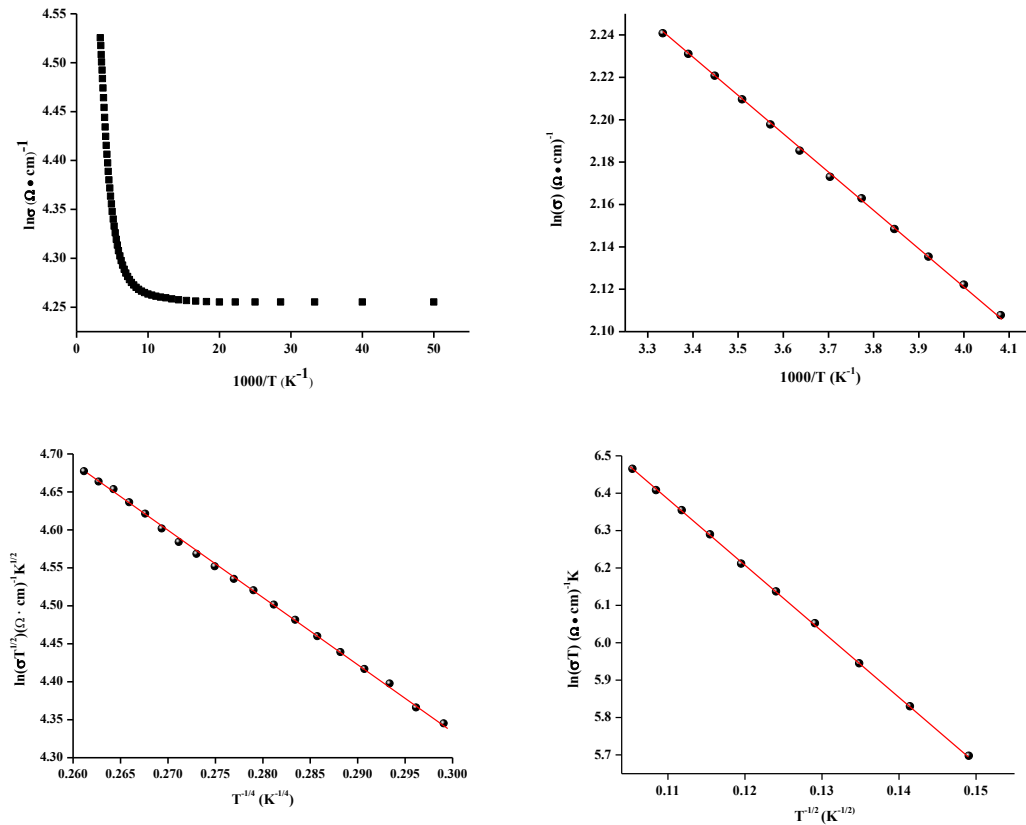
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Hall Coefficient ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )	Electron Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Hall Mobility ( $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ )
0.0	$3.21 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-1}$	$2.50 \times 10^{19}$	77.86
0.2	$2.10 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-1}$	$2.71 \times 10^{19}$	109.48
0.4	$1.47 \times 10^{-3}$	$2.08 \times 10^{-1}$	$2.99 \times 10^{19}$	141.85
0.6	$1.81 \times 10^{-3}$	$2.69 \times 10^{-1}$	$2.75 \times 10^{19}$	148.86
0.8	$3.29 \times 10^{-3}$	$2.88 \times 10^{-1}$	$2.16 \times 10^{19}$	117.22
1.0	$5.51 \times 10^{-3}$	$3.85 \times 10^{-1}$	$1.61 \times 10^{19}$	52.30

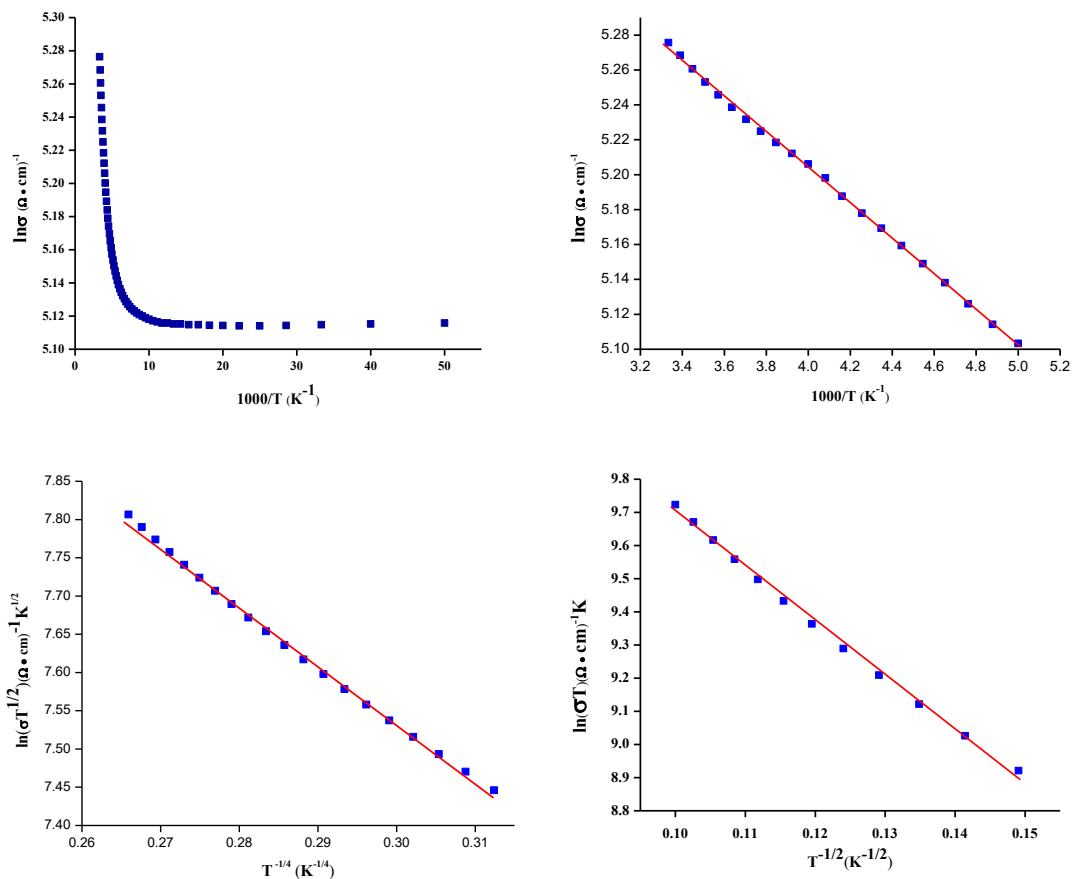


รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวิน ของฟิล์มบางขวางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln\sigma$  กับค่า  $1000/T$ , ค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $T^{-1/4}$  และ ค่า  $\ln(\sigma T)$  กับค่า  $T^{-1/2}$  ตามลำดับของฟิล์มบางขวางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.0$



**รูปที่ 4.42** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln\sigma$  กับค่า  $1000/T$ , ค่า  $\ln(\sigma T^{1/2})$  กับค่า  $T^{-1/4}$  และ ค่า  $\ln(\sigma T)$  กับค่า  $T^{-1/2}$  ตามลำดับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.2$

การหาค่าระดับพลังงานของกักตักพาหะ ( $E_t$ )

ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-200 เคลวิน พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่คำนวณได้จากกราฟ  $\ln\sigma$  กับ  $1000/T$  คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากระดับผู้ให้ (donor level) ไปยังแถบนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 0.042 อิเล็กตรอนโวลต์

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงพลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดมี

สารเจือปนอย่างมาก (heavily doped semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) [42] สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\sigma$  กับ  $1000/T$  ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (4.34)$$

โดยที่

$$E_{NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/3}}{4\pi\epsilon_s} \quad (4.35)$$

เมื่อ  $\rho_{0,NNH}$  คือ ค่าคงที่

$N_d$  คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)

$E_{NNH}$  คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด

$\epsilon_s$  คือ เพอร์มิตติวิตีของ CdS ( มีค่าเท่ากับ  $11.65 \times 8.85 \times 10^{14}$  ฟารัดต่อเซ็นติเมตร )

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันไปเป็นการกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{C1} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \zeta_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B} \quad (4.36)$$

สมการที่ (4.36) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ  $k > 0.5$  ค่า  $k$  นี้คือ อัตราส่วนของ  $\frac{N_a}{N_d}$  (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left(\frac{N_0(E_F)e^2}{2\epsilon_s}\right)^{3/4} \left(\frac{1}{N_d}\right)^{1/2} \quad (4.37)$$

เมื่อ  $N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration)

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่า  $N_d$  ได้จากค่า  $E_{NNH}$  จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่า  $k$  ได้จากค่า  $N_0(E_F)$  และ  $N_d$  เมื่อรู้ค่า  $k$  แล้วก็จะคำนวณหาค่า  $N_a$  ได้

สำหรับค่าอุณหภูมิทรานซิชัน ( $T_{C1}$ ) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า  $\zeta_{Mott}$ ,  $N_d$  และ  $\epsilon_s$  ตามลำดับ

จากสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{NNH}}{kT}\right) \quad (4.38)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left( \frac{1000}{T} \right) + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (4.39)$$

ความชัน คือ  $\frac{E_{NNH}}{1000k}$  ส่วนจุดตัดแกน y คือ  $\ln \sigma_{0,NNH}$

เมื่อพิจารณาให้ละเอียดเพิ่มขึ้นอีกจะพบว่ากราฟ  $\ln \sigma$  กับ  $1000/T$  ในช่วงอุณหภูมิ 300-200 เคลวิน มีความชัน 2 ค่า โดยในช่วงอุณหภูมิ 300-270 เคลวิน เป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจากระดับผู้ให้ไปยังแถบนำ ส่วนในช่วงอุณหภูมิ 265-200 เคลวิน อาจพิจารณาว่าเป็นกลไกการกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จะแสดงดังตารางที่ 4.10

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp \left[ \left( -\frac{T_0}{T} \right)^s \right] \quad (4.40)$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s} \quad (4.41)$$

ในกรณีที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว  $s = \frac{1}{4}$  และ  $\frac{1}{3}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยตัวเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี (Efros-Shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า  $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\sigma T^{1/2} = \sigma_{0,Mott} \exp \left[ -\left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (4.42)$$

$$\ln \left( \sigma T^{1/2} \right) = -\left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4} + \ln \sigma_{0,Mott} \quad (4.43)$$

โดยที่องศาของความไม่เป็นระเบียบ  $(T_{0,Mott})$  คือ

$$T_{0,Mott} = \frac{18.1}{k_B \xi_{Mott} N_0(E_F)} \quad (4.44)$$

ความชันของสมการ คือ  $T_{0,Mott}^{1/4}$

ส่วน  $\sigma_{0,Mott}$  คือสัมประสิทธิ์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma_{0,Mott} = 3e^2 v \left[ \frac{N_0(E_F) \xi_{Mott}}{8\pi k_B} \right]^{1/2} \quad (4.45)$$

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length;  $\xi_{Mott}$ ) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{21.23 \sigma_{0,Mott} T_{0,Mott}^{1/2}} \quad (4.46)$$

ส่วนความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state;  $N_0(E_F)$ ) ที่ระดับเฟอร์มิ คือ

$$N_0(E_F) = 2.0 \times 10^9 \sigma_{0,Mott}^3 T_{0,Mott}^{1/2} \quad (4.47)$$

หรือ

$$N_0(E_F) = \frac{18a^3}{k T_{0,Mott} q} \quad (4.48)$$

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R_{hop,Mott}$ ) คือ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4} \quad (4.49)$$

หรือ

$$R_{hop,Mott} = \left( \frac{9 \xi_{Mott}}{8 \pi k_B T N_0(E_F)} \right)^{1/4} \quad (4.50)$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ( $W_{hop,Mott}$ ) คือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{k_B T}{4} \left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4} \quad (4.51)$$

หรือ 
$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_0(E_F)} \quad (4.52)$$

และ 
$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} > 1 \quad (4.53)$$

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left( \frac{T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} \right) \quad (4.54)$$

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพโรส-ชโลฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[ - \left( \frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \right] \quad (4.55)$$

$$\ln(\sigma T) = - \left( \frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES} \quad (4.56)$$

โดยที่องศาความไม่เป็นระเบียบของ ES ( $T_{0,ES}$ ) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_S} \quad (4.57)$$

ค่า  $T_{0,ES}$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ส่วนค่า  $\sigma_{0,ES}$  สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น  $\xi_{ES}$  ก็จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟ ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R_{hop,ES}$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left( \frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/2} \quad (4.58)$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ( $W_{hop,ES}$ ) คือ

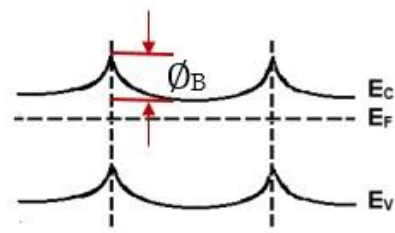
$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left( \frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \quad (4.59)$$

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

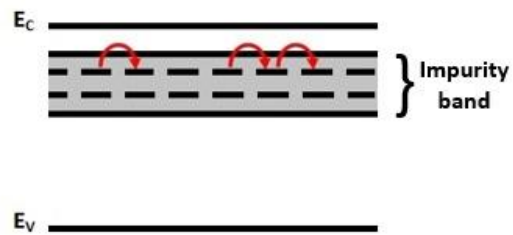
$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{3/2}} \quad (4.60)$$

หรือ

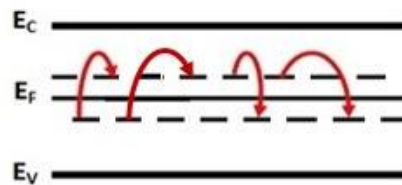
$$\Delta_C = k_B \left( \frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} \quad (4.61)$$



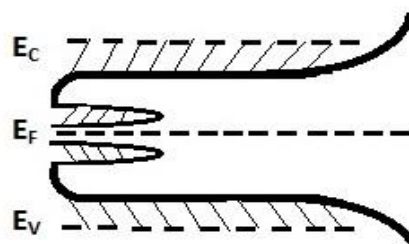
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.43 แสดงแผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

- (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโต
- (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
- (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่
- (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี

**ตารางที่ 4.10** แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.0$  และ  $0.2$

Composition (x)	Temperature Range (K)	Temperature (K)	$\sigma_{0,\text{NNH}}$ (S/cm)	$E_{\text{NNH}}$ (eV)	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$T_{C_1}$ (K)
0.0	300-250	300	16.25	0.014	$7.92 \times 10^{17}$	12.3
0.2	300-250	300	321.69	0.012	$5.21 \times 10^{17}$	9.37

**ตารางที่ 4.11** แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.0$  และ  $0.2$

Composition (x)	Temperature Range (K)	$\sigma_{0,\text{Mott}}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) <sup>-1</sup>	$T_{0,\text{Mott}}$ ( $10^3 \text{K}$ )	$N_0(E_F)$ ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ )	$R_{\text{hop,Mott}}$ ( $10^{-7} \text{cm}$ )	$W_{\text{hop,Mott}}$ (eV)	$R_{\text{hop,Mott}}/\xi_{\text{Mott}}$	$T_{C_2}$ (K)
0.0	195-120	843.618	3.944	$1.01 \times 10^{22}$	1.1420	0.0158	1.12	347.9
0.2	192-120	22742.0	5.821	$6.83 \times 10^{22}$	7.2227	0.0092	1.42	231.4

**ตารางที่ 4.12** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คำนวณได้จากการกระโดดแบบเอพโรส-ชโลพสกีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.0$  และ  $0.2$

Composition (x)	Temperature Range (K)	$\sigma_{0,\text{ES}}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) <sup>-1</sup>	$T_{0,\text{ES}}$ (K)	$\xi_{\text{ES}}$ (cm)	$W_{\text{hop,ES}}$ (meV)	$R_{\text{hop,ES}}/\xi_{\text{ES}}$	$\Delta_{\text{CES}}$ ( $10^{-5} \text{eV}$ )
0.0	110-60	$3.89 \times 10^3$	293.87	$2.15 \times 10^{-5}$	7.740	0.407	2.35
0.2	110-60	$9.03 \times 10^4$	290.15	$6.31 \times 10^{-5}$	7.345	0.425	1.91

สำหรับสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.4, 0.6, 0.8$  และ 1.0 มีลักษณะพิเศษกล่าวคือ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.4$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 เคลวินเป็น 300 เคลวิน สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจาก  $1.38 \times 10^{-3}$  โอห์ม.เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 เคลวิน จนถึงค่าต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 110 เคลวิน จากนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ  $1.47 \times 10^{-3}$  โอห์ม.เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 110 เคลวิน ฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $x = 0.4$ ) จะประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำแต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 110 เคลวิน ฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $x = 0.4$ ) จะประพฤติตัวเป็นโลหะ ดังนั้นอุณหภูมิทรานซิชัน (transition temperature) เท่ากับ 110 เคลวิน สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $x = 0.4$ ) สามารถฟิตได้ดีกับสมการ [43, 44]

$$\rho = \frac{1}{\sigma_0 + aT^{1/2}} + bT^2 \quad (4.62)$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือสภาพนำไฟฟ้าเหลือค้าง (residual resistivity) สำหรับพจน์  $bT^2$  จะเป็นอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ส่วนพจน์  $aT^{1/2}$  จะสอดคล้องกับอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบและอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกจากอะตอมของสารเจือ (impurity atoms) กล่าวคือเมื่อพิจารณาถึงสภาพความเป็นควอนตัม (quantum correction) ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากอะตอมสารเจือ (ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของการกระเจิง) แล้วเกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดเชิงควอนตัม (quantum interference effect) อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะประพฤติตัวเป็นอิเล็กตรอนประจำถิ่นอย่างอ่อน (weakly localization electron, WLE) ซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมอตต์ (Mott temperature) และพฤติกรรมนี้จะส่งผลให้  $\rho$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $T$  ลดลง ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เมื่อเทียบกับ  $\sigma_0$  สามารถนิยามด้วยความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} = \left( \frac{\lambda_F}{l} \right)^{3/2} \left( \frac{k_B T}{E_F} \right)^{1/2} \quad (4.63)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถลดรูปได้เป็น

$$\sigma \propto T^{1/2} \quad (4.64)$$

$$\text{หรือ } \rho \propto T^{-1/2} \quad (4.65)$$

เมื่อ  $\lambda_F$  = ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน (carrier wavelength)

$l$  = ระยะปลอดการชน (mean free path)

$E_F$  = ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level)

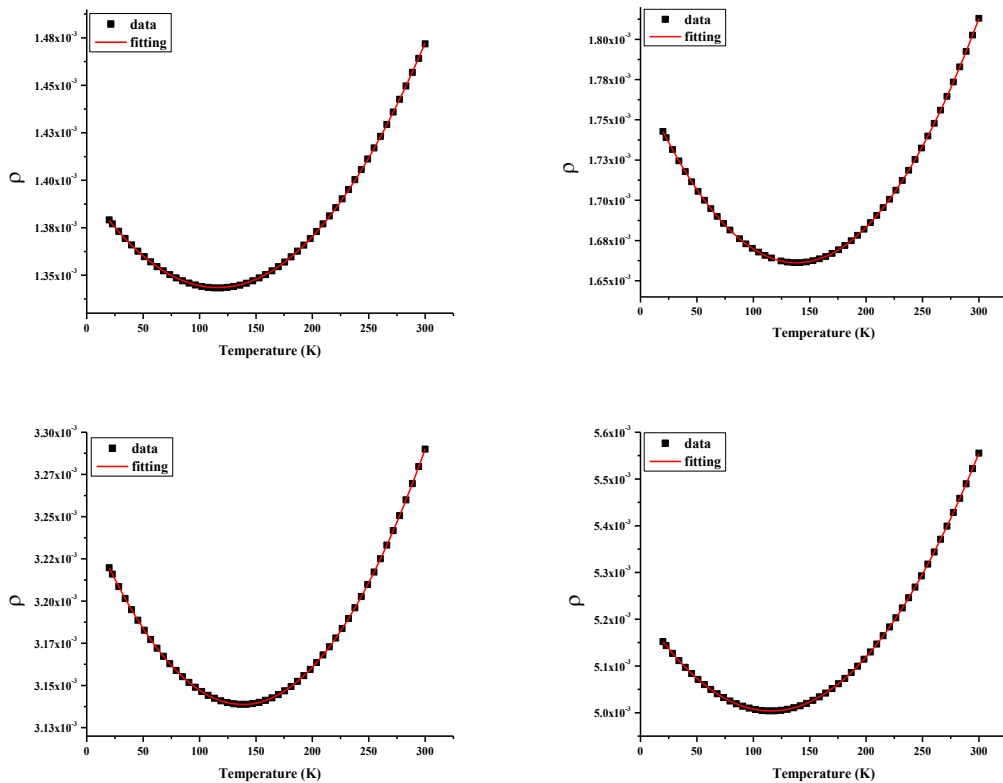
$$\text{โดยที่} \quad \lambda_F = \frac{2\pi}{(3\pi^2 N_d)^{1/3}} \quad (4.66)$$

$$l = \frac{h}{\rho N_d e^2 \lambda} \quad (4.67)$$

เมื่อพจน์  $\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)$  มีค่ามากขึ้น แสดงว่าพจน์  $\left(\frac{\lambda_F}{l}\right)$  ก็ต้องมีค่ามากขึ้น ดังนั้น  $l$  ต้องมีค่าน้อยลงและ/หรือ  $T$  จะต้องเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้  $T_{\text{Mott}}$  มีค่าสูงขึ้น นั่นคือ  $T_{\text{Mott}}$  จะเลื่อนไปทางอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณสารเจือชนิดผู้ให้ ( $N_d$ ) ที่เพิ่มขึ้น ข้อบกพร่องผลึก (defect) จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้วัสดุเกิดความไม่เป็นระเบียบระดับจุลภาค (microstructure disorder) เพิ่มขึ้น นั่นคือระยะปลอดการชน ( $l$ ) ของอิเล็กตรอนจะลดลง

**ตารางที่ 4.13** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนประจำถิ่นอย่างอ่อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0

Composition (x)	$T_{\text{Mott}}$ (K)	$\sigma_0$ $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	a ( $\text{K}^{-1/2}$ )	b ( $\text{K}^{-2}$ )
0.4	110	$1.34 \times 10^{-3}$	$9.42 \times 10^{-3}$	$3.82 \times 10^{-9}$
0.6	135	$1.65 \times 10^{-3}$	$1.27 \times 10^{-3}$	$5.82 \times 10^{-9}$
0.8	148	$3.25 \times 10^{-3}$	$1.26 \times 10^{-3}$	$5.79 \times 10^{-9}$
1.0	115	$5.22 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10^{-8}$



**รูปที่ 4.44** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\rho$  และ  $T$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมเท่ากับ  $x = 0.4, 0.6, 0.8$  และ  $1.0$  ตามลำดับ

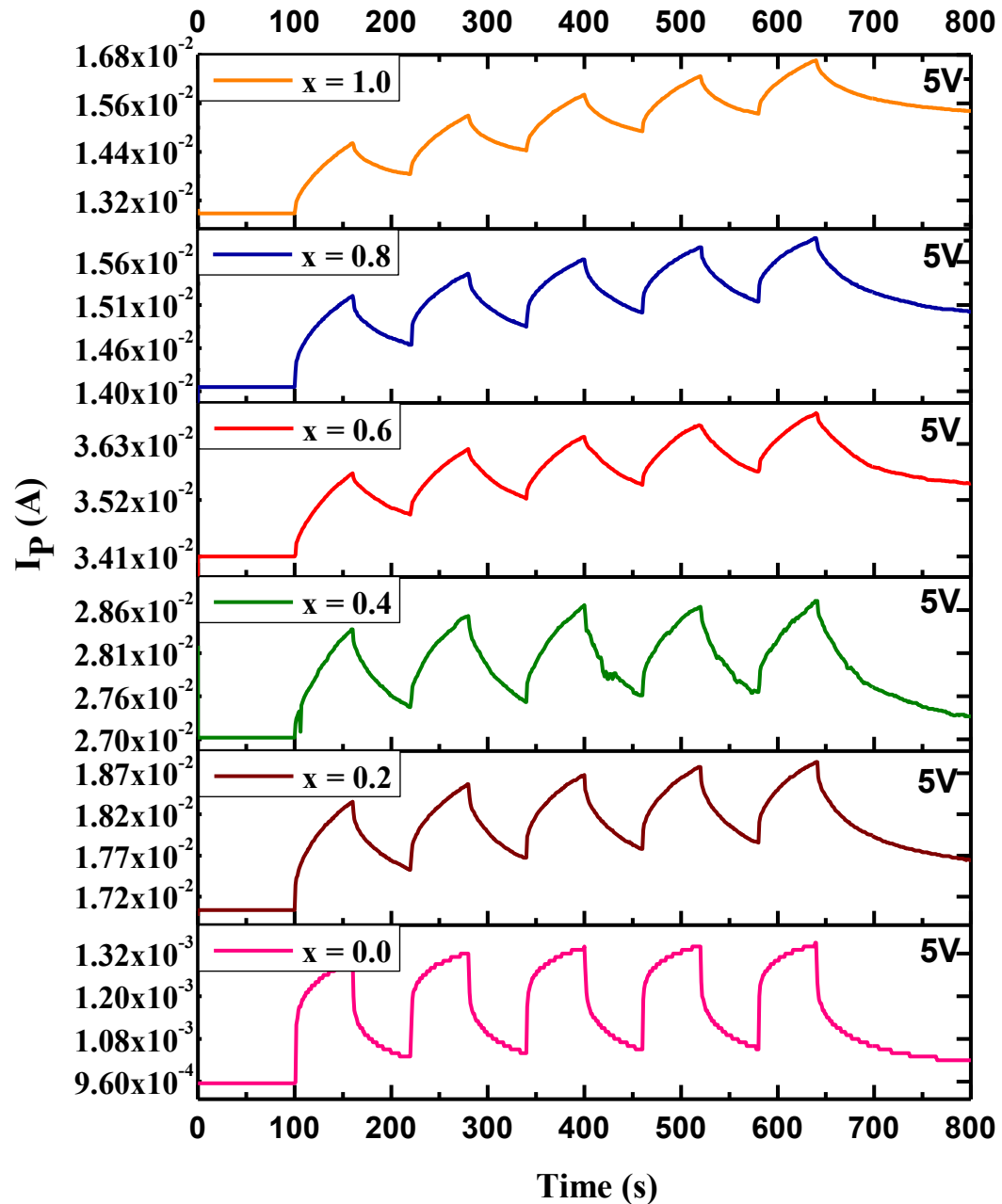
ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากอะตอมสารเจือ (ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระเจิง) จะเกิดปรากฏการณ์แทรกสอดเชิงควอนตัม (quantum interference effect) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะประพฤติตัวเป็นอิเล็กตรอนประจำถิ่นอย่างอ่อน (weakly localized electron, WEL) เมื่อข้อบกพร่องผลึกเพิ่มขึ้น ความไม่เป็นระเบียบระดับจุลภาคก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้พฤติกรรมของการเป็นอิเล็กตรอนประจำถิ่นอย่างอ่อนเกิดขึ้นง่ายในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้นซึ่งหมายถึงว่าอุณหภูมิมีออตต์ ( $T_{\text{Mott}}$ ) จะเลื่อนไปทางอุณหภูมิที่สูงขึ้น

จากผลการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบาง  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  ที่  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.4 ไปเป็น 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ พบว่า  $T_{\text{Mott}}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 110 เป็น 135 และ 148 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของอะตอม S ในโครงผลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (atomic fraction,  $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นนั่นคืออะตอมของ S ในโครงผลึกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความไม่เป็นระเบียบระดับจุลภาคเพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลให้  $T_{\text{Mott}}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ส่วนกรณี  $x = 1.0$  โครงสร้างผลึก CdS ไม่มีอะตอม Se เข้ามาปะปนจึงพิจารณาว่า เป็นระบบที่มีความไม่เป็นระเบียบต่ำ ดังนั้น  $T_{\text{Mott}}$  ควรจะมีค่าต่ำด้วย จากการทดลองพบว่า  $T_{\text{Mott}}$  เท่ากับ 110 เคลวินโดยประมาณ

สารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำดีเจนเนอเรต (degenerated semiconductor) ซึ่งระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าไปอยู่ในแถบนำ ส่งผลให้สารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In นี้มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก จึงนำไฟฟ้าได้ดีที่อุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอุณหภูมิต่ำ การนำไฟฟ้าจะขึ้นกับกลไกแบบอิเล็กตรอนกระโดดระหว่างระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน (ซึ่งไม่ใช่เป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำ) อย่างไรก็ตามการนำไฟฟ้าแบบอิเล็กตรอนกระโดดระหว่างระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน จะพบในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  ที่  $x = 0$  และ 0.2 แสดงว่าฟิล์มบางที่  $x = 0$  และ 0.2 จะประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำตลอดช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน แต่สำหรับฟิล์มบางที่มี  $x = 0.4, 0.6, 0.8$  และ 1.0 ปรากฏการณ์แทรกสอดเชิงควอนตัมจะโดดเด่นกว่าซึ่งสรุปได้ว่าฟิล์มบางที่  $x \geq 0.4$  จะประพฤติตัวเป็นโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_{\text{Mott}}$  แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_{\text{Mott}}$  จะยังคงเป็นสารกึ่งตัวนำ

4.4.4 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ( $I_p$ ) กับเวลา ( $t$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

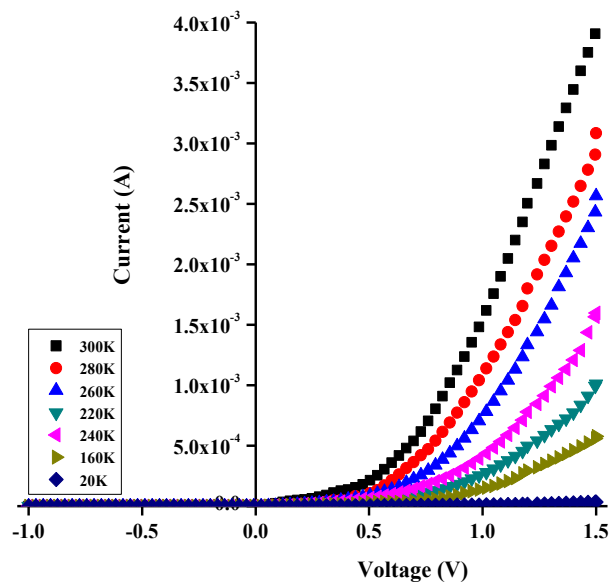
#### 4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ กรณีไบแอสตรง

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าช่วง -1 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.46 พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากันเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง และแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นจาก 0.8 เป็น 1.0 โวลต์

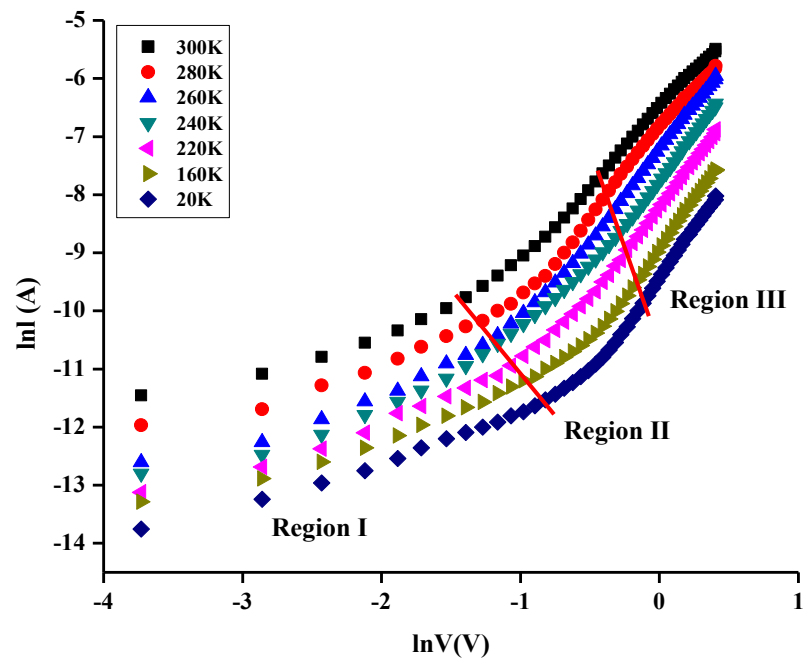
การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ช่วงแรงดัน 0-1.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ ที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณที่ I แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ II เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามทฤษฎีเทอมิออนิกอิมิชัน ส่วนบริเวณที่ III เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล [45] ดังแสดงในรูปที่ 4.47

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ดังแสดงในรูปที่ 4.48 เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และนำไปเป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิชัน ซึ่งพิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  เพื่อช่วยหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

การหาค่าความต้านทานอนุกรมโดยใช้วิธีของชวง จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ และค่าความต้านทานอนุกรม โดยค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อนุกรม ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิชันโดยวิธีของชวง แสดงดังตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของกระแส ( $\ln I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์โมออนิกลิมิตชันที่พิจารณาได้จากช่วงของแรงดันไฟฟ้า ของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ( $\ln I$ ) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน ( $\ln V$ ) ดังรูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดแสดงได้ดังสมการ [45]

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.68)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA * T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) - 1 \quad (4.69)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์โมออนิกลิมิตชันตัดแกน  $\ln I$  โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ  $\ln I_s$  และ มีความชันของกราฟเท่ากับ  $\frac{q}{nkT}$  ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) ได้และจากสมการที่ (4.69) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA * T^2}{I_s}\right) \quad (4.70)$$

ค่าความสูงกำแพงศักย์ ( $\phi_B$ ) ของสมการที่ (4.70) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และสำหรับไดโอดของเราที่ค่า  $A^*$  เท่ากับ 40.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.71)$$

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$  มักจะมีความต้านทานไฟฟ้านุกรม ( $R_s$ ) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ (region III) เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้านุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$  ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้านุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s)\right) - 1 \right\} \quad (4.72)$$

เมื่อ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA * T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.73)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.72) อีกรูปแบบหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\frac{q}{nkT}(V - IR_s) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right) \right] \right\} \quad (4.74)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสตรง โดยการแทนสมการที่ (4.72) ลงในสมการที่ (4.73) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA * T^2}\right) \quad (4.75)$$

หาอนุพันธ์ของค่า  $V$  เทียบกับ ค่า  $\ln I$  เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.75) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.76)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dV/d\ln I$  กับ ค่า  $I$  ดังรูปที่ 4.49 สอดคล้องดีกับกราฟเส้นตรงโดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร ( $R_s$ ) และจุดตัดแกนของค่า  $dV/d\ln I$  มีค่าเท่ากับ  $nkT/q$

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.75) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า  $H(I)$  ดังนี้

$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA * T^2}\right) \quad (4.77)$$

แล้วสมการที่ (4.77) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B - IR_s \quad (4.78)$$

เมื่อทำการคำนวณค่า  $H(I)$  จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ ค่า  $I$  ก็จะได้ดังรูปที่ 4.50 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า ( $n\phi_B$ ) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วนอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า  $H(I)$  นั้นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม

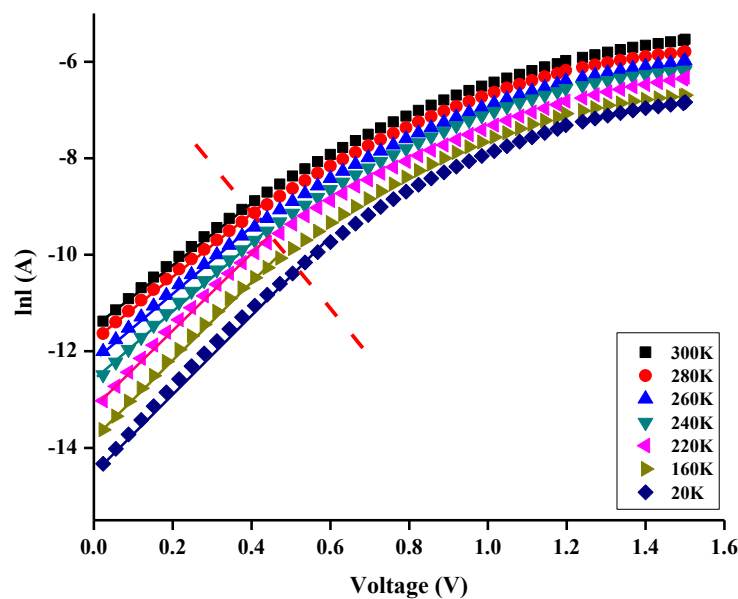
เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.75) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

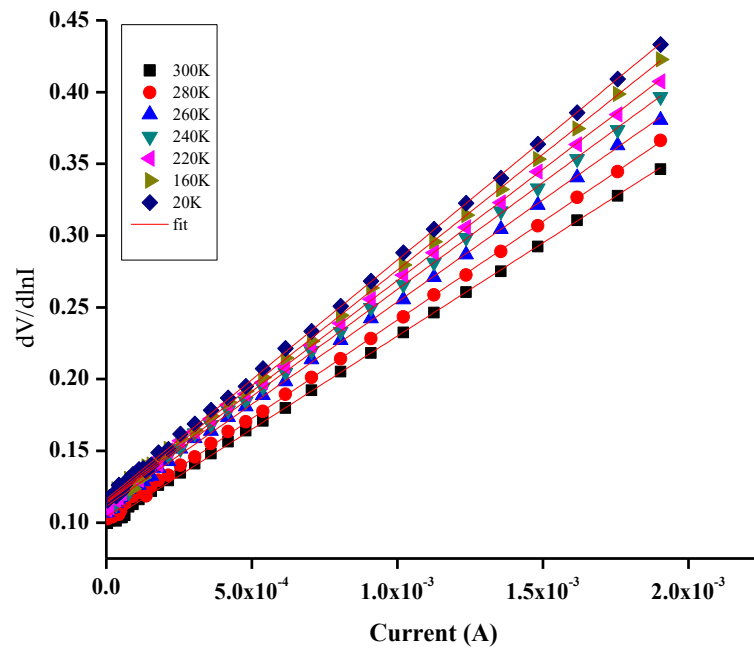
$$I = kV^m \quad (4.79)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.80)$$

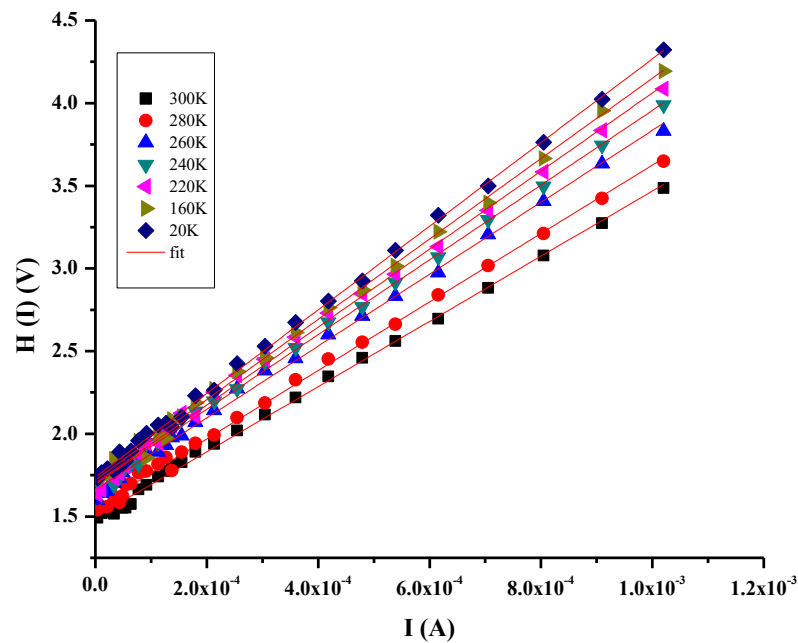
เมื่อ  $m$  คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไซด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m$  เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งจากผลการทดลองที่แรงดันต่ำกว่า 0.25 โวลต์ ความชัน  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.12 แสดงว่ากลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนแรงดันสูงกว่า 2.2 โวลต์ แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$

ตารางที่ 4.14 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสิชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอด ชนิดรอยต่อวีวีพีชนิด CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>:In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/ZnO/Cu<sub>2</sub>O

Temperature (K)	I <sub>s</sub> (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, $\phi_b$ (eV)		Series Resistance, R <sub>s</sub> (K $\Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)-I]	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)-I]
300	1.06x10 <sup>-5</sup>	6.09	6.10	0.809	0.767	1.687	1.743
290	9.54x10 <sup>-6</sup>	6.30	6.24	0.725	0.738	1.692	1.755
280	8.23x10 <sup>-6</sup>	6.53	6.48	0.709	0.713	1.706	1.779
270	6.36x10 <sup>-6</sup>	6.70	6.62	0.696	0.693	1.800	1.819
260	5.66x10 <sup>-6</sup>	6.78	6.75	0.679	0.673	1.852	1.960
250	4.45x10 <sup>-6</sup>	6.81	6.82	0.664	0.655	1.902	1.992
240	3.49x10 <sup>-6</sup>	6.83	6.86	0.649	0.640	2.019	2.107
230	2.51x10 <sup>-6</sup>	6.92	6.93	0.636	0.624	2.122	2.222
220	2.07x10 <sup>-6</sup>	6.98	6.97	0.619	0.610	2.338	2.461
210	1.81x10 <sup>-6</sup>	7.08	7.05	0.601	0.589	2.532	3.600
200	1.65x10 <sup>-6</sup>	7.43	7.33	0.583	0.574	2.648	2.764
190	1.48x10 <sup>-6</sup>	7.78	7.68	0.564	0.552	2.882	2.884
180	1.36x10 <sup>-6</sup>	8.16	7.91	0.545	0.536	2.935	3.051
170	1.16x10 <sup>-6</sup>	8.57	8.43	0.527	0.515	3.009	3.212
160	1.08x10 <sup>-6</sup>	9.04	8.96	0.508	0.499	3.335	3.486
150	1.00x10 <sup>-6</sup>	9.58	9.62	0.488	0.476	3.512	3.653
140	9.24x10 <sup>-7</sup>	10.23	10.35	0.469	0.457	3.632	3.798
130	9.08x10 <sup>-7</sup>	10.99	11.12	0.449	0.437	3.791	3.921
120	8.38x10 <sup>-7</sup>	11.88	12.00	0.430	0.418	3.839	4.005
110	8.30x10 <sup>-7</sup>	12.92	13.23	0.410	0.398	3.999	4.212
100	7.56x10 <sup>-7</sup>	14.15	14.44	0.391	0.379	4.118	4.303
90	7.34x10 <sup>-7</sup>	15.69	16.02	0.371	0.362	4.328	4.501
80	6.82x10 <sup>-7</sup>	17.62	17.82	0.352	0.343	4.443	4.644
70	6.66x10 <sup>-7</sup>	19.97	20.01	0.333	0.324	4.873	4.861
60	6.24x10 <sup>-7</sup>	23.28	23.34	0.314	0.308	5.007	5.185
50	6.13x10 <sup>-7</sup>	27.80	28.01	0.295	0.286	5.342	5.442

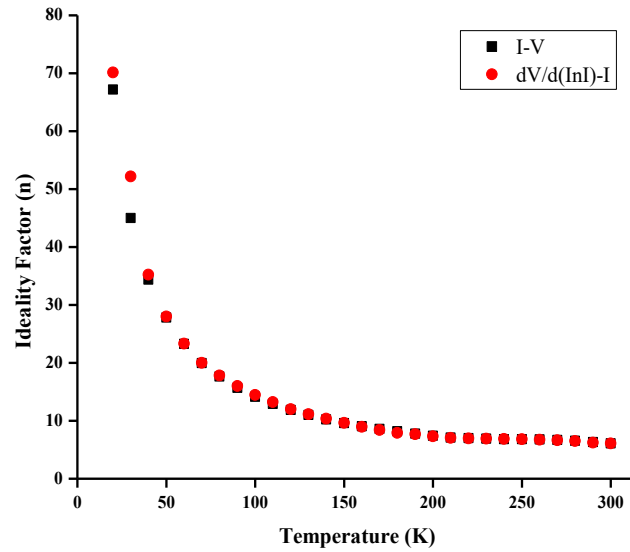
40	$5.69 \times 10^{-7}$	34.37	35.21	0.277	0.271	5.536	5.687
30	$5.52 \times 10^{-7}$	44.98	52.17	0.259	0.250	5.600	5.780
20	$5.41 \times 10^{-7}$	67.16	70.12	0.241	0.229	5.630	5.831

จากผลการทดลองตารางที่ 4.14 จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์และวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นกราฟเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.51

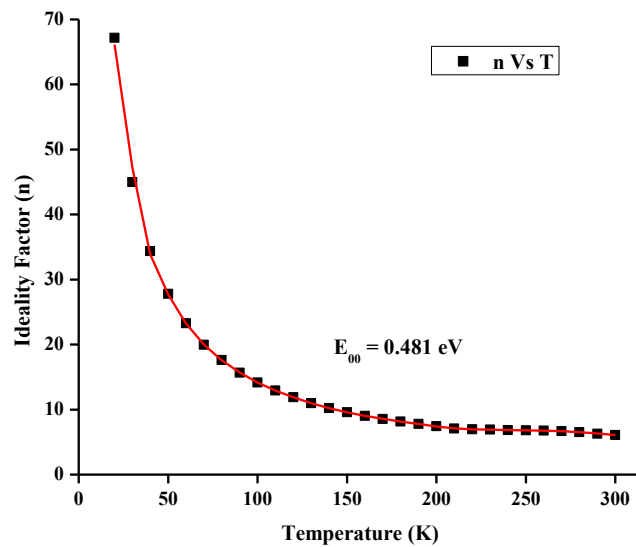
ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์และวิธีของชวงมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.53 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์

การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตักก็มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมีค่าสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสตรงหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสตรงให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดลง กลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์จะลดความโดดเด่นลง และในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากขึ้น จึงเสมือนกับว่าอิเล็กตรอน (หรือโฮล) สามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.53 ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่ากระแสไหลผ่านรอยต่อที่อุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์น้อยลง

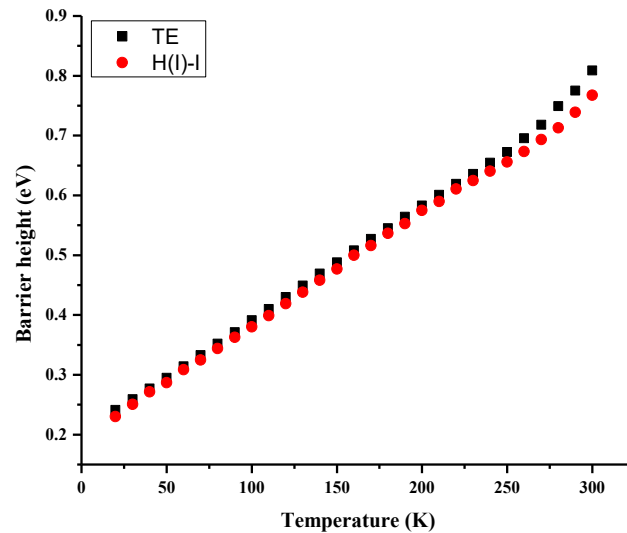
ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.54 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze – out – carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ p-n ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



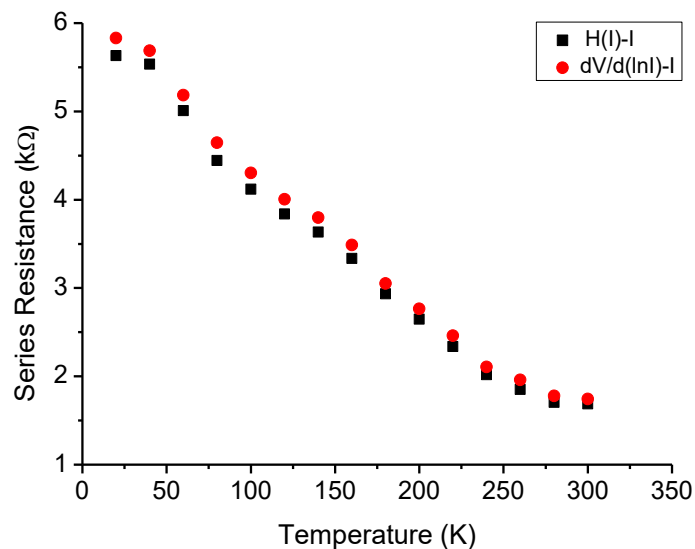
รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



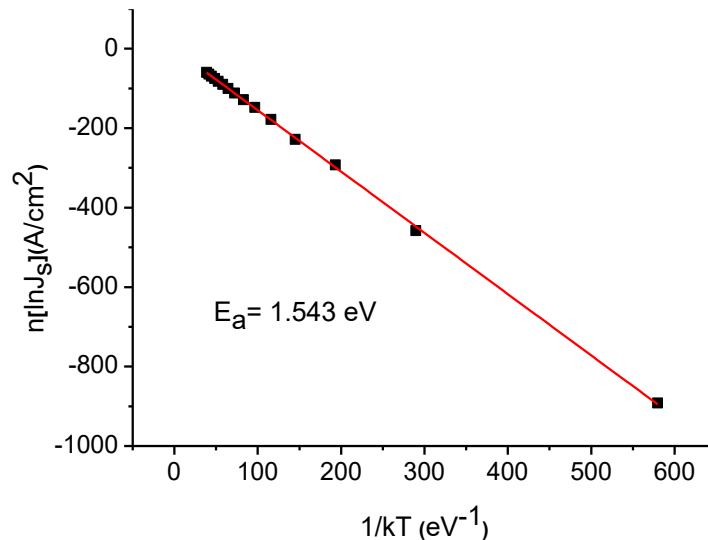
รูปที่ 4.52 แสดงการหาค่า  $E_{00}$  โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่า อุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิด รอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n[\ln J_s]$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่ออิมิตชัน  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

จากรูปที่ 4.52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิสามารถนำไปหาค่า  $E_{00}$  ได้จากความสัมพันธ์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4.81)$$

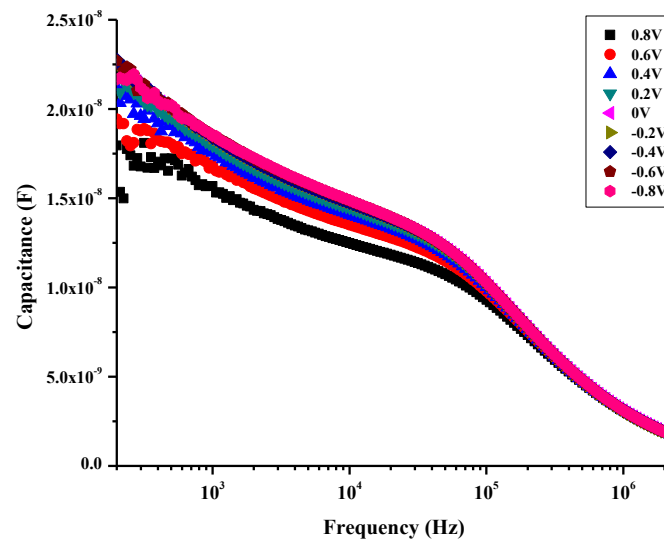
โดย  $E_{00}$  คือ ลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการชดเชยของโหนดที่ผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.52 จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันมีค่าเท่ากับ 0.481 อิเล็กตรอนโวลต์

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.55 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.82)

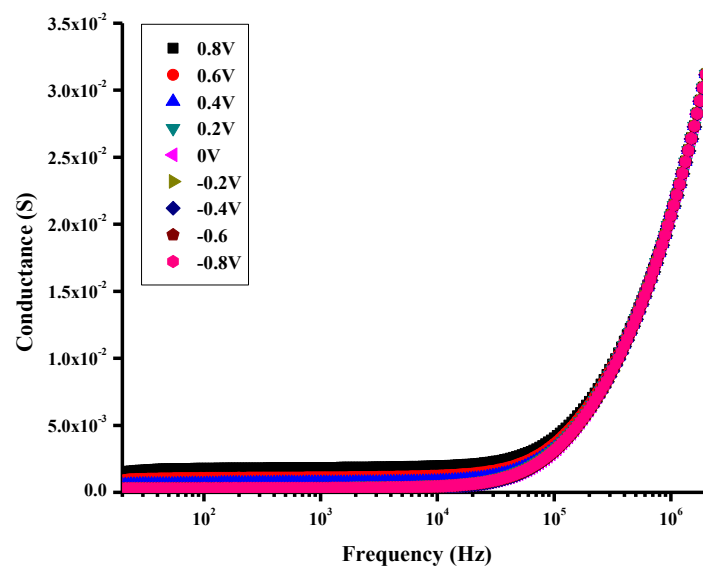
$$n \ln(J_s) = -E_a \left(\frac{1}{kT}\right) + n \ln(J_0) \quad (4.82)$$

จากค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.544 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งพลังงานกระตุ้นนี้คือ กำแพงศักย์ (potential barrier) ของปรากฏการณ์ชดเชยของโหนดที่ผ่านกำแพงศักย์ที่ช่วยเสริมกันให้เกิดกระบวนการการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลโดยผ่านกับดักพาหะที่สถานะผิวเชื่อมต่อ (tunneling enhanced interface trap recombination) [46]

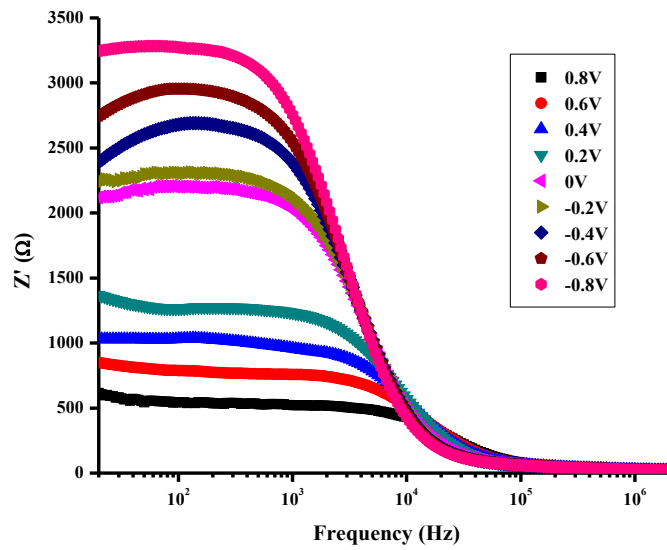
4.5.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



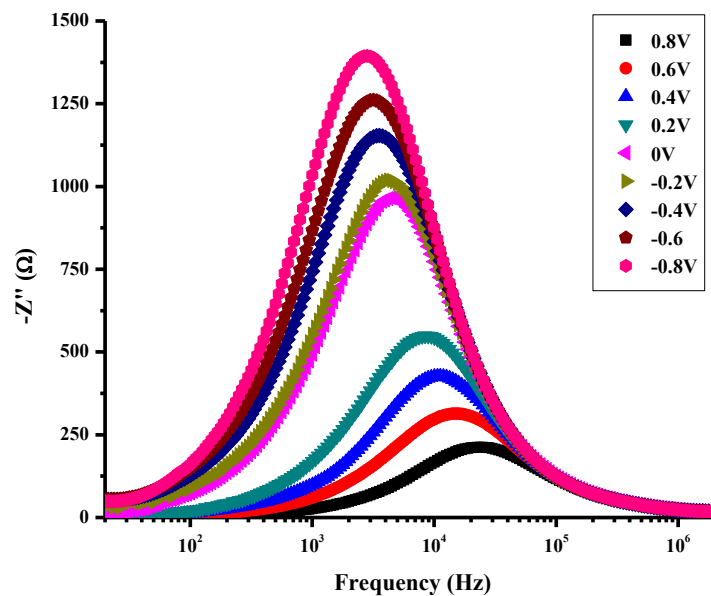
รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



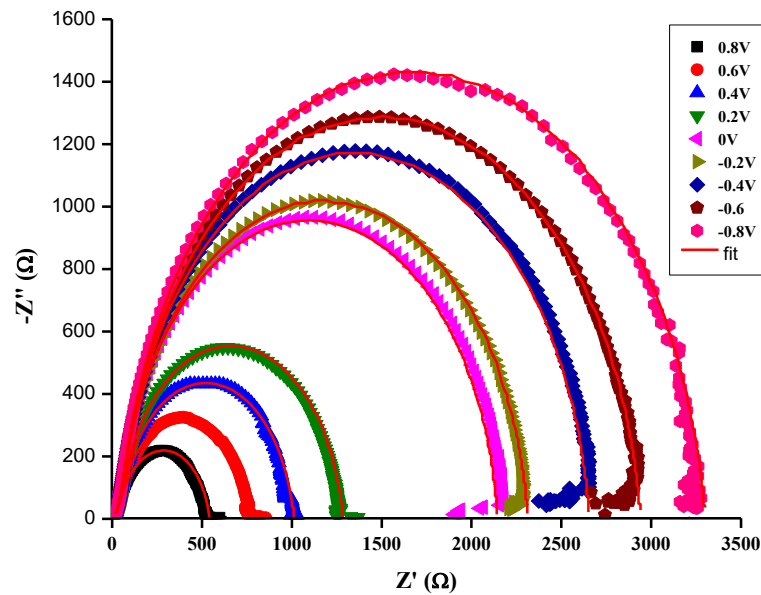
รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

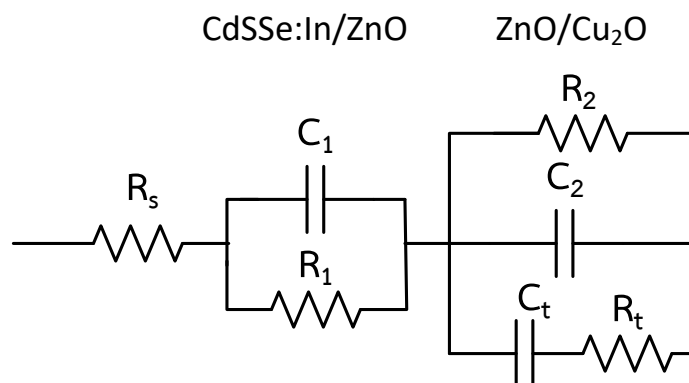


รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

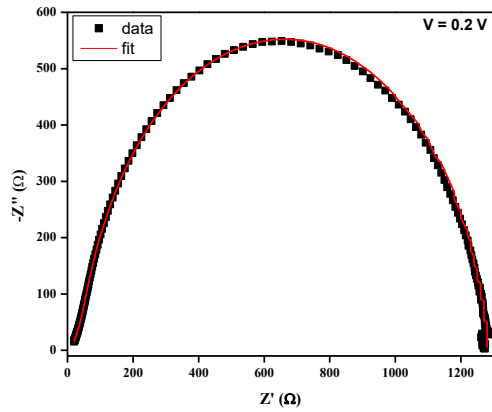


รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง  $-0.8$  ถึง  $0.8$  โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

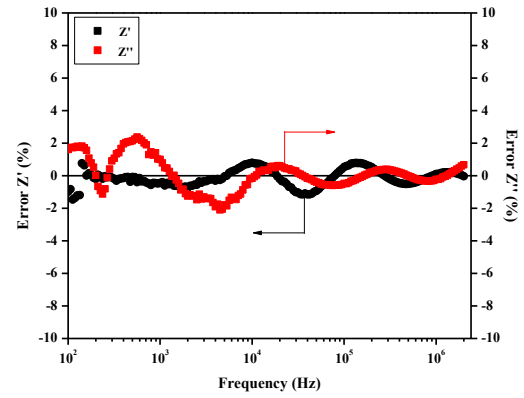
โดยปกติกราฟความสัมพันธ์  $Z'-Z''$  ของรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) มักจะปรากฏเป็นกราฟรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกัน ทั้งขณะทำการไบแอสหรือไม่ได้ไบแอสให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น กราฟรูปครึ่งวงกลมจะแสดงให้เห็นพีคที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่สูง ซึ่งพีคที่ความถี่ต่ำจะสัมพันธ์อยู่กับสถานะผิวเชื่อมต่อของรอยต่อพี-เอ็น ส่วนพีคที่ความถี่สูงจะสัมพันธ์อยู่กับบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อพี-เอ็น แต่ในสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ไม่ปรากฏกราฟคล้ายรูปครึ่งวงกลมสองพีค แสดงว่ากับดักพาหะมีอิทธิพลต่อการจับอิเล็กตรอนอิสระอย่างมาก ซึ่งวงจรสมมูลสำหรับการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 แสดงวงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



ก.



ข.

รูปที่ 4.62 ก. แสดงตัวอย่างการฟิตกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปกับวงจรสมมูลที่ใช้ศึกษาของ ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่แรงดันไบแอส 0.2 โวลต์

ข. แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่วัดได้กับค่าทางทฤษฎีของ ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่แรงดันไบแอส 0.2 โวลต์

$$\text{วิธีการหาค่า Error } Z' = \left( \frac{Z'_{\text{measured}} - Z'_{\text{calculated}}}{Z'_{\text{measured}}} \right) \times 100\% \quad (4.83)$$

$$\text{Error } Z'' = \left( \frac{Z''_{\text{measured}} - Z''_{\text{calculated}}}{Z''_{\text{measured}}} \right) \times 100\% \quad (4.84)$$

Bias Voltage (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)	$C_t$ (F)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_t$ ( $\Omega$ )	$\tau_1 = R_1C_1$ (s)	$\tau_2 = R_2C_2$ (s)	$\tau_t = R_tC_t$ (s)	$N_t = \frac{C_t}{qA}$ ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ )
-0.8	19.20	$5.10 \times 10^{-8}$	$2.27 \times 10^{-9}$	$1.74 \times 10^{-8}$	$2.20 \times 10^1$	$3.88 \times 10^3$	$3.25 \times 10^3$	$1.12 \times 10^{-6}$	$8.81 \times 10^{-6}$	$5.66 \times 10^{-5}$	$1.55 \times 10^{12}$
-0.6	19.12	$4.78 \times 10^{-8}$	$4.15 \times 10^{-9}$	$2.01 \times 10^{-8}$	$3.47 \times 10^1$	$4.02 \times 10^3$	$2.89 \times 10^3$	$1.66 \times 10^{-6}$	$1.67 \times 10^{-5}$	$5.81 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{12}$
-0.4	18.95	$4.41 \times 10^{-8}$	$5.77 \times 10^{-9}$	$2.89 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^1$	$4.50 \times 10^3$	$2.62 \times 10^3$	$1.81 \times 10^{-6}$	$2.60 \times 10^{-5}$	$7.57 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{12}$
-0.2	18.81	$4.34 \times 10^{-8}$	$8.23 \times 10^{-9}$	$6.40 \times 10^{-8}$	$5.88 \times 10^1$	$5.85 \times 10^3$	$2.25 \times 10^3$	$2.55 \times 10^{-6}$	$4.81 \times 10^{-5}$	$1.44 \times 10^{-4}$	$5.71 \times 10^{12}$
0	18.25	$5.98 \times 10^{-9}$	$9.15 \times 10^{-9}$	$6.62 \times 10^{-8}$	$2.67 \times 10^2$	$3.07 \times 10^3$	$2.05 \times 10^3$	$1.60 \times 10^{-6}$	$2.81 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-4}$	$5.91 \times 10^{12}$
0.2	17.78	$4.89 \times 10^{-9}$	$5.54 \times 10^{-10}$	$7.10 \times 10^{-8}$	$2.54 \times 10^2$	$2.23 \times 10^3$	$2.71 \times 10^2$	$1.24 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-6}$	$1.92 \times 10^{-5}$	$6.34 \times 10^{12}$
0.4	17.15	$3.26 \times 10^{-9}$	$3.49 \times 10^{-10}$	$7.34 \times 10^{-8}$	$2.39 \times 10^2$	$1.82 \times 10^3$	$2.58 \times 10^2$	$7.79 \times 10^{-7}$	$6.35 \times 10^{-7}$	$1.89 \times 10^{-5}$	$6.55 \times 10^{12}$
0.6	16.50	$1.54 \times 10^{-9}$	$1.68 \times 10^{-10}$	$8.24 \times 10^{-8}$	$2.18 \times 10^2$	$1.60 \times 10^3$	$2.09 \times 10^2$	$3.36 \times 10^{-7}$	$2.69 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-5}$	$7.36 \times 10^{12}$
0.8	16.10	$1.10 \times 10^{-9}$	$1.12 \times 10^{-10}$	$8.30 \times 10^{-8}$	$1.90 \times 10^2$	$1.41 \times 10^3$	$2.03 \times 10^2$	$2.09 \times 10^{-7}$	$1.50 \times 10^{-7}$	$1.62 \times 10^{-5}$	$7.41 \times 10^{12}$

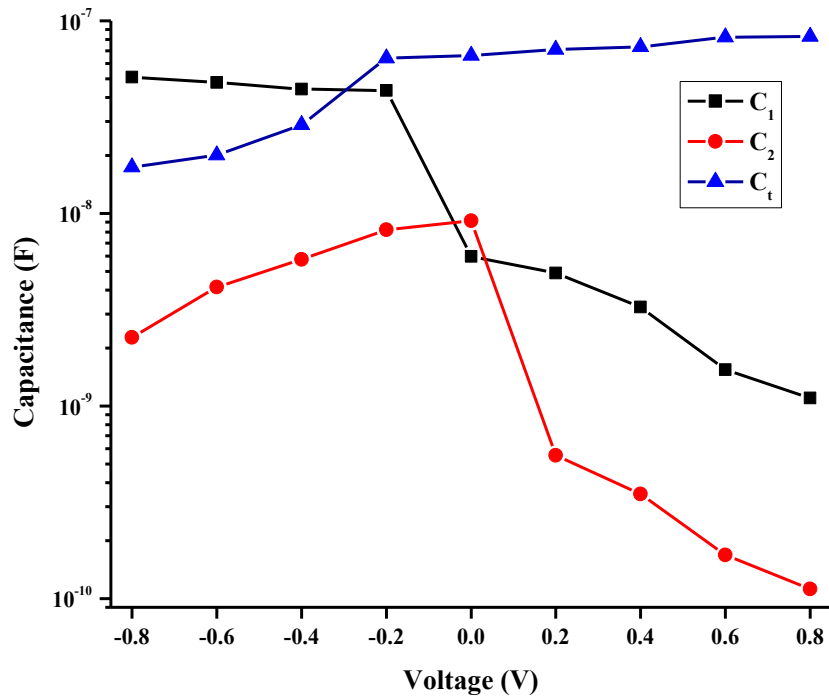
ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

กรณีเมื่อทำการไบแอสตรง ( $0 < V < 0.8$  โวลต์) ที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  แรงดันไฟฟ้าบางส่วนจากแหล่งจ่ายไฟจะตกคร่อมรอยต่อ  $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  (ในที่นี้จะขอเรียกว่ารอยต่อ  $C_2$ ) ในลักษณะที่รอยต่อ  $C_2$  ถูกไบแอสตรง อิเล็กตรอนอิสระและโฮลจะถูกฉีดข้ามรอยต่อ  $C_2$  ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อ  $C_2$  นี้จะเป็นแบบความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) [47] ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ  $C_2$  ลดลงอย่างรวดเร็วตามแรงดันไบแอสตรงที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่รอยต่อ  $\text{Cd}(\text{S},\text{Se}):\text{In}/\text{ZnO}$  (ในที่นี้จะขอเรียกว่ารอยต่อ  $C_1$ ) แรงดันไบแอสบางส่วนจากแหล่งจ่ายไฟจะตกคร่อมที่รอยต่อ  $C_1$  ในลักษณะที่รอยต่อ  $C_1$  ถูกไบแอสกลับทาง เมื่อแรงดันไบแอสกลับทางมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วบริเวณพ่องพาหะของรอยต่อ  $C_1$  จะกว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ  $C_1$  จะมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ

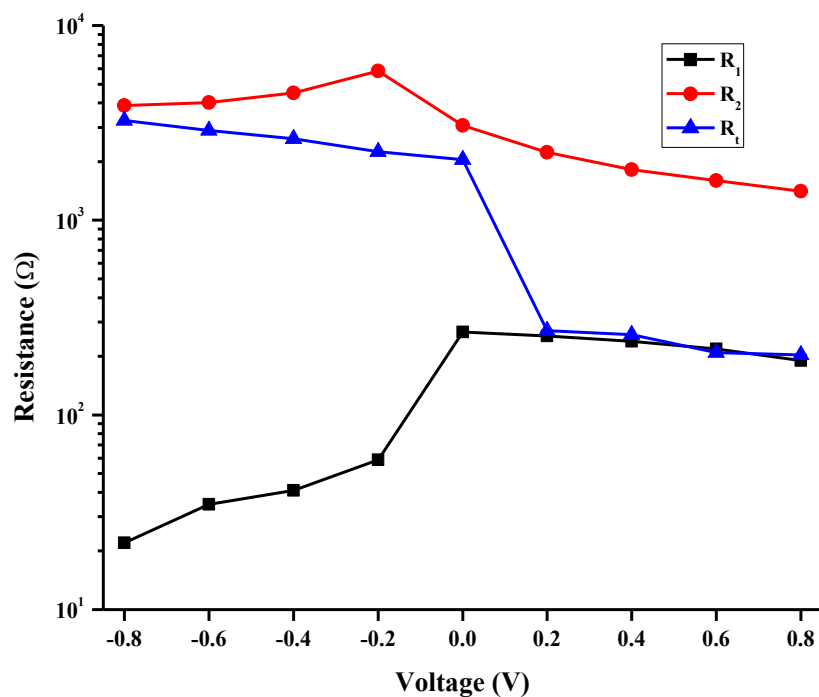
สำหรับความจุไฟฟ้าของกัปดักพาหะ ( $C_T$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสตรงที่เพิ่มขึ้นแสดงว่ากัปดักพาหะจับพาหะอิสระได้มากขึ้น ส่วน  $R_1$  และ  $R_2$  คือความต้านทานชัณฑ์ (shunt resistance) ของรอยต่อ  $C_1$  และ  $C_2$  ตามลำดับ โดยหลักการแล้วภายใต้แรงดันไบแอสตรงที่เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานชัณฑ์ควรมีค่าลดลงและภายใต้แรงดันไบแอสกลับทางที่เพิ่มขึ้น ความต้านทานชัณฑ์ควรมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานชัณฑ์  $R_1$  และ  $R_2$  นี้สอดคล้องดีกับหลักการดังกล่าว ส่วนความต้านทานของกัปดักพาหะ ( $R_T$ ) มีค่าลดลง เมื่อแรงดันไบแอสตรงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องดีกับผลการทดลองที่พบในเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_2$  [48]

สำหรับในกรณีทำการไบแอสกลับทางให้กับสิ่งประดิษฐ์ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ก็พิจารณาได้ในทำนองเดียวกันกรณีไบแอสตรง ส่วนค่าคงตัวของเวลา  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  และ  $\tau_T$  มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  และ  $\tau_T$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อไม่มีการป้อนแรงดันไบแอสให้กับสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธ์นี้ แต่เมื่อแรงดันไบแอสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  และ  $\tau_T$  มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และในทำนองเดียวกันเมื่อทำการไบแอสกลับทางให้มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าทั้ง  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  และ  $\tau_T$  มีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งสอดคล้องดีกับผลการทดลองที่พบในเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_2$  [48]

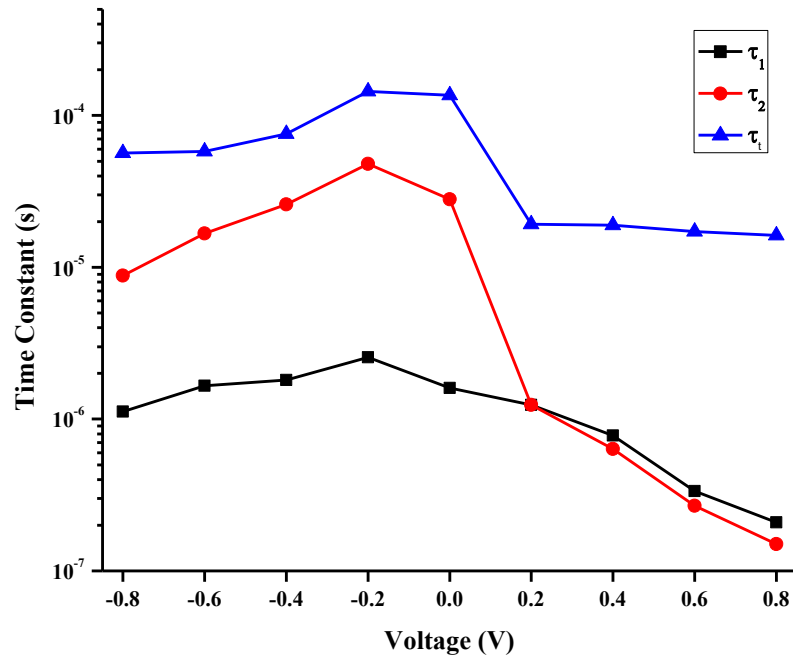
ส่วนโปรไฟล์ของความหนาแน่นของกัปดักพาหะ ( $N_T$ ) ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้นจาก  $-0.8$  ถึง  $0.8$  โวลต์ แสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากระดับตื้น (shallow traps) ไปสู่ระดับลึก (deep traps)



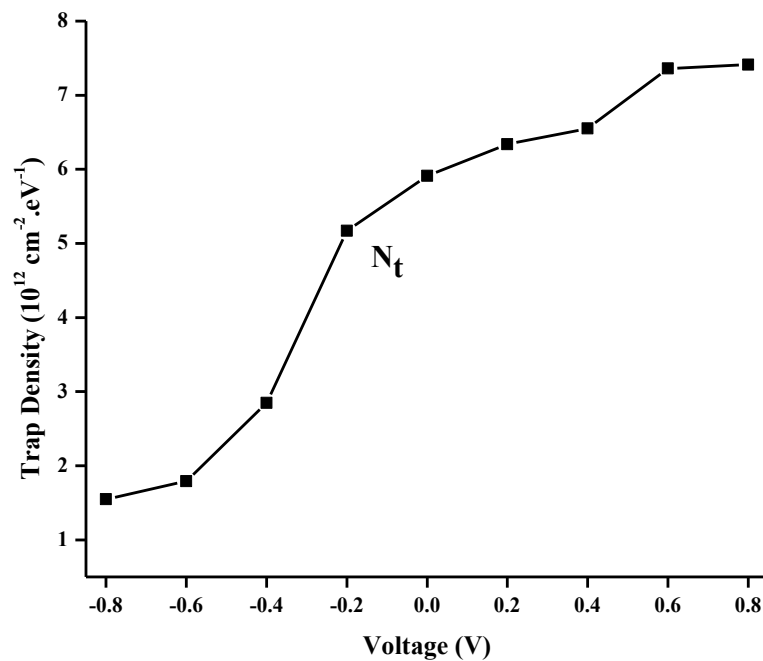
รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ  $C_1$  และ  $C_2$  และค่าความจุของกัปดักพาหะ ( $C_t$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้น  $R_1$  และ  $R_2$  และค่าความต้านทานชั้นของกัปดักพาหะ ( $R_t$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



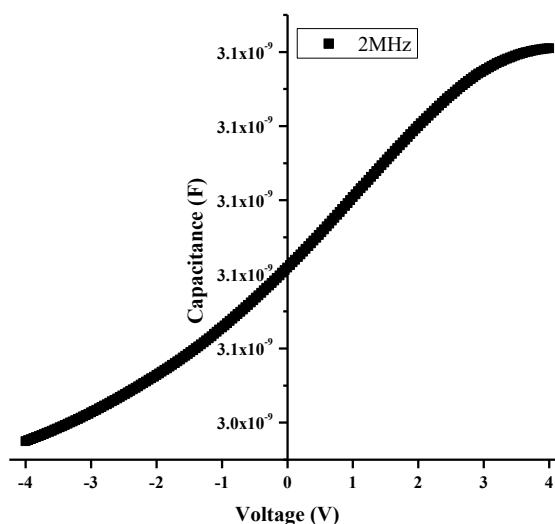
รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา  $\tau_1$  และ  $\tau_2$  และค่าคงตัวของเวลาของกับดักพาหะ ( $\tau_t$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออิวริทพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



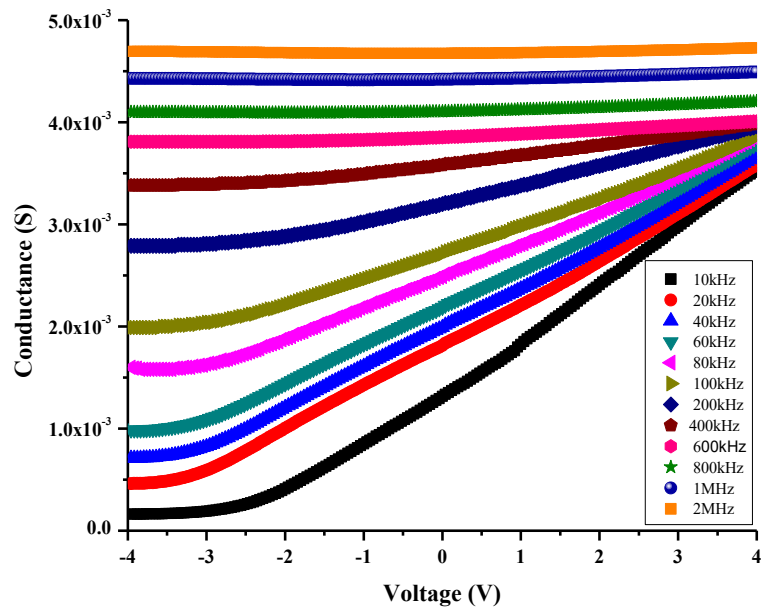
รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ ( $N_t$ ) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออิวริทพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

#### 4.5.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องในช่วงความถี่ 10 ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธ์ ของไดโอดชนิด รอยต่อวิวิธพันธ์ $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

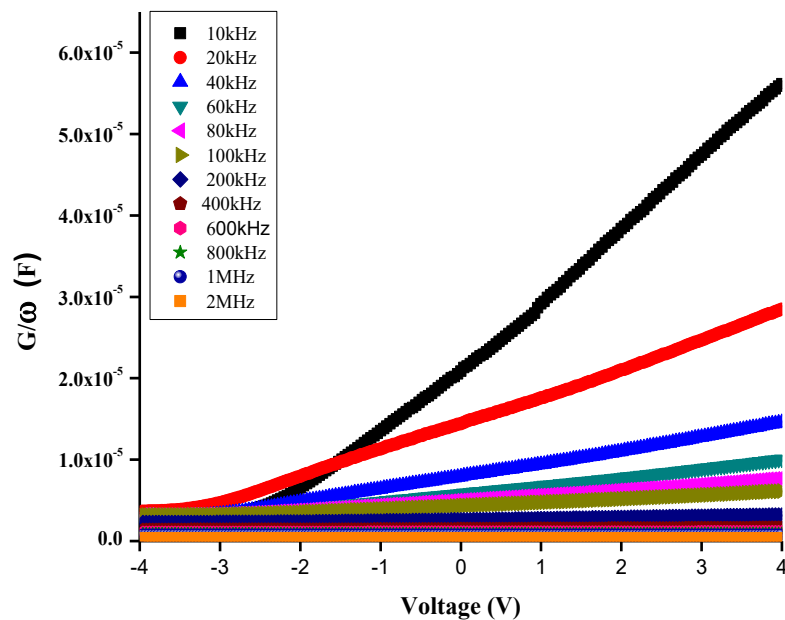
ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เคลือบอยู่บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำอินเดียมออกไซด์เจือด้วยดีบุก (ITO) โดยใช้แรงดัน -4 ถึง 4 โวลต์ ในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าไบแอสตรงมีค่าเพิ่มขึ้น ความจุไฟฟ้ามีค่าเกือบคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.67 แสดงว่ารอยต่อวิวิธพันธ์ประพติดัวกลายเป็นรอยต่อ MIS โดยมีชั้น ZnO เป็นชั้นอินทรินสิก (intrinsic layer) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสถานะผิวเชื่อมต่อปรากฏอยู่ สถานะผิวเชื่อมต่อนี้สามารถจับ และปล่อยอิเล็กตรอนได้ภายใต้สนามไฟฟ้าสลับ เมื่ออยู่ภายใต้สถานะไบแอสตรงจะก่อให้เกิดเงื่อนไขขุมพหุพาหะ ส่วนกรณีภายใต้สถานะไบแอสกลับทางจะก่อให้เกิดเงื่อนไขพร่องพาหะ



รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

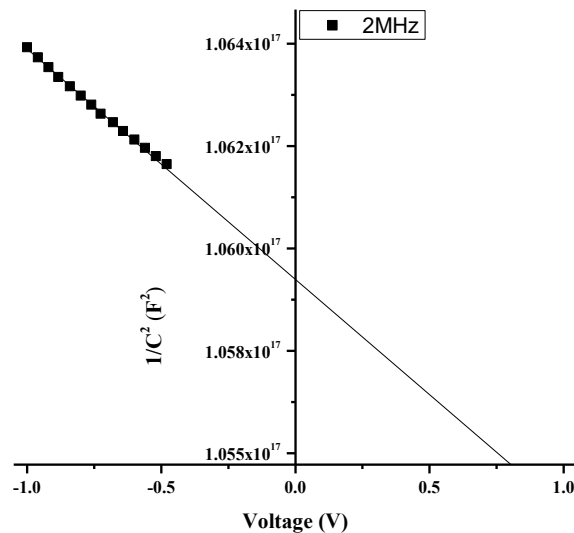


รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $G/\omega$  กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.67 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ ส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.70 และจากส่วนที่เป็นเส้นตรง ในช่วงแรงดันไบแอส -1.0 ถึง -0.5 โวลต์โดยประมาณ สามารถหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_A$ ) ได้จากความชันของกราฟ โดยที่  $\epsilon_r$  คือค่าไดอิเล็กทริกของสารสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.20 จากผลการคำนวณจะได้ว่า ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับจะมีค่า เท่ากับ  $1.02 \times 10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



**รูปที่ 4.70** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $1/C^2$  กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่ ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธ พันธ  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

จากรูปที่ 4.70 เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้น และค่าความชันสามารถ นำมาหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_A$ ) จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{1}{C^2} = \left( \frac{2}{\epsilon_s q N_A A^2} \right) (V_{bi} - V) \quad (4.85)$$

ความชันของกราฟ คือ  $\frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_A}$  และ จุดตัดแกนนอนคือ  $V_i$

จากรูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธ พันธ  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  แสดงพฤติกรรมใกล้เคียงความเป็นรอยต่อ MIS โดยประมาณว่า ชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ประพฤติตัวเป็นชั้นอินทรินสิกของรอยต่อ MIS เมื่อทำการไบแอสกลับทางจะเกิด

เงื่อนไขพร่องพาหะ (depletion condition) ที่รอยต่อ MIS แต่เมื่อทำการไบแอสตรงจะเกิดเงื่อนไขชุนนุมพาหะที่รอยต่อ MIS รวมทั้ง  $R_s$  มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า และค่าความนำไฟฟ้าที่รอยต่อ MIS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะชุนนุมพาหะ ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขเพื่อขจัดผลของ  $R_s$  ที่มีผลต่อความจุไฟฟ้า และค่าความนำไฟฟ้า โดยที่  $R_s$  มีค่าขึ้นกับความถี่ ดังสมการที่ 4.86

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.86)$$

ค่าความจุของชั้นบาง ๆ ของชั้นอินทรินสิกในที่นี่คือชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ที่ได้จากการแก้ไขด้วยผลของ  $R_s$  แล้วเป็นดังนี้ คือ

$$C_{OX} = C_m \left[ 1 + \left( \frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.87)$$

ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าที่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องแล้วจะเป็น  $C_{ADJ}$  และ  $G_{ADJ}$  ดังความสัมพันธ์

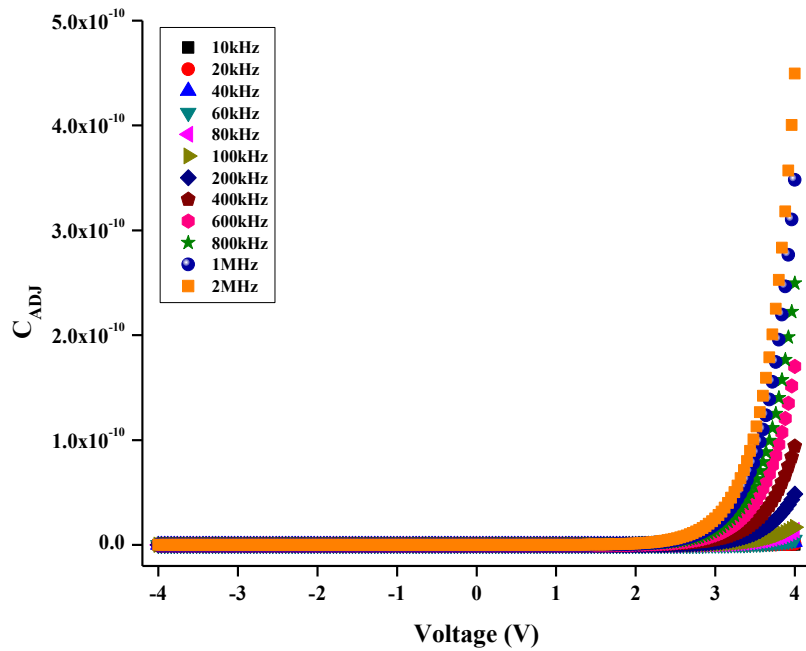
$$C_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.88)$$

$$G_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.89)$$

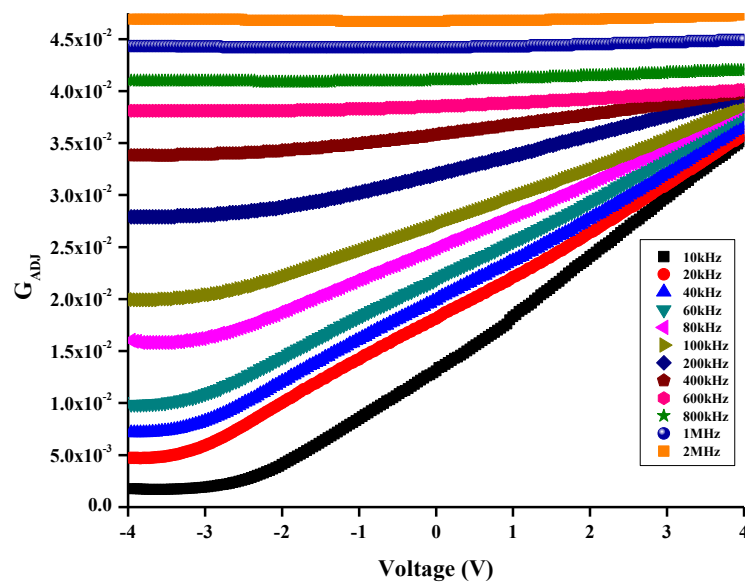
เมื่อ  $a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (4.90)$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า จะแสดงดังรูปที่ 4.71 และ 4.72 ภายใต้เงื่อนไขชุนนุมพาหะที่แรงดันไฟฟ้า 4 โวลต์ ความหนาแน่นของกับดักพาหะสามารถคำนวณได้จากสมการ

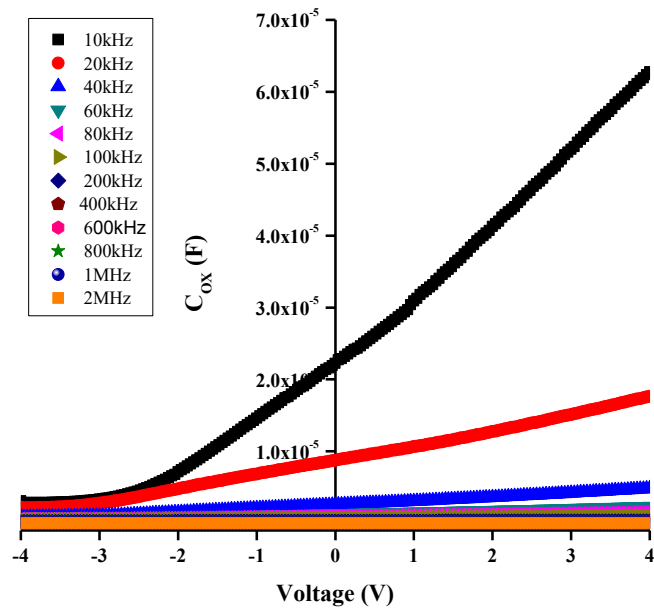
$$D_{it} = \left( \frac{2}{qA} \right) \left[ \frac{\left( \frac{G_{max}}{\omega} \right)}{\left( \frac{G_{max}}{\omega} \right)^2 \left( \frac{1}{C_{OX}^2} \right) + \left( 1 - \left( \frac{C_m}{C_{OX}} \right) \right)^2} \right] \quad (4.91)$$



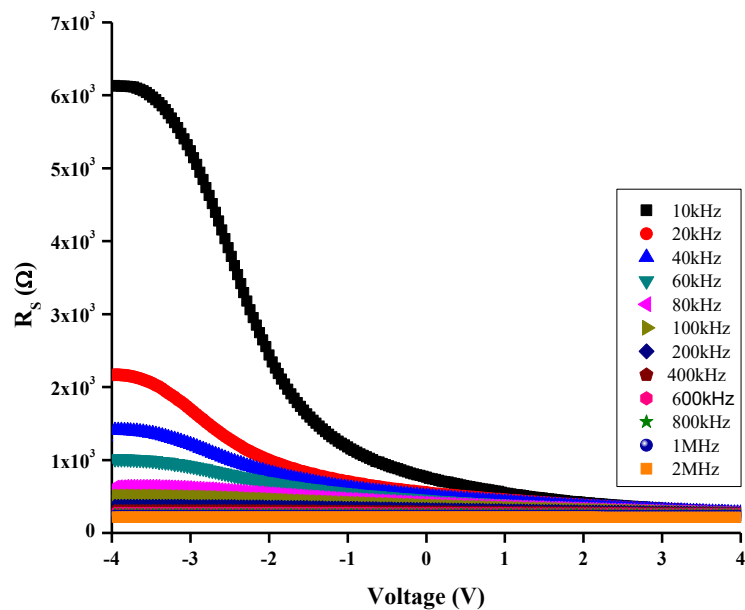
รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_{ADJ}$  กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $G_{ADJ}$  กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$



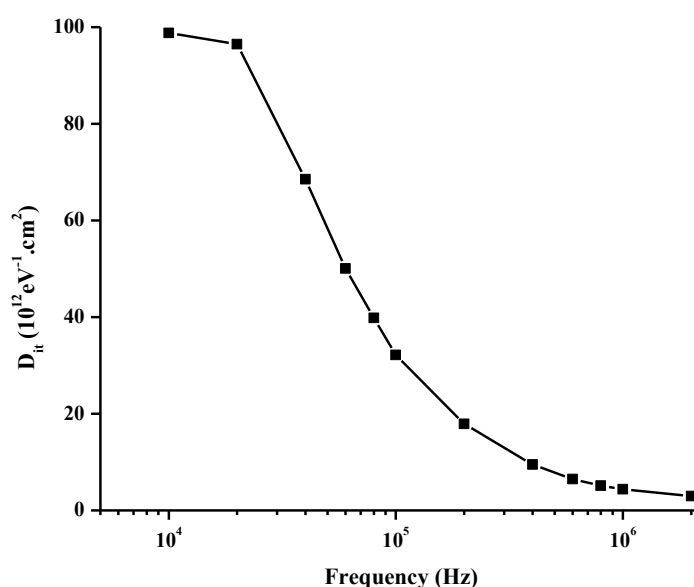
รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_{ox}$  กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$



รูปที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_s$  กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด  $G_{\max}/\omega$  ที่แรงดันไฟฟ้า 4 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด  $C_m$  ความจุบริเวณชั้นออกไซด์  $C_{ox}$  และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$

Frequency (KHz)	$G_{\max}/\omega$ (V = 4V) (nF)	$C_m$ (nF)	$C_{ox}$ (nF)	$D_{it}$ ( $\times 10^{12} eV^{-1}.cm^{-2}$ )
10	561.81	14.55	393.94	98.80
20	284.88	13.67	364.89	96.59
40	146.02	13.09	338.53	68.50
60	100.53	12.59	286.43	50.04
80	76.79	11.74	245.23	39.81
100	61.43	10.88	186.89	32.15
200	31.51	10.16	169.89	17.87
400	15.87	7.69	92.29	9.50
600	10.63	5.40	58.50	6.49
800	8.35	4.27	43.70	5.11
1000	7.14	3.57	35.79	4.37
2000	3.76	3.10	12.87	2.95



รูปที่ 4.75 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $D_{it}$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$

#### 4.5.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อการแรงดันไปแอสไฟฟ้าในช่วง -4 ถึง 4 โวลต์ ที่อุณหภูมิในช่วง 30-90 องศาเซลเซียส ของ ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ $CdS_{0.5}Se_{0.5}:In_2S_3/ZnO/Cu_2O$

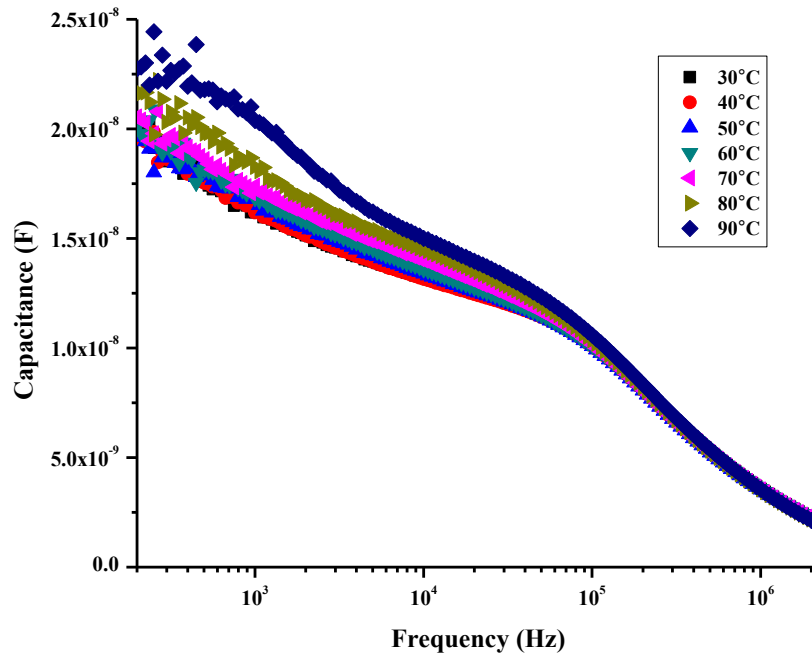
ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.76 ซึ่งกรณีของความหนาแน่นของกักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน ความจุของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Cd(S,Se):In/ZnO/Cu_2O$  ที่วัดได้คือ  $C_p$  จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.92)$$

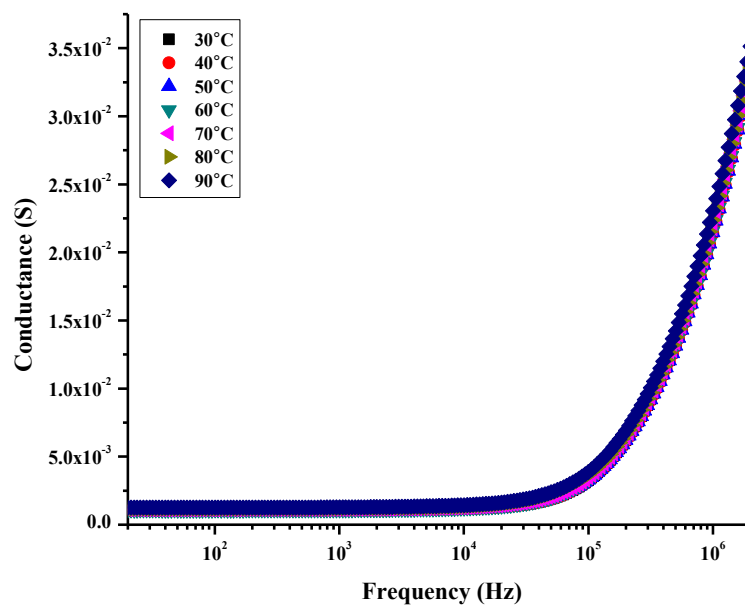
เมื่อ  $C_D$  คือความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน  $C_{it}$  คือความจุไฟฟ้าของกักประจุ รูปที่ 4.77 แสดงถึงความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของจอนเซอร์ (Joncther relation) คือ

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^s \quad (4.93)$$

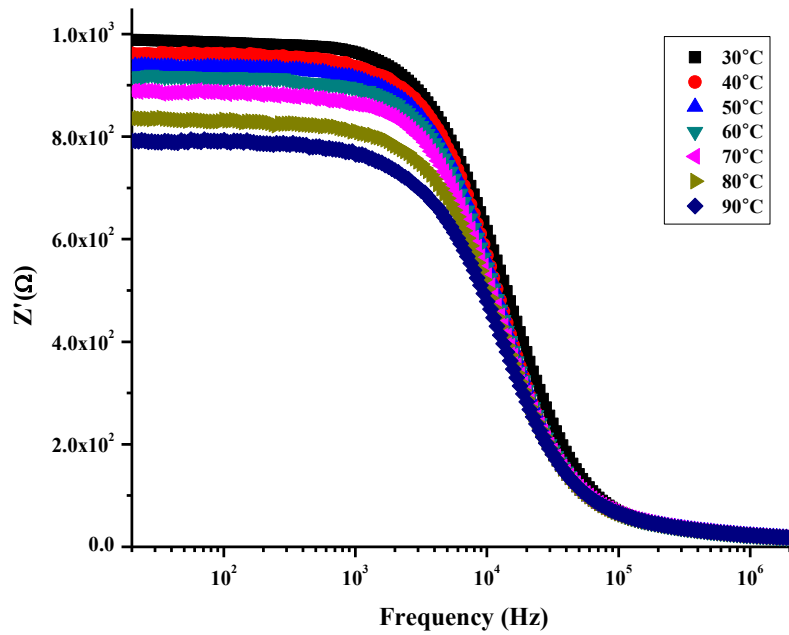
เมื่อ  $A$  คือค่าคงที่ เลยกกำลัง  $s$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 90 องศาเซลเซียสความนำไฟฟ้า ( $G$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ความถี่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ความนำไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับความถี่ แต่สำหรับที่ความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าที่ความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากกักพาหะได้



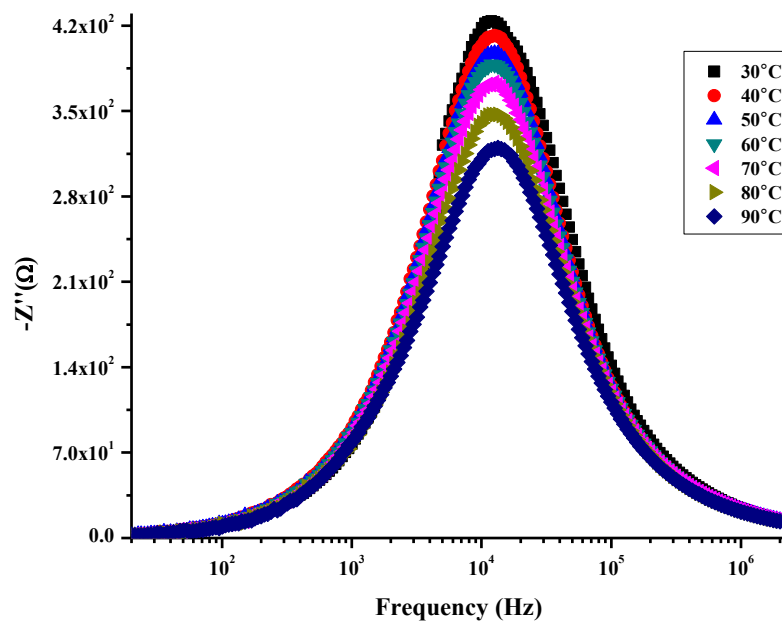
รูปที่ 4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



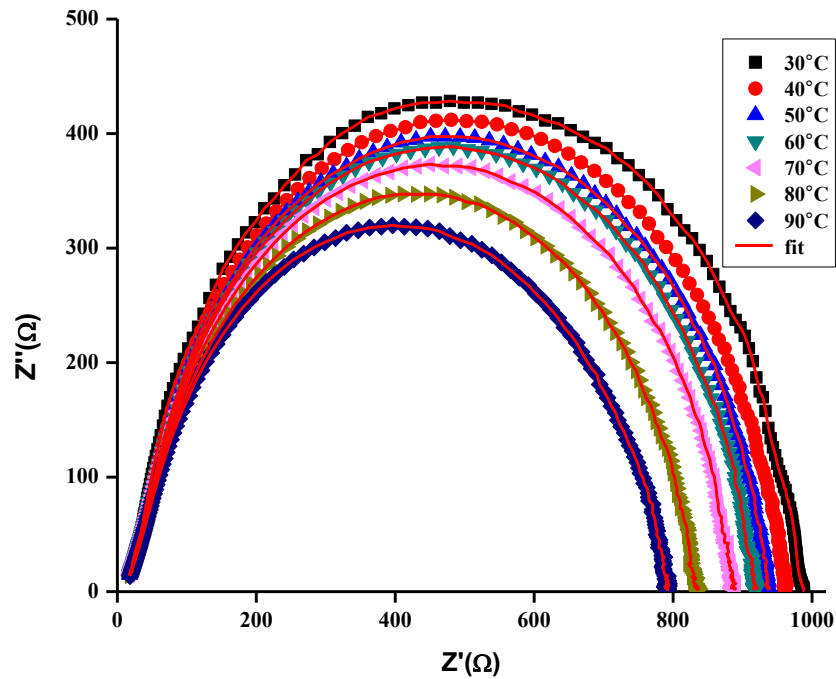
รูปที่ 4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



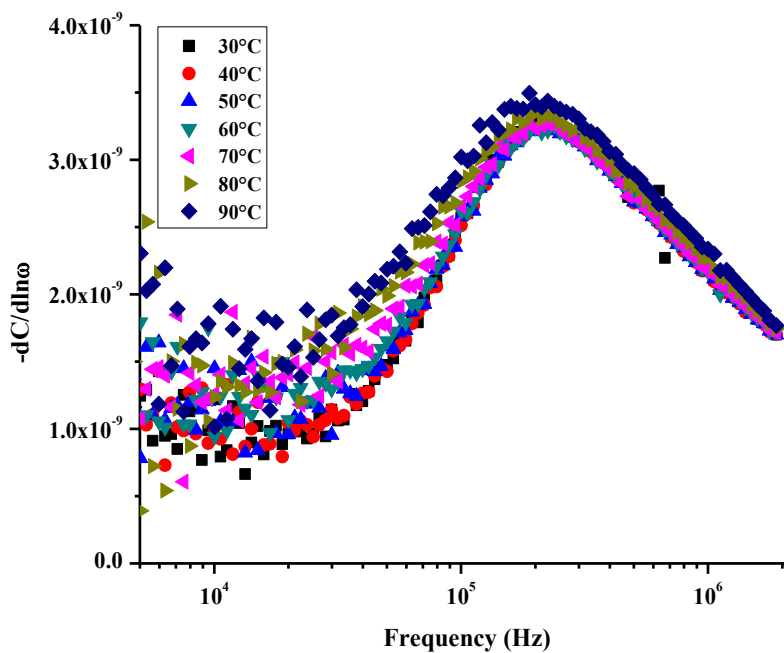
รูปที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.80 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$



รูปที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $-dC/d\ln\omega$  กับความถี่ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

พลังงานกระตุ้นหาได้จากความสัมพันธ์

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.94)$$

จัดรูปแบบใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.95)$$

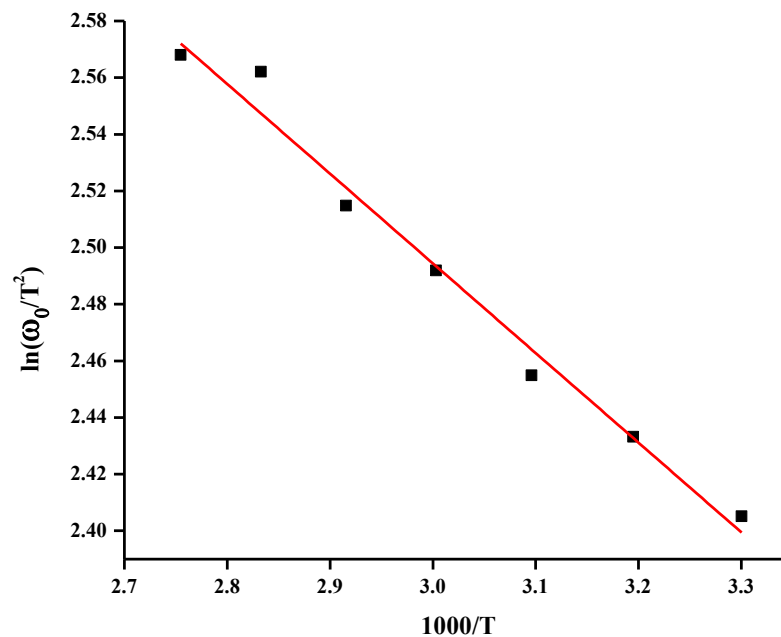
และหาค่า  $\sigma_T$  ได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th}N_C} \quad (4.96)$$

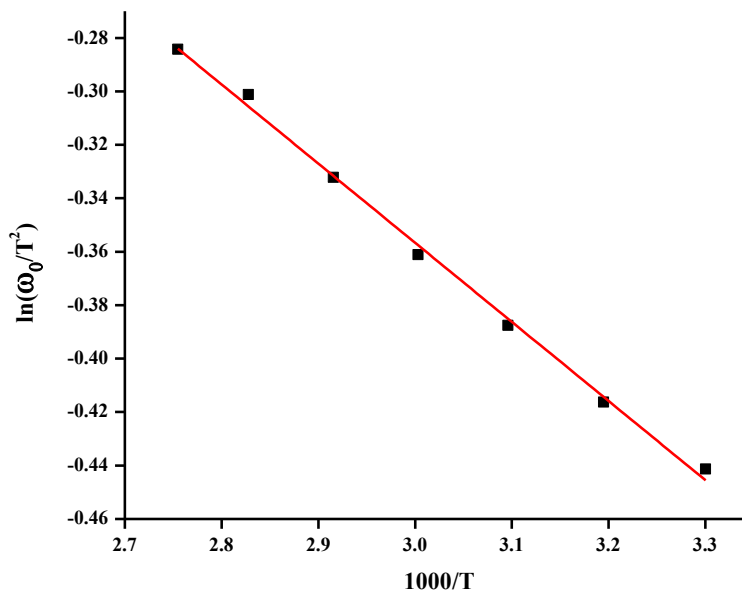
เมื่อ  $\xi_0$  คือ พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุ

$\sigma_T$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับอิเล็กตรอนของประจุ

$v_{th}$  คือ ความเร็วเนื่องจากพลังงานความร้อน =  $2.30 \times 10^7$  เซนติเมตร/วินาที



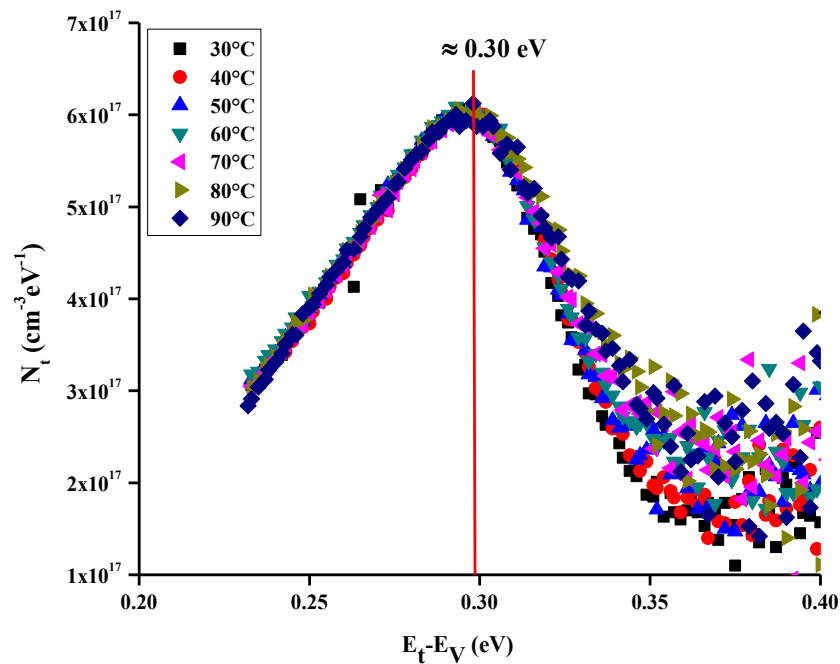
**รูปที่ 4.82** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \omega_0/T^2$  กับ  $1000/T$  ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ได้จากการพลความสัมพันธ์ระหว่าง  $-dC/d\ln\omega$  กับ ความถี่



รูปที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \omega_0/T^2$  กับ  $1000/T$  ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'-Z''$

ตารางที่ 4.17 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

Method	Temperature (°C)	$f_0$ (Hz)	$\omega_0$ (S <sup>-1</sup> )	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ (s <sup>-1</sup> K <sup>-2</sup> )	$\sigma_t$ (cm <sup>2</sup> )
$\frac{-dC}{d\ln\omega}$	30	$1.84 \times 10^5$	$1.16 \times 10^6$	0.31	31.28	$7.82 \times 10^{-23}$
	40	$2.02 \times 10^5$	$1.27 \times 10^6$			
	50	$2.06 \times 10^5$	$1.29 \times 10^6$			
	60	$2.14 \times 10^5$	$1.34 \times 10^6$			
	70	$2.18 \times 10^5$	$1.37 \times 10^6$			
	80	$2.26 \times 10^5$	$1.42 \times 10^6$			
	90	$2.33 \times 10^5$	$1.46 \times 10^6$			
$Z'-Z''$	30	$1.09 \times 10^4$	$6.85 \times 10^4$	0.29	1.70	$4.24 \times 10^{-24}$
	40	$1.11 \times 10^4$	$6.97 \times 10^4$			
	50	$1.18 \times 10^4$	$7.41 \times 10^4$			
	60	$1.21 \times 10^4$	$7.60 \times 10^4$			
	70	$1.27 \times 10^4$	$7.98 \times 10^4$			
	80	$1.32 \times 10^4$	$8.29 \times 10^4$			
	90	$1.39 \times 10^4$	$8.73 \times 10^4$			



รูปที่ 4.84 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_t$  กับพลังงาน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

จากรูปที่ 4.84 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกักพาหะในเนื้อสาร บริเวณพร่องพาหะ ที่ระดับพลังงานค่าต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของ [49]

$$E_\omega = E_t - E_V = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{2\xi_0 T^2}{\omega} \right) \quad (4.97)$$

โดยที่

$$N_t = \frac{-\phi_B}{\frac{kT}{q} W_D A} \left( \frac{dC}{d \ln \omega} \right)$$

(4.98)

และ

$$W_D = \left[ \frac{2\varepsilon_s}{qN_A} (\phi_B - V) \right]^{1/2} \quad (4.99)$$

เมื่อกำหนดให้  $\phi = 0.8 \text{ eV}$ ,  $\varepsilon_r = 7.2$ ,  $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ที่  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  จะได้ว่า  $T = 303\text{K}$

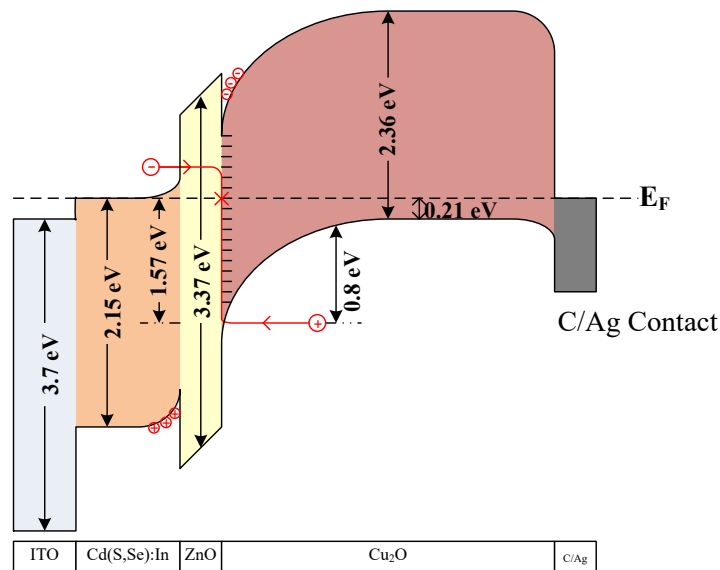
$$\begin{aligned}
 W_D &= \left[ \frac{2\epsilon_s}{qN_A} (\phi_B - V) \right]^{1/2} \\
 &= \left[ \frac{2(7)(8.85 \times 10^{-14})(0.8)}{(1.6 \times 10^{-19})(2 \times 10^{16})} \right]^{1/2} \\
 &= 1.76 \times 10^{-5} \text{ cm}
 \end{aligned}$$

จากการทดลอง  $\frac{-dC}{d \ln \omega} \approx 3.86 \times 10^{-9} \text{ F}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 N_t &= \frac{-\phi_B}{\frac{kT}{q} W_D A} \left( \frac{-dC}{d \ln \omega} \right) = \frac{\phi_B}{\frac{qkT}{q} W_D A} \left( \frac{dC}{d \ln \omega} \right) \\
 &= \frac{(0.8)(4 \times 10^{-9})}{(1.38 \times 10^{-23})(303)(1.76 \times 10^{-5})(0.07)} \\
 &= 6.01 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}
 \end{aligned}$$

จากการวัดแคปาซิแตนซ์สเปกโตรสโคปี ที่อุณหภูมิห้อง 30-90 องศาเซลเซียส พบว่าระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดเดี่ยว (single trap) มีค่าประมาณ 0.30 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเกิดจากระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) ของฟิล์มบาง  $\text{Cu}_2\text{O}$  ซึ่งมีผู้รายงานไว้แล้ว [50,51] และค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะมีค่าประมาณ  $6 \times 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออิเล็กตรอนโวลต์



**รูปที่ 4.85** แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่สภาวะสมดุลความร้อนและไม่มีการไบแอส

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{Cd}(\text{S,Se}):\text{In}/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  โดยอาศัยแบบจำลองการการเจาะอุโมงค์ผ่านกำแพงศักย์ที่ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะอิสระโดยผ่านกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อ (tunneling enhanced interface trap recombination model) ซึ่งแบบจำลองนี้ใช้อธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In,Ge})\text{Se}_2$  ได้เป็นอย่างดี [52,53] สำหรับชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ในแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธ์ของเรานี้จะทำหน้าที่ยับยั้งการแพร่ของอะตอมโลหะ Cd จากชั้นฟิล์มบาง  $\text{Cd}(\text{S,Se}):\text{In}$  ไปยังชั้นฟิล์มบาง  $\text{Cu}_2\text{O}$  และในทำนองเดียวกันยังช่วยยับยั้งการแพร่ของอะตอม Cu จากชั้นฟิล์มบาง  $\text{Cu}_2\text{O}$  ไปยังชั้นฟิล์มบาง  $\text{Cd}(\text{s,Se}):\text{In}$  อีกด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) โดยมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่ทำการเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งในขณะที่ทำการระเหยสารเคมีจะทำการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการระเหยสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายในระบบสุญญากาศต่ออีก 30 นาที

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบระนาบที่สำคัญอยู่ 3 ระนาบ ได้แก่ ระนาบ (002), (103) และ (004) ซึ่งปรากฏอยู่ในช่วง 20-60 องศา โดยระนาบ (002) เป็นระนาบที่โดดเด่นซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหรือเวิร์ทไซต์ ตำแหน่งของการเลี้ยวเบนจะเคลื่อนที่ไปยังค่ามุมที่สูงขึ้นตามความเข้มข้นของอะตอม S ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุ S ที่มีรัศมีอะตอม 1.84 อังสตรอม เข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุ Se ที่มีรัศมีของอะตอม 1.98 อังสตรอมในโครงผลึก และค่าคงที่โครงผลึก ( $a_H$ ) และ ( $c_H$ ) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะลดลงตามความเข้มข้นของอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น และลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นไปตามกฎของเวการ์ต (Vegard)

การศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ และขนาดของเกรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น และการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า (FESEM) เป็นการศึกษาถึงลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่กำลังขยาย 100,000 เท่า ซึ่งเป็นการแสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ สังเกตได้ว่าที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีความเรียบสม่ำเสมอไม่รอยแตก และมีการรวมตัวของกลุ่มก้อนอนุภาค (cluster) ที่มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป และสังเกตได้ว่าขนาดของกลุ่มก้อนอนุภาคจะมีแนวโน้มโตขึ้นเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ  $x$  ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก AFM และ XRD

การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุ ด้วยเทคนิค EDS และ XPS ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางประกอบไปด้วย 4 ธาตุหลัก ๆ คือ Cd, S, Se และ In ตามลำดับ จากเทคนิค EDS จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสูงตรงพีคที่ตรงกับธาตุ S จะมีค่าสูงขึ้น แต่ความสูงของพีคที่ตรงกับธาตุ Se จะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าปริมาณของธาตุ S ที่อยู่ในฟิล์มบางมีมากขึ้น ซึ่งช่วยยืนยันได้ถึงถึงการแทนที่อะตอมของธาตุ Se ด้วยอะตอมของธาตุ S ในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งนี้จากสเปกตรัม EDS ข้างต้นจะเห็นได้ชัดว่าไม่ปรากฏพีคของธาตุ In เนื่องจากปริมาณการเจืออะตอม In ค่อนข้างที่จะน้อยทำให้เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบเกินขอบเขตของเครื่องที่จะสามารถวัดได้ และจากเทคนิค XPS พบธาตุ Cd คือ  $\text{Cd}3d_{5/2}$  และ  $\text{Cd}3d_{3/2}$  ที่พลังงาน 405.3-405.5 และ 412.0-412.3 eV ธาตุ Se คือพบ  $\text{Se}3d_{5/2}$  และ  $\text{Se}3d_{3/2}$  ที่พลังงาน 42.1-42.2 และ 54.9-55.0 eV และธาตุ In คือพบ  $\text{In}3d_{5/2}$  และ  $\text{In}3d_{3/2}$  ที่ระดับพลังงาน 445.0-445.2 eV ซึ่งในการตรวจสอบของธาตุ In ในกรณีการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค EDS ไม่ปรากฏพีคของธาตุ In แต่เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS ปรากฏว่าพบพีคของธาตุ In ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) มีอะตอมของธาตุ In อยู่ในฟิล์มบางจริง

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร เมื่อ  $x = 0$  แต่เมื่อ  $x$  เพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งการดูดกลืนจะเลื่อนไปยังค่า 450 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแบบกราฟสมการกำลังสองโดยมีค่าพารามิเตอร์ความโค้ง (bowing parameter) เท่ากับ 0.473 และพบว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าส่วนหางของแถบพลังงานที่ลดลงส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเราสรุปได้ว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานเกิดจากข้อบกพร่องของโครงสร้างนั่นเอง

จากการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ( $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ )<sub>0.99</sub>( $\text{In}_2\text{S}_3$ )<sub>0.01</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมขึ้นและหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง โดยการใช้โปรแกรม PARAV 2.0 ซึ่งอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมการส่งผ่านแสง พบว่าค่าดัชนีหักเหของแสงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0 จนถึง 1.0 และเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องมาจากการที่ค่าดัชนีหักเหของแสงน้อยแสงสามารถส่งผ่านฟิล์มได้ดีและการที่ค่าดัชนีหักเหของแสงมากจะทำให้ทิศทางของแสงในฟิล์มบางเปลี่ยนไปมากโอกาสที่แสงจะสูญเสียภายในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจะมีสูงขึ้นเนื่องจากระยะทางการเดินทางของแสงในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น

ส่วนของแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว จากการทดลองสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) พบว่าค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ

เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก (0.0) จนถึง (1.0) และค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x \leq 0.6$ ) และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม  $x \geq 0.8$  ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ  $M_1$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ  $M_3$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0 จนถึง 1.0 ค่าคงที่ไดโพลีตริกเป็นสิ่งหนึ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของอิเล็กตรอนในอะตอมที่จะโผลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้ามาในผลึก โดยบทบาทของค่าคงที่ไดโพลีตริกจะแบ่งเป็นสองช่วงความยาวคลื่น ซึ่งอธิบายด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดโพลีตริกของวัสดุนั้นๆ จากผลการทดลองจึงทำให้ทราบว่า จำนวนจริงของค่าคงที่ไดโพลีตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดโพลีตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น และมีพลังงานที่สูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ S จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดโพลีตริกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ได้

การศึกษาถึงค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) พบว่า ค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนจำนวนจริงและส่วนจำนวนจินตภาพ ส่วนจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้นและมีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงในย่านอินฟราเรด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางแสดงการสั่นแบบยืด-หด ของพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุ Cd-S, S-S, Cd-S, In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, C-O, C-H และ O-H ตามลำดับ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์และสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจาก  $3.21 \times 10^{-3}$  โอห์ม.เซนติเมตร ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเท่ากับ 0.0 จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $1.47 \times 10^{-3}$  โอห์ม.เซนติเมตร ที่อัตราส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเท่ากับ 0.4 จากนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $5.51 \times 10^{-3}$  โอห์ม.เซนติเมตร ที่อัตราส่วนโมลอะตอม (x) มีค่าเท่ากับ 1.0

ผลการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง  $-1.0$  ถึง  $1.50$  โวลต์ พบว่าแรงดันขีดเริ่ม (turn on voltage) ที่ประมาณ  $0.8$  โวลต์ จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ที่รอยต่อของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า  $0.15$  โวลต์กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า  $0.15$  ถึง  $0.55$  โวลต์ การนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มออิเล็กทริกมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า  $0.55$  โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  จะสามารถหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติได้จากความชันของกราฟ และสามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกน  $y$  ซึ่งจุดตัดแกน  $y$  นี้คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะต้องเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง  $-4$  ถึง  $4$  โวลต์เมื่อใช้ความถี่ตั้งแต่  $10$  กิโลเฮิรตซ์ ถึง  $2$  เมกกะเฮิรตซ์ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  จากการพลความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  กับ  $V$  และจากจุดตัดแกน  $x$  สามารถนำไปหาค่าแรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ได้ และความชันนั้นสามารถนำมาหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ  $N_d$  พบว่าแรงดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า จะได้ว่าหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ได้ บทบาทของชั้นบัฟเฟอร์  $\text{ZnO}$  คือยับยั้งการแพร่ของอะตอม  $\text{Cu}$  เข้าไปยังชั้นฟิล์มบาง  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3$  และทำหน้าที่ยับยั้งอะตอม  $\text{Cd}$  ไม่ให้แพร่เข้าไปยังชั้นฟิล์มบาง  $\text{Cu}_2\text{O}$

## ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ได้มีปัญหาดังต่อไปนี้

1. ควรชี้แจงทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จ เนื่องจากฟิล์มบางที่เคลือบอยู่ในระบบสุญญากาศจะเป็นตัวจับออกซิเจนไว้

ภายใน และเมื่อทั้งระบบไว้นาน ๆ ย่อมส่งผลให้ชิ้นออกไซด์ที่สะสมไว้หนาขึ้นทำให้ระบบ  
สุญญากาศดูดอากาศได้ช้าในการทำงานครั้งต่อไป

2. ในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางหลายชั้นเพื่อประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธ์ ควรวางแผนการ  
เตรียมฟิล์มบางหลายชั้นตอนอย่างต่อเนื่องกัน เพื่อให้เสร็จสิ้นภายในครั้งเดียว
3. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าต้องทำขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ โดยกา  
วคาร์บอนและกาวเงินที่ใช้นั้น ต้องมีคุณสมบัติในด้านความเงาที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญห  
การแพรอย่างรวดเร็วของกาวเงินในเนื้อสาร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Pan, A. Zhou, E. Leong, S. Liu, R. Chin, A.H. Zou, B. and Ning, C.Z. 2009. "Continuous Alloy-Composition Spatial Grading and Superbroad Wavelength-Tunable Nanowire Lasers on a Single Chip" *Nano Lett.* 9 : 784-788.
- [2] Zhang, H. Wang, D.Y. and Yang, B. 2006. "Manipulation of Aqueous Growth of CdTe Nanocrystals to Fabricate Colloidally Stable One-Dimensional Nanostructures" *J. Am. Chem. Soc.*, 128 : 10171-10180.
- [3] Ezema, F.I. and Osuji, R.U. 2007. "Band Gap Shift and Optical Characterization of Chemical Bath Deposited CdSSe Thin Films on Annealing" *Chalcogenide Lett.*, 4 : 69-75.
- [4] Sifuentes, C. Barmenkov, Y. Strodumov, A. Filipov, V. and Lipovskii, A. 2000. "Application of CdSe-Nanocrystallite-Doped Glass for Temperature Measurements in Fiber Sensors" *Opt. Eng.*, 39 : 2182-2186.
- [5] Kumar, V. Sharma, S.K. and Dwivedi, D.K. 2012. "Crystallographic, Optical and Electrical Properties of Low Zinc Content Cadmium Zinc Sulphide Composite Thin Films for Photovoltaic Applications" *J. Alloys Compd.*, 512 : 351-354.
- [6] Gruszecki, T. and Holmstorm, B. 1993. "Preparation of Thin Films of Polycrystalline CdSe for Solar Energy Conversion" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 31 : 227-334.
- [7] Chate, P.A. Sathe, D.J. and Hankare, P.P. 2011. "Electrical and Crystallographic Properties of Nanocrystalline CdSe<sub>0.5</sub>S<sub>0.5</sub> Composite Thin Films Deposited by Dip Method" *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 22 : 111-114.
- [8] Mane, R.S. and Lokhande, C.D. 1997. "Studies on Chemically Deposited Cadmium Sulphoselenide Films" *Thin Solid Films*, 304 : 56-60.
- [9] Yadav, A.A. and Masumdar, E.U. 2010. "Optical and Electrical Transport Properties of Spray Deposited CdS<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> Thin Films" *J. Alloys Compd.*, 505 : 787-792.
- [10] Al-bassam, A.A., 1999. "Photoconductivity and Defect levels in Zn<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>Se (x = 0.5, 0.55) with Crystals" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 57 : 323-329.
- [11] Yadav, A.A. Barote, M.A. and Masumdar, E.U. 2010 "Photoelectrochemical Properties of Spray Deposited n-CdSe Thin Films" *Sol. Energy* 84 : 763-770.
- [12] Razykov, T.M. and Kouchkarov, K.M. 2006. "Influence of The Growth Rate on the Nanocrystallinity of II-VI Films in Chemical Vapor Deposition" *Sol. Energy* 80 : 182-184.

- [13] Chaudhari, J.B. Deshpande, N.G. Gudage, Y.G. Ghosh, A. Huse, V.B. and Ramphal Sharma. 2008. "Studies on Growth and Characterization of Ternary  $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$  Alloy Thin Films Deposited by Chemical Bath Deposition Technique" *Appl. Surf. Sci.*, 254 : 6810-6816.
- [14] U.Rössler (Ed.). 1999. **II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds**, vol. 41B, Springer, Berlin, Germany.
- [15] Kale, R.B. and Lokhande, C.D. 2005. "Band Gap Shift, Structural Characterization and Phase Transformation of CdSe Thin Films from Nanocrystalline Cubic to Nanorod Hexagonal on Air Annealing" *Sci. Technol.*, 20 : 1-9.
- [16] Badawi, M.H, Aboul-Enein, S. Ghali, M. and Hassan, G. 1998. "Physical Properties of Chemically Deposited CdS Films for Solar Cells" *Renew. Energy*, 14 : 107-112.
- [17] Kevin, P. Alghamdi, YG. Lewis, D.J. and Malik, M.A. 2015. "Morphology and Band Gap Controlled AACVD of CdSe and  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  Thin Films Using Novel Single Source Precursors: Bis(diethyldithio/diselenocarbamate) Cadmium(II)." *Mater. Sci. Semicond. Process.* 40 : 848-854.
- [18] Lisco, F. Kaminski, P.M. Addas, A. Bass, K. Bowers, J.W. Claudio, G. Losurdo, M. and Walls, J.M. 2015. "The Structural Properties of CdS Deposited by Chemical Bath Deposition And Pulsed Direct Current Magnetron Sputtering" *J. Thin Solid Films.* 582 : 323-327.
- [19] Pawar, S.H. Bhosale, C.H. and Deshmukh, L.P. 2017. "Electrochemical Bath Deposition Technique: Deposition of CdS Thin Films" *Bulletin of Materials Science.* 8 : 419-422.
- [20] Buckingham, M.A. Catherall, A.L. Hill, M.S. Johnson, A.L. and Parish, J.D. 2017. "Aerosol-Assisted Chemical Vapor Deposition of CdS from Xanthate Single Source Precursors" *ACS publication.* 17 : 907-912.
- [21] Hassanien, A.S. and Akl, A.A. 2015. "Influence of Composition on Optical and Dispersion Parameters of Thermally Evaporated Non-Crystalline  $\text{Cd}_{50}\text{S}_{50-x}\text{Se}_x$  Thin Films" *J. Alloys Compd.* 648 : 280-290.
- [22] Sze, S.M. 1981. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York.
- [23] Kittel, C. 2005. **Introduction to Solid State Physics**. 8<sup>th</sup> ed. United State of America: John Wiley & Son, Ins., New York.

- [24] ฐิตินัย แก้วแดง. 2531. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [25] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [26] ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [28] ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษา สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟตีซีสปัดเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [33] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

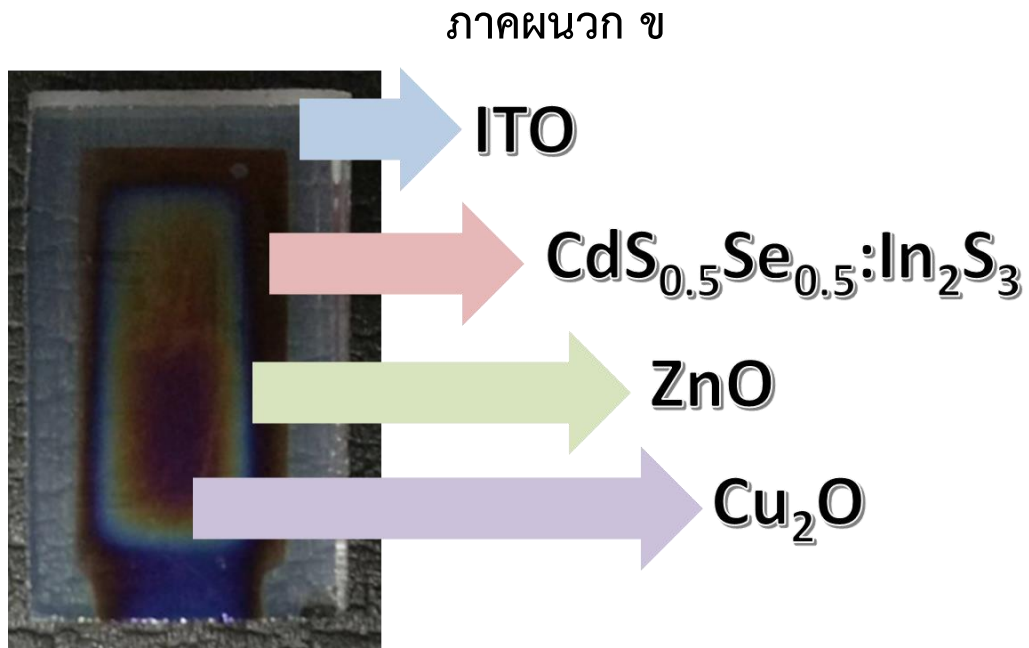
- [34] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [35] เมธิรา ร่วมสุข. 2555. “สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [36] สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [37] Hassanien, A.S. and Akl, A.D. 2016 “Effect of Se Addition on Optical and Electrical Properties of Chalcogenide  $CdSSe$  Thin Films” *Superlattices and Microstructures*. 89 : 153-169.
- [38] Kranjcec, M. Studenyak, I.P. and Kurik, M.V. 2009. “On the Urbach Rule in Non-Crystalline Solids.” *J. Non-Cryst. Solids*. 355: 54–57.
- [39] Ganjoo, A. and Golovchak, R. 2008. “Computer Program PARAV for Calculating Optical Constants of Thin Films and Bulk Materials: Case Study of Amorphous Semiconductors.” *J. of Optoel. Adv. Matel.* 10: 1328-1332.
- [40] Wemple, S.H. and DiDomenico, M. 1971. “Behavior of the Electronic Dielectric Constant in Covalent and Ionic Materials.” *Phys. Rev. B*. 3: 1338.
- [41] 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.” *J. Appl. Surf. Sci.* 344: 80-100.
- [42] Mohd, Z.A. and Neeraj, K. 2015. “Thermally Activated Band Conduction and Variable Range Hopping Conduction in  $Cu_2ZnSnS_4$  Thin Films.” *J. Appl. Phys.* 117: 025706.
- [43] Bhosle, V. and Narayan, J. 2006. “Microstructure and Electrical Properties Correlations in Ga:ZnO Transparent Conducting Thin Films.” *J. Appl. Phys.* 100: 093519.
- [44] Nistor, M. Gherendi, F. Mandache, N.B. Hebert, C. Perriere, J. and Seiler, W. 2009. “Metel-Semiconductor Transition in Epitaxial ZnO Thin Films.” *J. Appl. Phys.* 106, 103710.

- [45] Aksoy, S. and Caglar, Y. 2012. "Effect of Ambient Temperature on Electrical Properties of Nanostructure n-ZnO/p-Si Heterojunction Diode." *Superlattices and Microstructures*. 51, 613-625.
- [46] Jasenek, A. and Rau, U. 2002. "Defect Generation in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Heterojunction Solar Cells by High-Energy Electron and Photon Irradiation." *J. Appl. Phys.* 90: 650-658.
- [47] Sze, S.M. and Kwok, K.Ng. 2007. "**Physics of Semiconductor Devices**", 3<sup>rd</sup> Ed., John Wiley & Sons, New York.
- [48] Gupta, G.K. Garg, A. and Dixit, A. 2018. "Electrical Impedance Spectroscopy Analysis of Sol-Gel Derived spin Coated Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Solar Cell" *J. Appl. Phys.* 123 :013101-1-013101-10.
- [49] Walter, T. Herberholz, R. Muller, C. and Shock, H.W. 1996. "Determination of Defect Distributions from Admittance Measurements and Application to Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Based Heterojunctions." *J. Appl. Phys.* 80: 4411-4420.
- [50] Brandt, I.S. Tumelero, M.A. Martins, C.A. PláCid, C.C. Faccio, R. and Pasa, A.A. 2018. Defects Controlling Electrical and Optical Properties of Electrodeposited Bi doped Cu<sub>2</sub>O. *J. Appl. Phys.* 123:16, 161412.
- [51] Bicaccari, F. 2009. "Defects and Doping in Cu<sub>2</sub>O" **Ph.D. Thesis of University of Rome.**
- [52] Lee, C.S. Kim, S. Shiny, Y.M. Park, B.G. Ahn, T. and Kwon, H.S. 2014. "Performance Improvement in Cd-Free Cu(In,Ge)Se<sub>2</sub> Solar Cell by Modifying the Electronic Structure of the ZnMgO Buffer Layer" *RSC Adv.* 4:36784-36790.
- [53] Nadenau, V. Rau, U. Jasenek, A. and Schock, H.W. 2000. "Electronic Properties of CuGeSe<sub>2</sub>-Based Heterojunction Solar Cells. Part I. Transport Analysis." *J. Appl. Phys.* 87:584-592.

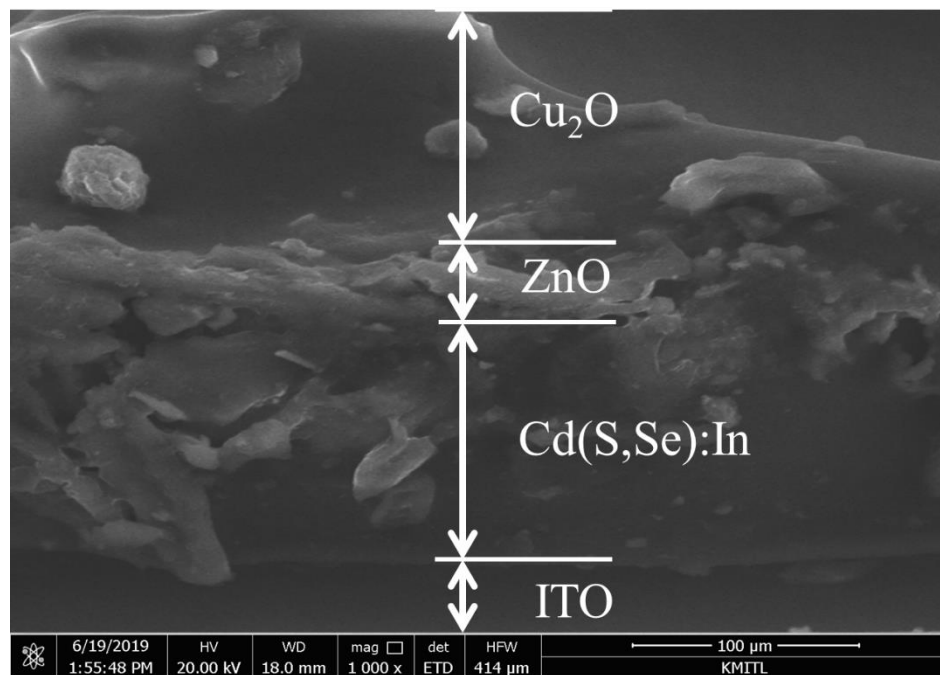
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

Pattern : 77-2307		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd Se		<b>2th</b>	<b>l</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Cadmium Selenide		23.882	100	1	0	0
		25.391	59	0	0	2
		27.097	76	1	0	1
		35.136	34	1	0	2
		41.999	72	1	1	0
		45.810	68	1	0	3
		48.888	11	2	0	0
		49.718	42	1	1	2
		50.699	10	2	0	1
		52.150	1	0	0	4
		55.879	7	2	0	2
		58.130	1	1	0	4
		63.884	19	2	0	3
		66.379	13	2	1	0
		67.880	7	2	1	1
		69.099	1	1	1	4
		71.902	13	1	0	5
		72.296	5	2	1	2
		74.268	<1	2	0	4
		76.735	7	3	0	0
		79.435	17	2	1	3
		82.365	6	3	0	2
		82.496	2	0	0	6
		86.916	6	2	0	5
		87.422	1	1	0	6
		89.181	<1	2	1	4
<b>Lattice</b> : Hexagonal <b>S.G.</b> : P63mc (186) <b>a</b> = 4.29900 <b>c</b> = 7.01000 <b>Z</b> = 2		<b>Mol. weight</b> = 191.37 <b>Volume [CD]</b> = 112.20 <b>Dx</b> = 5.665 <b>l/cor</b> = 5.78				
ICSD COLLECTION CODE : 060630 REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakinos, Steveno REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982,35 415 424. 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 530, (1984) : Stevenson, A.W., Barnea, Z.						
<b>Radiation</b> : CuK $\alpha$ 1 <b>Lambda</b> : 1.54060		<b>Filter</b> : Not specified <b>d-sp</b> : Calculated spacings				

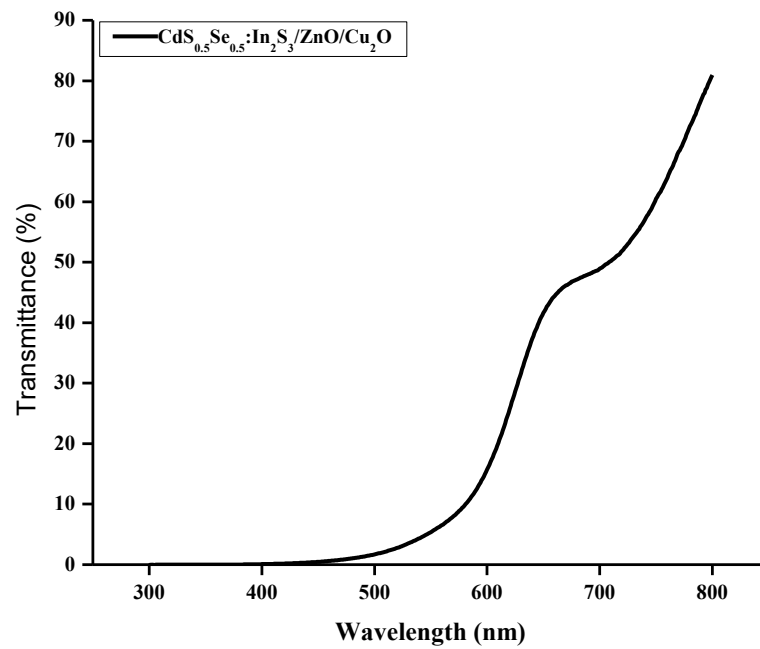


แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของไดโอดชนิดรอยต่ออวิจรพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

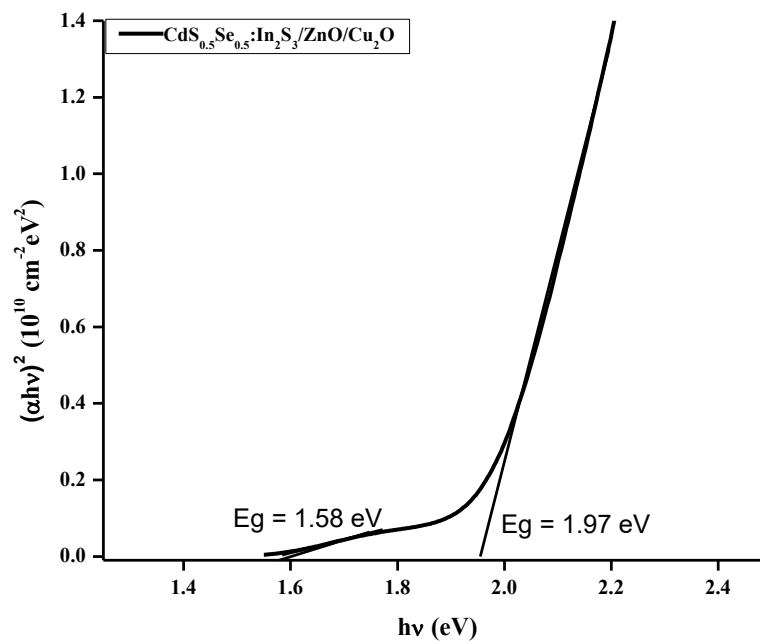


แสดงภาพถ่าย SEM แบบภาพตัดขวางของไดโอดชนิดรอยต่ออวิจรพันธ์  $\text{CdS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}:\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$

## ภาคผนวก ค



แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  
CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>:In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/ZnO/Cu<sub>2</sub>O



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์  
CdS<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>:In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/ZnO/Cu<sub>2</sub>O

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย มন্ত্রী หาญไก่อ๋ย
วัน เดือน ปีเกิด	30 พฤศจิกายน 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 102 หมู่ที่ 8 ต.สีดา อ.สีดา จ.นครราชสีมา 30430
การศึกษา	ปี พ.ศ. 2555 จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสีดาวิทยา ปี พ.ศ. 2556 เข้ารับการศึกษาในระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2560 เข้ารับการศึกษาในระดับอุดมศึกษา ปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานวิชาการ	Influence of Stoichiometric composition on Structural, Optical and Electrical Properties of $\text{In}_2\text{S}_3$ -doped $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation Method.