

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์
แสงอาทิตย์

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ THIN FILMS FOR
SOLAR CELL APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2563

KMITL-2020-SC-M-030-024

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์
แสงอาทิตย์

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ THIN FILMS FOR
SOLAR CELL APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

KMITL-2020-SC-M-030-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ THIN FILMS FOR
SOLAR CELL APPLICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2020
KMITL-2020-SC-M-030-024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปาริชาติ คำหมอน
รหัสประจำตัว	61605080
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสารละลายของแข็งแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก และปรากฏระนาบ (400) เป็นระนาบที่โดดเด่น ทำการศึกษาบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตรวจสอบองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}/\text{ZnO}/\text{SnS}$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ FTO โดยมีชั้นบัฟเฟอร์ ZnO คั่นระหว่างฟิล์มบาง CdS กับ SnS และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีและอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด รอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}/\text{ZnO}/\text{SnS}$ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Fabrication and Characterization of $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ Thin Films for Solar Cell Application
Student Name	Miss. Parichat Cummon
Student ID	61605080
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

Abstract

In this thesis, thin films of $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ were fabricated by close spaced sublimation method on glass substrates at a vacuum of 3×10^{-2} mbar. XRD revealed that the all prepared films exhibited single phase with orthorhombic structure with the preferred orientation of (400) plane. The surface morphology and elemental compositions of the films were studied by EDS and XPS, respectively. The optical transmission spectra were investigated by means of UV-Vis-NIR spectroscopy in the range of 400-2000 nm. The optical band gap value of the films increased from 0.95 to 1.18 eV as composition of Se increased from 0 to 1.0. The electrical properties were carried out by resistivity and Hall effect measurements with van der Pauw configuration. Moreover, FTO/CdS/ZnO/ SnS heterojunction thin film diode was fabricated. CdS thin film layer was deposited by chemical bath deposition (CBD) onto FTO layer covered on slide glass then SnS thin film layer was coated by vacuum thermal evaporation method. A ZnO buffer layer was placed between CdS and SnS layers. 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: $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films, Close spaced sublimation, CdS/ZnO/SnS heterjunction, 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 ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน รวมถึงเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดมา

ปาริชาติ คำหมอน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	7
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	8
2.3 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก	9
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	9
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ II และ VI	10
2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	11
2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์	11
2.4.3 โครงสร้างแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์	12
2.4.5 โครงสร้างของสารประกอบ SnS	13
2.4.6 แผนภาพเฟสระบบ Sn-S	15
2.5 ผลึกจริง	18
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	18
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติและแบบเชิงเส้น	20
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	21
2.5.3.1 เกรตและขอบรอยต่อของเกรน	21
2.5.3.2 ผลึกแฝดและขอบรอยต่อของผลึกแฝด	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบผิวดำดับ	22
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	23
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
2.8 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	27
2.8.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	27
2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	28
2.9.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	28
2.9.2 การวัดความต้านทานแผ่นสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาร์	29
2.9.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์	30
2.10 รอยต่อพี-เอ็น	34
2.10.1 บริเวณพร่องพาหะ	34
2.10.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน	34
2.10.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ	39
2.10.2 ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	41
2.10.2.1 สมการของชอว์คส์เลย์ในกรณีอุดมคติ	41
2.10.3 กระบวนการเกิด-การรวมตัวกันของพาหะอิสระ	47
2.10.4 ความจุแพรซีมิ	50
2.11 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์	52
2.11.1 กลไกการรวมตัวกันของพาหะที่บริเวณประจุค้าง	53
2.11.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์	54
2.12 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์	56
2.13 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	58
2.14 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิกอน	60
2.15 กัปเดตักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ	61
2.16 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ	64
2.16.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี	65
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	67
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	70
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)	70
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	71
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	71
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	72
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	73
3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น	73
3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง	73
3.1.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	74
3.1.10 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง	74
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	75
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	75
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	75
3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	76
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	79
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	81
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค	81
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค	81
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	81
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	81
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว	82
3.3.4.2 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์	82
3.3.4.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของ ผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnSe ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	87
4.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ ประชิดภายในระบบสุญญากาศ	89
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	91
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	91
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความ ร้อนในระยะประชิด	95
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ ประชิด	97
4.3.4 ผลการศึกษาสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วย รังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	102
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	102
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	109
4.5.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	109
4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	116
4.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	123
4.5.4 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ันของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	135
4.6 การศึกษาสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	
4.6.1 โครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	137
4.6.2 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตมิชชัน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	138
4.6.3 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง CdS และ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	143
4.6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	154
4.6.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	165
4.6.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องในช่วงความถี่ 70 ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	172
4.6.8 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อการแรงดันไบแอสไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ ที่อุณหภูมิในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	182
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	197
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	199
เอกสารอ้างอิง	200
ภาคผนวก	205
ประวัติผู้เขียน	208

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe และ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธี ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	78
4.1	แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธี ระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	92
4.2	แสดงขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธี ระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	97
4.3	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะ ประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	99
4.4	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์ม บางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่ เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สูญญากาศ	102
4.5	แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดย วิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	108
4.6	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	122

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.7	แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลากการระเหิด 10 นาที	129
4.8	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอดด์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลากการระเหิด 10 นาที	132
4.9	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชโลฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลากการระเหิด 10 นาที	135
4.10	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, SnS และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	142
4.11	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	146
4.12	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	152
4.13	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.14	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตวย้อนกลับ ค่าפקเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	159
4.15	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพูล-แฟรงเคิล β_{PF} และค่าไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ ϵ_r ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกพูล-แฟรงเคิลแบบปรับปรุงใหม่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	164
4.16	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	169
4.17	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS	177
4.18	แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด G_{max}/ω ที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด C_m ความจุบริเวณชั้นออกไซด์ C_{ox} และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	181
4.19	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	187
4.20	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	189
4.21	ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	193

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	7
2.2	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ	9
2.3	แสดงพันธะสีหน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	10
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	11
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	12
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์	13
2.7	แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS ₂ และ Sn ₂ S ₃ โดยที่อะตอมดีบุกและอะตอมซัลเฟอร์จะแสดงด้วยอะตอมใหญ่และอะตอมเล็กตามลำดับ	14
2.8	แสดงโครงสร้างของผลึกทินซัลไฟด์	15
2.9	แผนภูมิเฟสของระบบของสารประกอบ Sn-S	16
2.10	แผนภาพเฟสของระบบ Sn-S ที่ความดันบรรยากาศ สำหรับ (a) รูปแบบของเศษส่วนโดยโมลของซัลเฟอร์ และ (b) ที่ซัลเฟอร์ 45-75% และ 550-900 °C	16
2.11	ไดอะแกรมเฟสของระบบ Sn-S ที่ (a) 1 bar, (b) 1 mbar และ (c) 10 ⁻³ mbar โดยที่ L และ G เป็นตัวแทนของสถานะของเหลวและก๊าซตามลำดับ	17
2.12	การสะสมของดีบุกซัลไฟด์ ของปริมาณกำมะถัน	17
2.13 ก.	ผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่	19
2.13 ข.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่	19
2.13 ค.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก	19
2.13 ง.	ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่	19
2.14	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอตตึกและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล	20
2.15	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	20
2.16	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	21
2.17	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด	21
2.18	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	22
2.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2-V$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	23
2.21	แสดงวิธีการหา β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	25
2.22	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
2.23	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	27
2.24	แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	29
2.25	แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	31
2.26 ก.	แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)	35
2.26 ข.	แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า	35
2.26 ค.	แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน การกระจายของศักย์ไฟฟ้า โดยที่ ψ_{bi} เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ	35
2.26 ง.	แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน โครงสร้างแถบพลังงาน	35
2.27	แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะและความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ $(\psi_{bi} - V - 2kT/q)$ สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉับพลันในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์ ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติกราฟเชิงเส้น	39
2.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2-V$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	41
2.29 ก.	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข โบแอสตรง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.29 ข.	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กทรอนิกส์และโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง	43
2.30 ก.	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กทรอนิกส์และโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขไบแอสตรง	45
2.30 ข.	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กทรอนิกส์และโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง	45
2.31 ก.	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติกราฟเชิงเส้น	46
2.31 ข.	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติกราฟกึ่งลอการิทึม	46
2.32	ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน	48
2.33	แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพรซีม และความนำแพรซีมที่สัมพันธ์กับ $\omega \tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง	52
2.34	แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ	53
2.35 ก.	แสดงกลไกผลของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย รอยต่ออยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	54
2.35 ข.	แสดงกลไกผลของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย รอยต่อไม่อยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน	54
2.36	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนิลและเมื่อผ่านการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ CdCl_2	56
2.37 ก.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุลเมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$) กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	59
2.37 ข.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุลเมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$) กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	59
2.38 ก.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิดบริเวณซุนนุมาพาหะ	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.38 ข.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิดบริเวณขุมอนุพาหะ	60
2.38 ค.	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิดบริเวณชั้นกลับกลาย	60
2.39	แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	61
2.40	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	62
2.41 ก.	แสดงวงจรมุมที่มี C_{it} และ R_{it} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย	63
2.41 ข.	แสดงวงจรมุมที่มี C_{it} และ R_{it} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย	63
2.41 ค.	แสดงวงจรมุมในช่วงความถี่ต่ำ	63
2.41 ง.	แสดงวงจรมุมในช่วงความถี่สูง	63
2.42 ก.	แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุ กับแรงดันของรอยต่อ MIS	64
2.42 ข.	แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s	64
2.43	แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้า เทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	67
2.44	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS/ SnS/ SnS ₂ / SnS และ ZnO/ SnS	67
2.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง CdS/ SnS/ SnS ₂ /SnS และ ZnO/ SnS	68
2.46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิธี พันธของ FTO/CdS/SnS, FTO/SnS ₂ /SnS และ FTO/ZnO/SnS ขณะไม่ฉายแสง	68
2.47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิธี พันธของ FTO/CdS/SnS, FTO/SnS ₂ /SnS และ FTO/ZnO/SnS ขณะฉายแสง	69
3.1	แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	71
3.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	เครื่องยูวี-วีไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750	72
3.4	ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	73
3.5	ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	73
3.6	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	74
3.7	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง	74
3.8	แสดงผลผลิตของสารตั้งต้น $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้ง แบบที่ปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายรูป	78
3.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	80
3.10	แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	80
3.11	แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	82
3.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของสารกึ่งตัวนำ	83
3.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของสารกึ่งตัวนำ	84
3.14	แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	85
3.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของสารกึ่งตัวนำ	86
4.1	แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผลผลิตของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	88
4.2	แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผลผลิตของสารกึ่งตัวนำ SnSe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	แสดงผลผลิตของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	90
4.4	แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	90
4.5	แสดงพิคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	91
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a , b และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	94
4.7	แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	96
4.8	แสดงสเปกตรัม EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	98
4.9	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	100
4.10	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 485-495 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 160-163 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	101
4.12	แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 53-55 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	101
4.13	แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	103
4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.0$	103
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.2$	104
4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.4$	104
4.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.6$	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.8$	105
4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$ (ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง)	106
4.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$ (ช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียง)	106
4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ X เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0	107
4.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	108
4.23	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	110
4.24	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	111
4.26	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	111
4.27	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	112
4.28	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	112
4.29	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	113
4.30	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	113
4.31	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	114
4.32	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	114
4.33	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.34	แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	115
4.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	116
4.36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	116
4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	117
4.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	117
4.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	118
4.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	118
4.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	119
4.42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	120
4.44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	120
4.45	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	121
4.46	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	121
4.47	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	122
4.48	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\ln \sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right)$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	136
การศึกษาสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS		
4.1 ก.	แสดงแผนทางของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	137
4.1 ข.	แสดงภาพถ่ายของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	137
4.2	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, SnS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดิบบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	138
4.3 ก.	แสดงสเปกตรัม XPS ของค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์	139
4.3 ข.	แสดงสเปกตรัม XPS ของค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์	139
4.4	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์	139
4.5	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบาง SnS ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์	140
4.6	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบาง ZnO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์	140
4.7	แสดงสเปกตรัม XPS ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดิบบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	141
4.8	แสดงค่า ΔE_{VBO} และ ΔE_{CBO} ของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/SnS	143
4.9 ก.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก	143

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9 ข.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I)	143
4.10 ก.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก	144
4.10 ข.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I)	144
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	145
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(I)$ กับค่า $\ln V$ ที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	146
4.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(I)$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า V ที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	147
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับค่า I ที่อธิบายวิธีของช่วงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	148
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I โดยวิธีของช่วงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	148
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า $V(V)$ โดยวิธีของนอร์ดเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	148
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และขณะไม่มีการฉายแสง	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	แสดงการหาค่า R_s และ R_{sh} ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับ V ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และขณะไม่มีการฉายแสง	153
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{-1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	153
4.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	155
4.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	156
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(I)$ กับค่า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	157
4.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	157
4.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	158
4.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	158
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	159
4.27	แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับ อุณหภูมิ ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	160
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	161
4.30	แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n(\ln J_s)$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	162
4.31	แสดงแผนภาพกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (TE) กลไกเทอร์มิออนิกฟิลด์อิมิสชัน (TFE) และกลไกฟิลด์อิมิสชัน (FE) ที่บริเวณรอยต่อขอตติ์ภายใต้ไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ	163
4.32	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	164
4.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β_{py} และ ϵ_r กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS	165
4.34	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิต้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/ZnO/SnS	165
4.35	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิต้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/ZnO/SnS	165
4.36	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิต้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/ZnO/SnS	167
4.37	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิต้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/ZnO/SnS	167

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.38	แสดงวงจรมูลของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS	168
4.39	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่วัดได้กับค่าทางทฤษฎีของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS ที่แรงดันไบแอส 0.2 โวลต์	168
4.40	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ C_1 และ C_2 และค่าความจุของกัปดักพาหะ (C_d) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS	170
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้นที่ R_1 และ R_2 และค่าความต้านทานชั้นของกัปดักพาหะ (R_d) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS	171
4.42	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา τ_1 และ τ_2 และค่าคงตัวของเวลาของกัปดักพาหะ (τ_d) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS	171
4.43	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะ (N_d) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS	172
4.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds /ZnO/SnS	173
4.45	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds /ZnO/SnS	173
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ Cds/ZnO/SnS	174

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.47	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS	174
4.48	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /ZnO/SnS	175
4.49	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W_D กับ ϕ_b กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่อัตราส่วนโดยโมลละต่อมเท่ากับ $x = 0.0$	177
4.50	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_D กับ ψ_s กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS	178
4.51	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /ZnO/SnS	178
4.52	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /ZnO/SnS	179
4.53	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{OX} กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /ZnO/SnS	179
4.54	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{OX} กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /ZnO/SnS ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์โวลต์ ค่าความหนาของชั้น ZnO	180

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.55	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_S กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS	181
4.56	แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง D_{ff} กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS	182
4.57	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	183
4.58	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	184
4.59	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	184
4.60	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS	185
4.61	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	185
4.62	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	186
4.63	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ C_1 และ C_2 และค่าความจุของกัปดักพาหะ (C_r) ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	188
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้นที่ R_1 และ R_2 และค่าความต้านทานชั้นของกัปดักพาหะ (R_r) ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	188

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา τ_1 และ τ_2 และค่าคงตัวของเวลาของ กัปดักพาหะ (τ_c) ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	189
4.66	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา $\ln \tau_c$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	190
4.67	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะ (N_t) ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส	191
4.68	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln\omega$ กับความถี่ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	191
4.69	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่ได้จากการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln\omega$ กับความถี่	192
4.70	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่ได้จากรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'-Z''$	193
4.71	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_t กับพลังงาน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS	194
4.72	แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่สภาวะสมดุลความร้อนและไม่มีการไบแอส	196

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องทะนุบำรุงมาก สามารถติดตั้งร่วมกับอาคารบ้านเรือนและสำนักงานได้ง่าย แต่อุปสรรคสำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือวัตถุดิบหลักที่ใช้อยู่ยังมีราคาสูงอยู่มาก จนถึงปัจจุบันผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Si) ยังคงเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ซิลิคอนมีสมบัติการดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลดต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

งานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe₂ โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 16.5 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ [1] แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ In และ Ga ล้วนเป็นธาตุที่หายาก มีราคาแพง ส่วนธาตุ Cd เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอร์ราวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ยังเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น ดังนั้นจึงมีการวิจัยเพื่อค้นคว้าหาวัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่าเดิม

สารกึ่งตัวนำ SnS เป็นหนึ่งในสารประกอบซัลไฟด์ที่มีความโดดเด่นเช่นเดียวกับ CdTe และ CuInGaSe₂ เนื่องจากธาตุดีบุกและซัลเฟอร์หาได้ง่าย มีมากในธรรมชาติ ราคาไม่แพง สารประกอบ SnS มีเสถียรภาพสูง โครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งขนาดของช่องว่างแถบพลังงานดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ซอกเลย์และควออิสเซอร์ [2] ได้ทำนายไว้ว่าสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ [3] ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีสมบัติการดูดกลืนแสงสูงกว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe₂ [4] และมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

จากแผนภาพเฟสระหว่าง Sn-S [5] สามารถเกิดสารประกอบที่เสถียรได้ 3 แบบคือ SnS, SnS₂ และ Sn₂S₃ สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เรียกว่าเฟส α -SnS มีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น Pnma ไอออน Sn²⁺ จะสร้างพันธะกับไอออน S²⁻ จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5s² ของอะตอมของธาตุ Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออน Sn^{2+} กับไอออน S^{2-} จะมีรูปทรงเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) อะตอมของ Sn กับอะตอมของ S จะสร้างพันธะต่อกัน กลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals) ส่วนกลุ่มปริภูมิอื่นๆ ของสารประกอบ SnS ที่รู้จักกันดี ได้แก่ $Fm3m$, $Cmcm$ และ $F43m$ จะสัมพันธ์กับเฟสรีออคซอลด์ เฟสออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิสูง (เรียกว่าเฟส $\beta\text{-SnS}$) และเฟสซิงเกิลตันด์ตามลำดับ [6]

ในทำนองเดียวกัน สารกึ่งตัวนำ SnSe ก็มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 520 องศาเซลเซียส มีกลุ่มปริภูมิเป็น $Pnma$ เรียกว่า เฟส $\alpha\text{-SnSe}$ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 520 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็นเฟส $\beta\text{-SnSe}$ ซึ่งมีกลุ่มปริภูมิเป็น $Cmcm$ [7] ช่องว่างแถบพลังงานมีทั้งแบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) มีค่าประมาณ 1.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นเราสามารถที่จะปรับแต่งสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ได้โดยการปรับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของสารละลายของแข็งของสารประกอบ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นหลากหลายรูปแบบ เช่น CdS/SnS , ZnS/SnS , ZnO/SnS , SnS_2/SnS , TiO_2/SnS , SnS/Si เป็นต้น [8] ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง ZnO/SnS เท่ากับ 4.63 % [9] แต่จากการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ชั้นเดียว (single heterojunction) ของฟิล์มบาง ZnO/SnS , CdS/SnS และ Si/SnS สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 17.03, 16.26 และ 14.30% ตามลำดับ [10] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโอกาสของการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ SnS นี้ยังสามารถที่จะวิจัยและพัฒนาต่อไปได้อีกมาก

การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถเตรียมได้จากหลากหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) [11] วิธีอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) [12] วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี [13] วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) [14] วิธีสปัตเตอริง วิธีซัลโฟโรเซชันจากฟิล์มบางดีบุก [15] และวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด [16] เป็นต้น

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศมีข้อดีหลายประการคือ อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางไม่มีความซับซ้อนมากนัก สามารถประกอบและติดตั้งขึ้นมาใช้เองได้ ใช้ระดับสุญญากาศไม่ต่ำนัก ดังนั้นต้นทุนค่อนข้างต่ำ เวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางค่อนข้างสั้น เป็นการประหยัดเวลา ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางไม่สูงนัก ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ให้เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากนั้นจะทำการศึกษา โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ศึกษาสมบัติทางแสง และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ อีกทั้งยังทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับกับดักพาหะซึ่งเป็นผลมาจากข้อบกพร่องผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS /ZnO /SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้องที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิ เพื่อคำนวณหาปริมาณของสถานะผิวเชื่อมต่อที่ปรากฏอยู่ใน บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธ์ดังกล่าวข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ และขนาดของเกรน
4. เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพื่อวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวด้วย เทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)
6. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)
7. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสง และนำผลการทดลองไปคำนวณหาค่าชีวิตของพาหะของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)
8. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง
9. เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน
10. เพื่อทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อแบบวีวีพีเอ็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/SnS เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
11. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แล้วนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี และสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและสูงกว่าอุณหภูมิห้องในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และ 190-300 เคลวิน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ FTO/CdS/SnS จากนั้นจึงนำเอาสิ่งประดิษฐ์ไปทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเงื่อนไขต่างๆสำหรับการทำฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดจากฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัย
2. เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
3. ตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ได้ต่อไปนี้
 - ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
 - ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและองค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS
 - ตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี
 - ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน
4. ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS ที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS ที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ
5. ทดสอบการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโดยการวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด
6. วิเคราะห์และสรุปผล
7. เขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ SnS , SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
3. มีความรู้ความเข้าใจสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) รวมถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้
4. ทราบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS ว่ามีสมบัติความเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีมากน้อยเพียงใด
5. ทราบถึงหลักการงานและวิธีการใช้อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิจัยเพื่อตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น
6. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการทำวิจัย เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

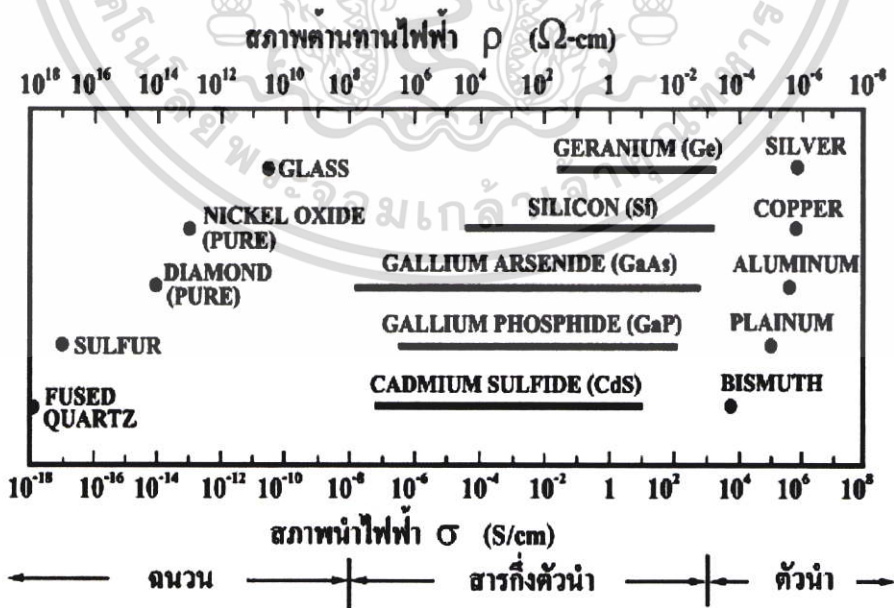
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการที่ใช้ในการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) [17-20]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

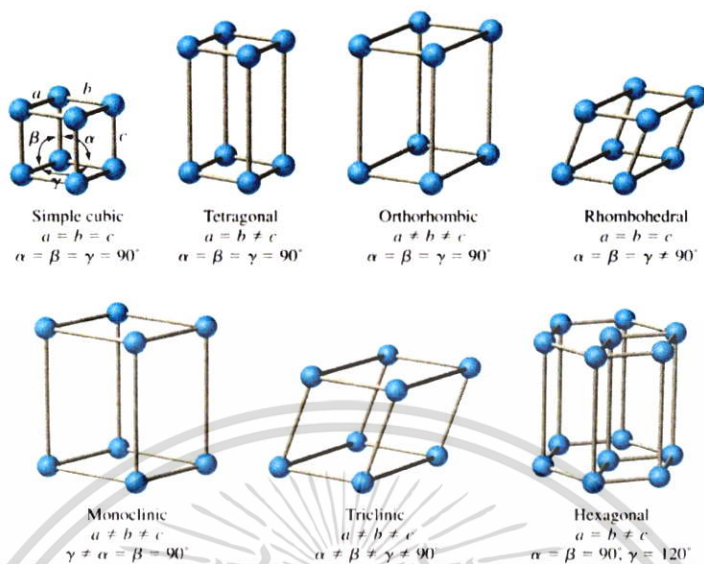
และนอกจากนี้สารกึ่งตัวนำยังมีสมบัติที่แตกต่างจากสารอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

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

2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [17-30]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้น ๆ มารวมกันอยู่กันเป็นจำนวนมากโดยที่ระยะห่างระหว่างอะตอมที่มีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนและเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก ทั้งนี้อาจจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายอะตอม ๆ อะตอมหรือหลาย ๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่จะสามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้านำหน่วยเซลล์นี้มาทำการเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียงตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบที่ระบบสามมิติว่า โครงสร้างผลึกหรือแลตทิส (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเซลล์ที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงสร้างผลึก 3 มิติดังรูปที่ 2.2 ในระบบสามมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a b และ c และมุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสาม ชนิดของโคลงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีอยู่ 7 รูปแบบ คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนัล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รวมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ

2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [17-30]

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 “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบ หรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกัดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
- 3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
- 3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

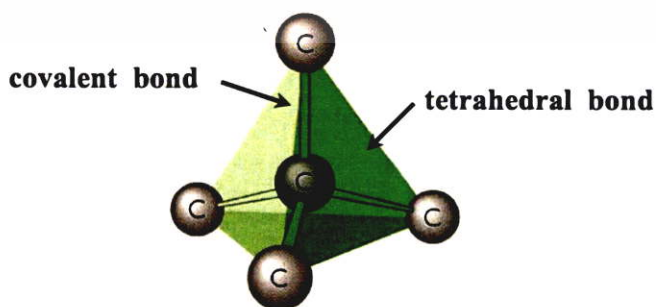
สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hkil) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

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

2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI [17-20, 24-30]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างแต่ละอะตอม 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) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ (wurtzite structure)

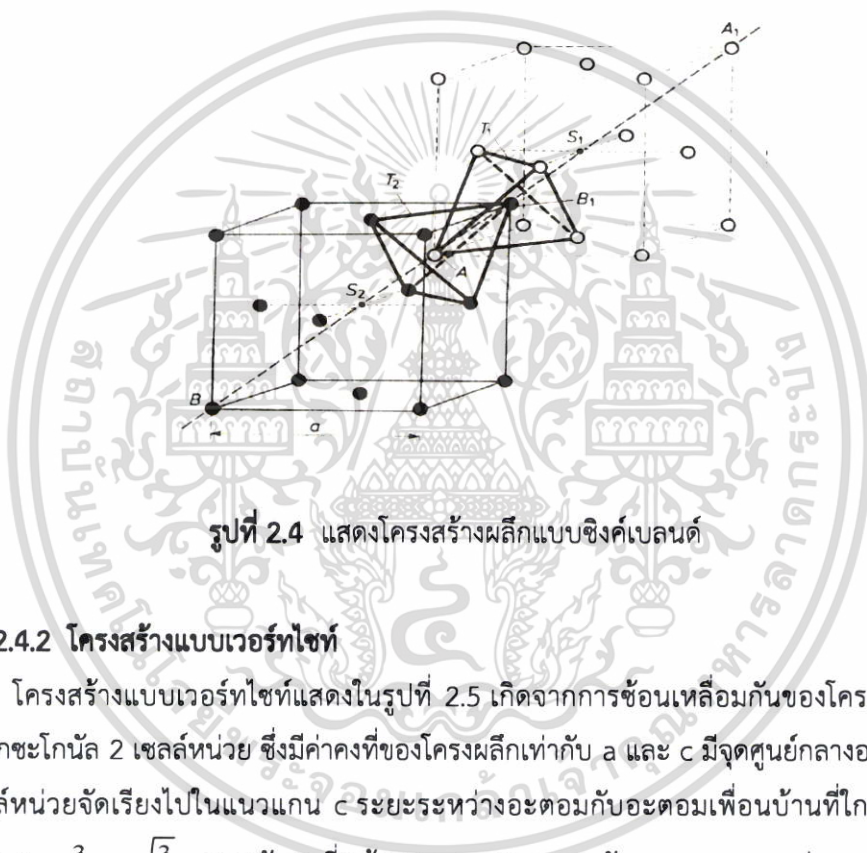


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

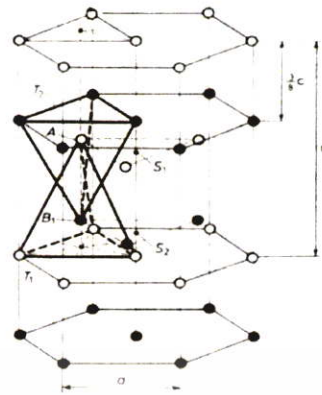
โครงสร้างซิงค์เบลนด์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4} AA_1 = \frac{1}{4} BB_1$ ฐานของพื้นที่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60° องศารอบแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์แสดงในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 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



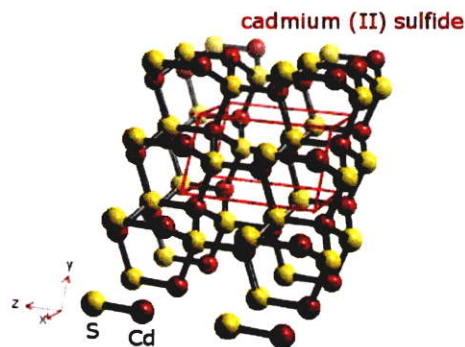
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์

2.4.3 โครงสร้างของแคดเมียมซัลไฟด์

โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกอยู่ 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) แต่จะต่างกันว่าโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง $0,0,0$ และ $\frac{1}{4},\frac{1}{4},\frac{1}{4}$ ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จะเกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟสเซนเตอร์คิวบิกที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S ตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



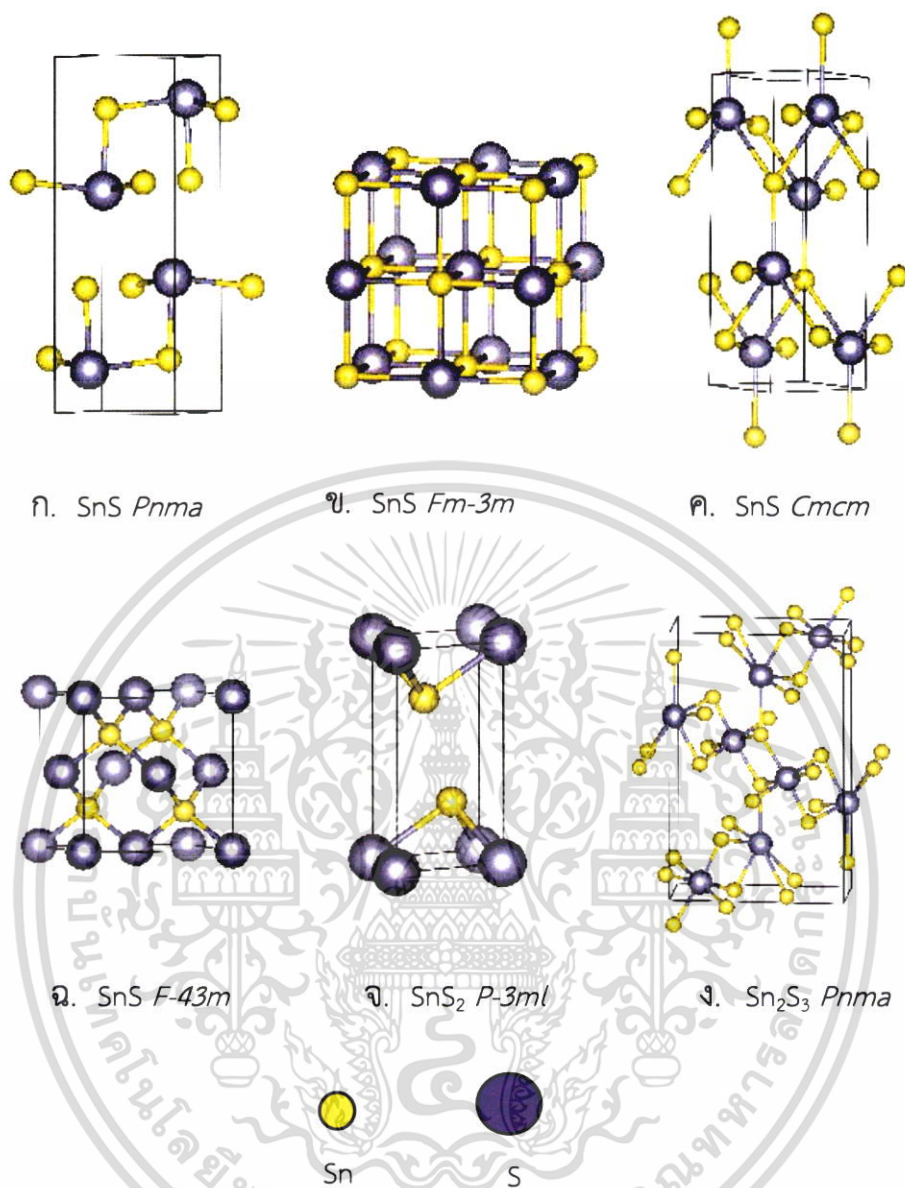
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์

2.4.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS

สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิกมีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น $pnma$ ไอออนของธาตุ Sn^{2+} จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน $5s^2$ ของอะตอมของธาตุ Sn จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออนของธาตุ Sn^{2+} กับไอออนของธาตุ S^{2-} จะมีรูปทรงเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์จะแสดงดังตารางที่ 2.4 อะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S จะสร้างพันธะต่อกันหนึ่งพันธะกลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 เฟสอื่นๆของสารประกอบ SnS ที่เกิดขึ้นได้อีก เช่น เฟสรีคซอลต์ (rocksalts) เฟสออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ เป็นต้น

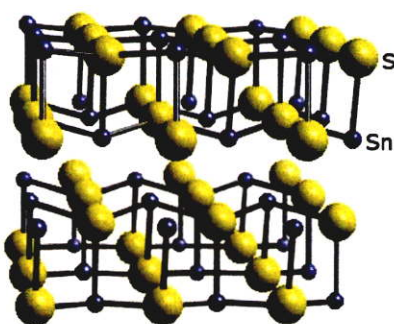
โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS จะแสดงดังรูปที่ 2.7 สารประกอบ SnS_2 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ไอออนของธาตุ Sn^{4+} แต่ละไอออนจะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีชั้นบางๆ ของสารประกอบ SnS_2 จำนวน 3 ชั้น การจัดเรียงอะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกได้หลากหลาย (polytype) เช่น มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนัล และมีกลุ่มปริภูมิเป็นแบบ $Pnma$ ไอออนของธาตุ Sn^{4+} จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล แต่ละออกตะฮีดรัล จะเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของสารประกอบ Sn_2S_3 โดยไอออนของธาตุ Sn^{4+} จะอยู่ในแกนกลางของสายโซ่ ส่วนไอออนของธาตุ Sn^{2+} จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 6 ไอออน แต่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นแบบไตรโกนัลปิรามิด (trigonal-pyramidal geometry) ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษคือมีรูปร่างเป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยมสองรูปที่เอายอดปลายแหลมเชื่อมต่อกัน ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ SnS ทั้งที่ได้จากการทดลอง ส่วนกลุ่มปริภูมิของสารประกอบ SnS ที่รู้จักกันดี ได้แก่ $Pnma$, $Fm3m$, $Cmcm$, $F43m$ จะสัมพันธ์กับเฟสออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิต่ำ, ร็อคซอลต์, ออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS₂ และ Sn₂S₃ โดยที่อะตอมดีบุกและอะตอมซัลเฟอร์จะแสดงด้วยอะตอมใหญ่และอะตอมเล็กตามลำดับ

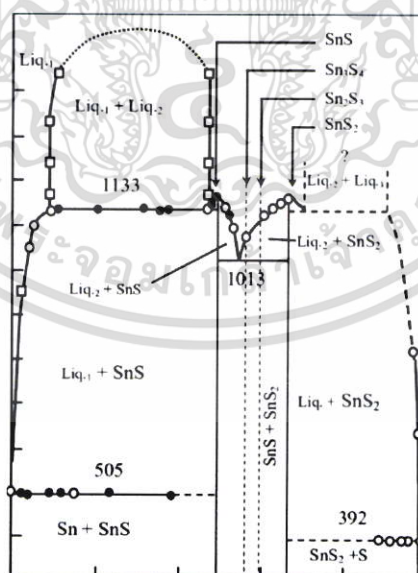
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของผลึกทินซัลไฟด์

2.4.6 แผนภาพเฟสของระบบ Sn-S

จากแผนภาพเฟสของ Sn-S ดังรูปที่ 1 พบว่าสารประกอบ SnS กับ SnS₂ มีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวระบุได้แน่ชัด (congruent melting point) ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่ความดันปกติ จุดหลอมเหลวของสารประกอบ SnS จะอยู่ที่อุณหภูมิ 1153 เคลวิน ส่วนจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1503 เคลวิน สารประกอบ SnS สามารถที่จะเปลี่ยนจากเฟสอุณหภูมิต่ำ (α -SnS) กลุ่มปริภูมิ Pnma ไปเป็นอุณหภูมิสูง (β -SnS) [5] กลุ่มปริภูมิ Cmcmm ได้การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวเกิดการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Sn และ S ในแนวแกนผลึก [100]

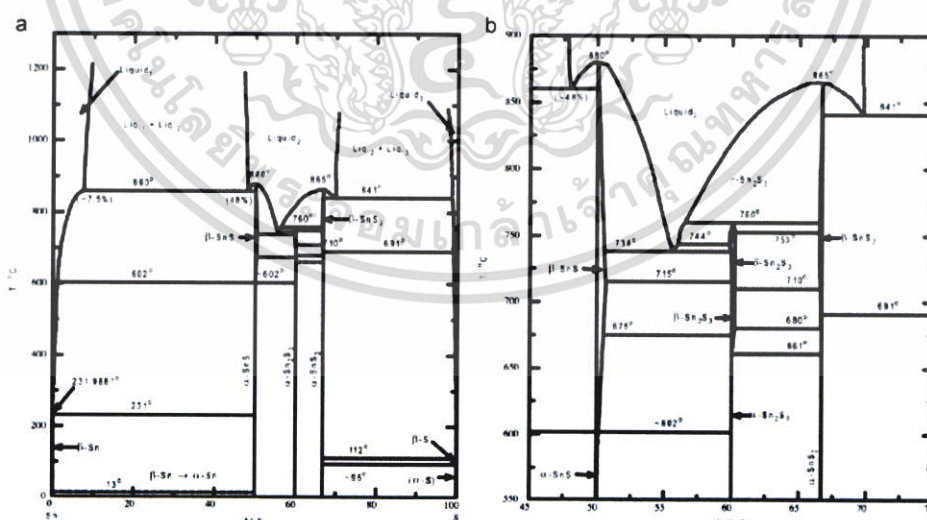


รูปที่ 2.9 แผนภูมิเฟสของระบบของสารประกอบ Sn-S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ SnS_2 มีสีเหลืองทองแวววาวค่อนข้างนิ่ม สามารถทำเป็นแผ่นทองคำเปลวได้ สารประกอบ SnS_2 เสถียรที่อุณหภูมิห้องในบรรยากาศปกติ ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายในสารละลายซัลเฟอร์ของโลหะอัลคาไล (Sulphur solution of alkali metals) และแอมโมเนียซัลเฟต แต่เมื่อเผาในอากาศของสารประกอบ SnS_2 จะกลายเป็นสารประกอบ SnS จะกลายเป็นสารประกอบ SnO_2 ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารประกอบ SnS_2 จะเป็นชนิดเอ็นซึ่งต่างจากสารประกอบ SnS ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี

มีนักวิจัยบางคณะยืนยันว่าเฟสของสารประกอบ Sn_2S_3 และ Sn_3S_4 สามารถเกิดขึ้นได้ ดังแสดงในแผนภาพเฟสในรูปที่ 2.9 สำหรับทางซีกซ้ายมือของแผนภาพเฟสจะแสดงชั้นของโดเมนจำนวน 3 ชั้น ซึ่งอยู่ในช่วง 10-40 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุ S เส้นโมนอเทคติก (monotectic horizontal line) จะอุณหภูมิ 1133 เคลวิน ส่วนด้านบนสุดของโดเมนที่ 3 จะอยู่ที่อุณหภูมิ 1523 เคลวิน สำหรับโดเมนที่ 2 สารประกอบของเหลวจะอยู่ในช่วง 70-90 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุ S จุดยูเทคติก (eutectic) ระหว่างสารประกอบ SnS และ SnS_2 จะอยู่ที่ 55 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของ S และจุดหลอมเหลวจะอยู่ที่ 1013 เคลวิน จากแผนภาพเฟสจะเห็นได้ชัดเจนว่าสารประกอบ SnS ไม่เป็นไปตามสโตยเคมิเมตรีย่างแท้จริง เนื่องจากสารประกอบนี้สามารถมีอะตอมของธาตุ S ส่วนเกินได้ถึง 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม แสดงว่าอัตราส่วนของอะตอมของธาตุ Sn กับ S จะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งเล็กน้อย นั่นคือแวนแคนซี V_{Sn} จะเกิดขึ้นเสมอ ส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี [6]

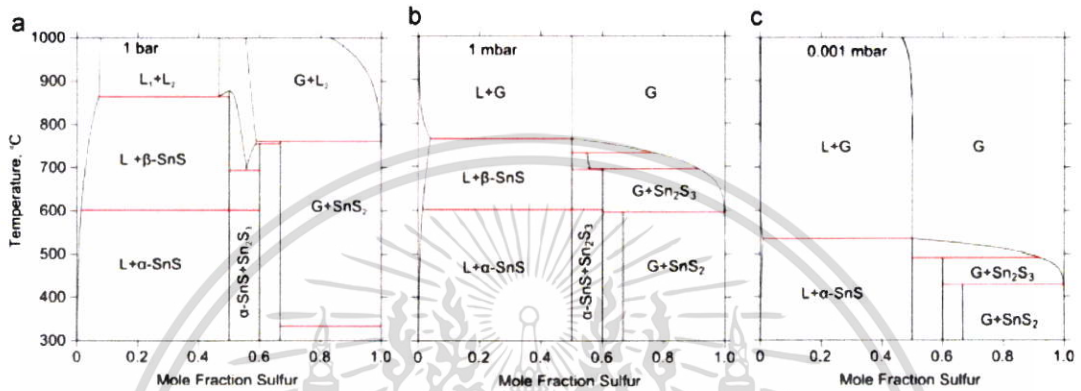


รูปที่ 2.10 แผนภาพเฟสของระบบ Sn-S ที่ความดันบรรยากาศ สำหรับ (a) รูปแบบของเศษส่วนโดยโมลของซัลเฟอร์ และ (b) ที่ซัลเฟอร์ 45-75% และ 550-900 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

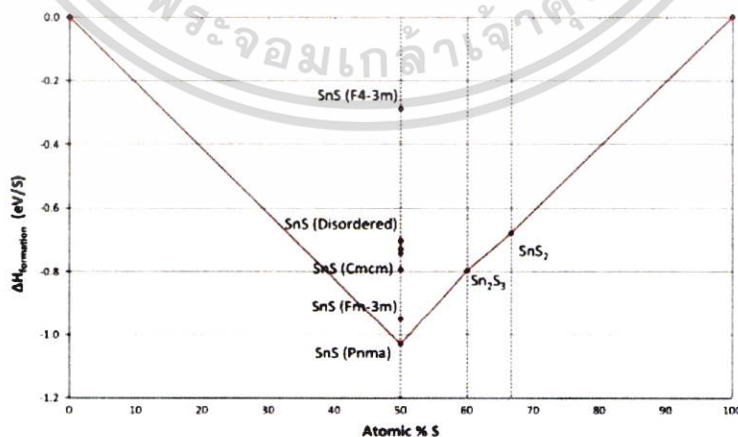
รูปที่ 2.10 แสดง ไดอะแกรมที่มีความซับซ้อนของระบบ Sn-S ที่ความดันบรรยากาศ ใช้เทคนิคการสะสมสุญญากาศ (vacuum deposition techniques) และกระบวนการหลอมเฟส ไดอะแกรมมีการให้คำแนะนำเล็กน้อยสำหรับการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม และความดันกัมมะถันบางส่วน

เฟสไดอะแกรมที่ใหม่กว่านั้น ได้รับการพัฒนาโดยเทคนิค CALPHAD (การคำนวณเฟสไดอะแกรม) [7]



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมเฟสของระบบ Sn-S ที่ (a) 1 bar, (b) 1 mbar และ (c) 10^{-3} mbar โดยที่ L และ G เป็นตัวแทนของสถานะของเหลวและก๊าซตามลำดับ

การตรวจสอบเฟสไดอะแกรมเหล่านี้ ด้วยระบบ Sn-S ที่ความดันต่างๆรวมถึงอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับกระบวนการสุญญากาศ แผนภาพเฟสแสดง ที่ความดันต่ำจะมีการเปลี่ยนเฟสง่ายกว่าที่ความดันสูง การเปลี่ยนเฟสยังเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดแรงกดดัน ตัวอย่างของแผนภาพเฟสที่คำนวณได้จะแสดงในรูปที่ 2.11 ความดันต่ำ แผนภาพเฟสจะซับซ้อนน้อยลง โดยมีเฟสและการเปลี่ยนเฟสน้อยลง



รูปที่ 2.12 การสะสมของดิบุกซัลไฟด์ ของปริมาณกัมมะถัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเอนทัลปีของการก่อตัว (H_f) ของเฟสดีบุกซัลไฟด์หลายๆเฟส เพื่อกำหนดเสถียรภาพของเฟสสัมพัทธ์ จากการคำนวณ $\alpha\text{-SnS}$ มีค่า H_f ต่ำสุดและ rock salt ของ SnS มีค่ามากกว่าเล็กน้อย $\beta\text{-SnS}$ มีค่า H_f สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ $\alpha\text{-SnS}$ ที่สามารถเปรียบเทียบกับ Sn_2S_3 [6] ดังแสดงในรูปที่ 4

สำหรับดีบุกซัลไฟด์ที่เกิด ไกลจากวิธีสมดุล (Equilibrium methods) สามารถใช้พลังงานชั้นสูงได้ เป็นไปได้ว่าขั้นตอนที่อุณหภูมิสูงเหล่านี้มีความเสถียร จาก การระเบิดพลังงานสูง (The high energy bombardment) ของกระบวนการสปัตเตอริง หรือ สภาวะที่ไม่สมดุลของการสะสมทางเคมี (electro-chemical deposition)

2.5 ผลึกจริง [17-30]

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

2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

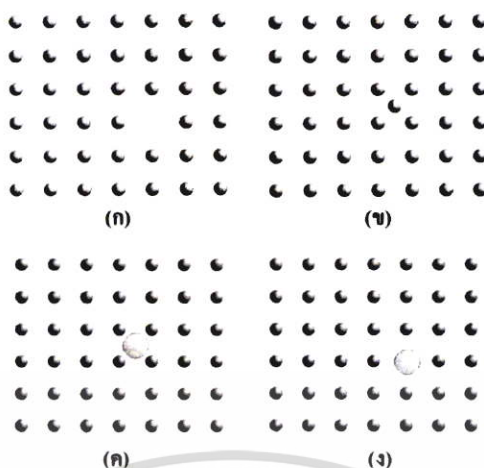
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลตทิสที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

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

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

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



○ อะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ ● อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน

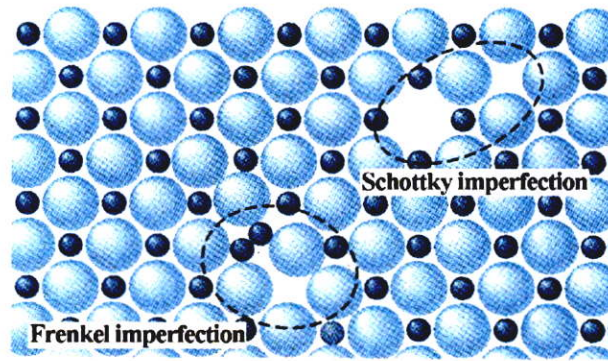
รูปที่ 2.13 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

- ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่
- ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่
- ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก
- ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก - ไอออนลบ (cation-anion divacancy)

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)



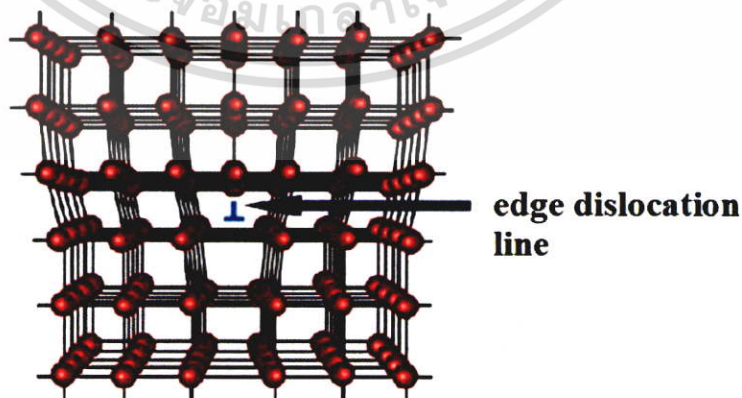
รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

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

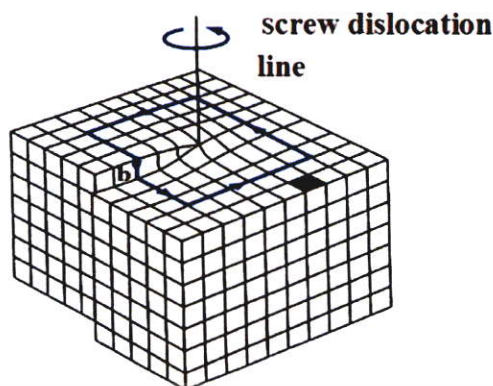
ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector : \vec{b}) ดังแสดงในรูปที่ 2.15

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



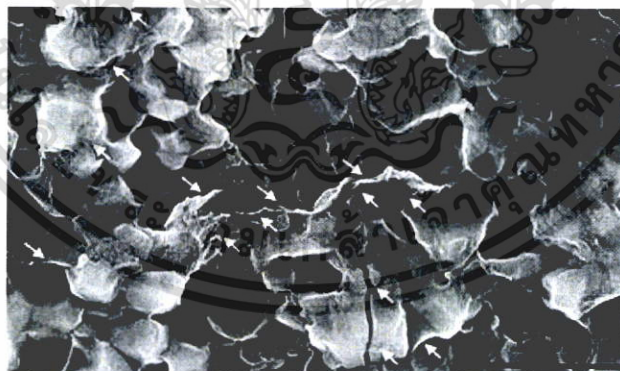
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มักเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface- imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางต่างกัันนั้นเรียกว่าบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

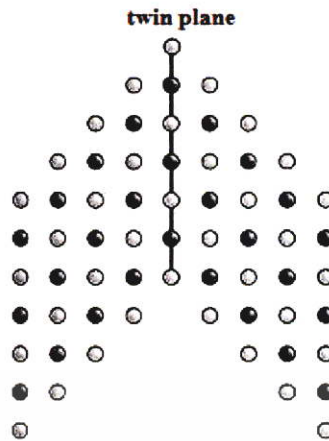


รูปที่ 2.17 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.5.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.18

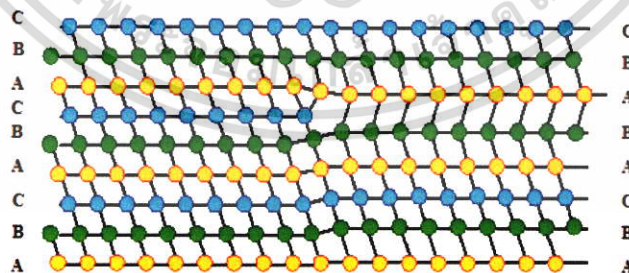
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝด หรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

2.5.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงสร้างผลึกออคตาฮีดรอลแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดพลาดจากตัวอย่างข้างต้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [17-22]

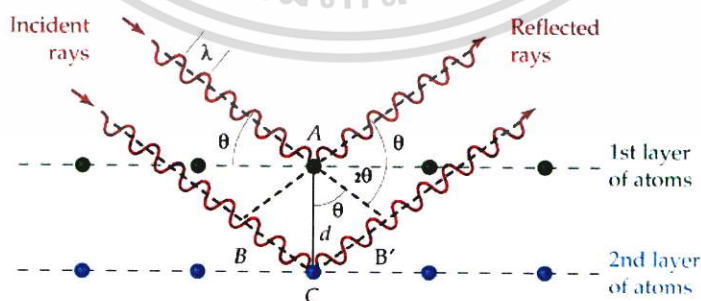
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ ต่อไป

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

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ วิลเลียม เฮนรี แบริก และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (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
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
 2θ คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
 n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.20 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

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

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟโรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล

($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ 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 (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) 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) และความน่าจะเป็นของความผิดพลาดการจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (stacking fault probability) ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ϵ_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

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

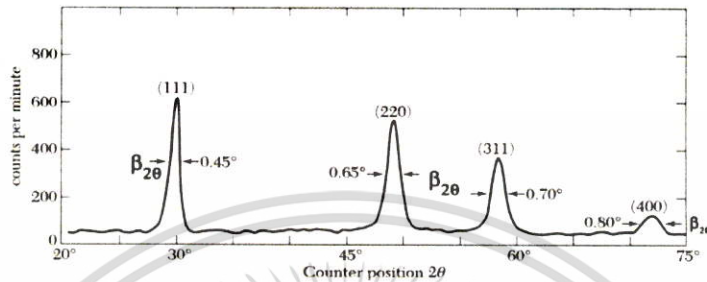
ดังนั้น

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

เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	β	คือ	ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (full width at half maximum : FWHM)
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	ϵ_s	คือ	ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.21 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

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

โดยที่ γ มีหน่วยเป็น line/m^2 , D มีหน่วยเป็น m และ C เป็นค่าคงที่ที่ทำความหนาแน่นของดิสโลเคชันมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เราให้มีค่าเท่ากับ 1

ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults, S_f) หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)

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

เมื่อ β คือความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)

θ_{hkl} คือมุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงสุด ในงานวิจัยนี้คือ θ_{002}

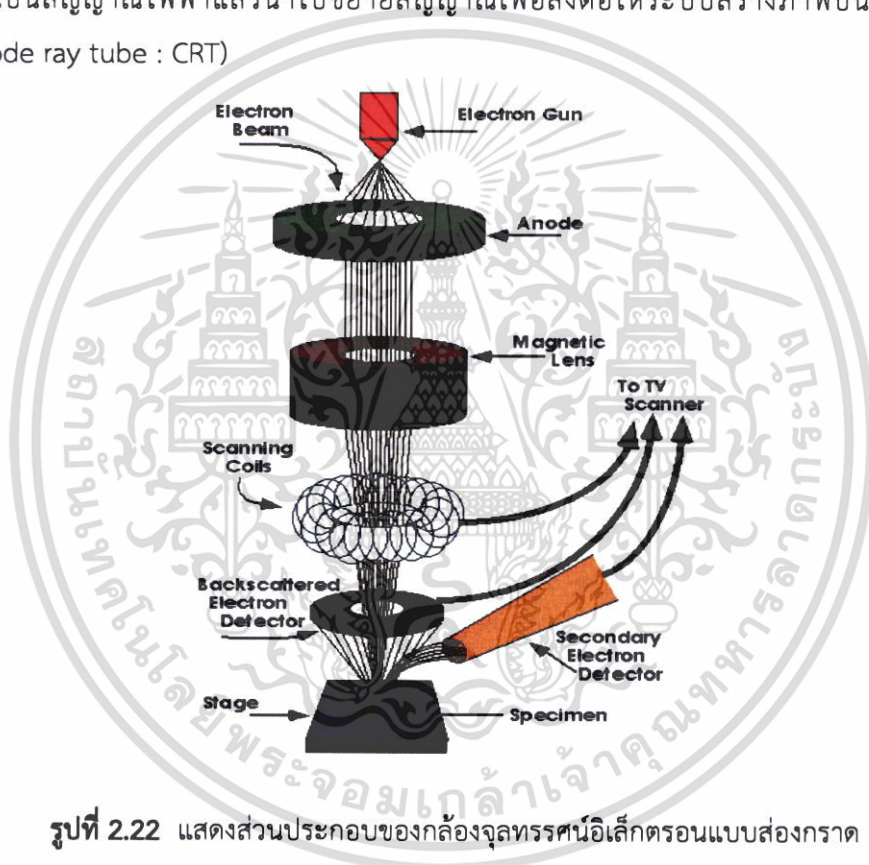
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [23]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1- 40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสภาพลำอิเล็กตรอนจะกราดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอแคโทด (cathode ray tube : CRT)



รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผกผันตรงกับ i_p แต่ผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมิต่ำน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [23-35]

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบ พลังงาน (energy gap: E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

2.8.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

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

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรง คือ

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

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียง คือ

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

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
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง [24-36]

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

2.9.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

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

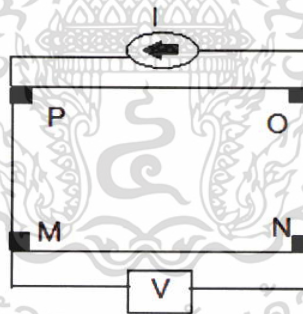
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ $f(E)$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)
k	คือ	ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

2.9.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.24 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์

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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

2.9.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน
สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

นั่นคือ หากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

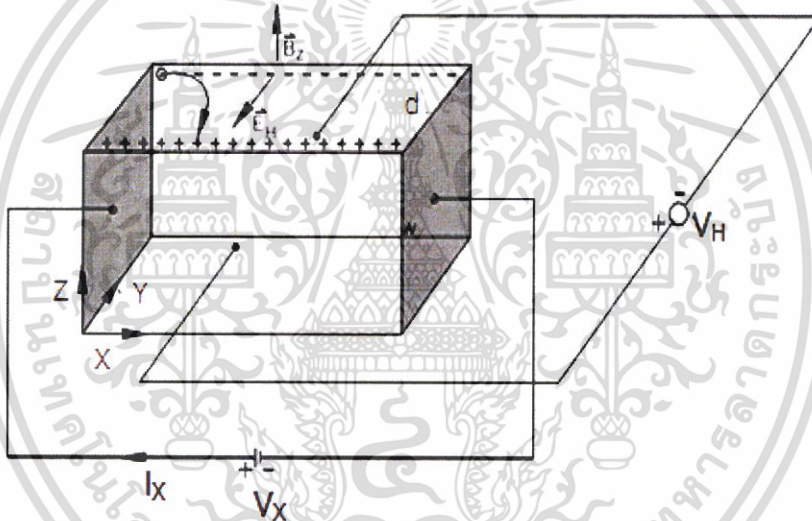
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.25)$$

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 2.25 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน V_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.27)

จาก
$$I = nqvA \quad (2.27)$$

ดังนั้น
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.28)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากรูปที่ 2.21

$$A = w \cdot d \quad (2.31)$$

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 $-y$ สม่ำเสมอในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

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

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดการกระเจิง (τ) 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่จากสมการที่ (2.39) และ (2.40) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_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 ซึ่งมีความมากกว่า 1 โดยทั่วไป เพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะ ที่คำนวณจาก ปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.10 รอยต่อพี-เอ็น [17-22, 25-27, 30]

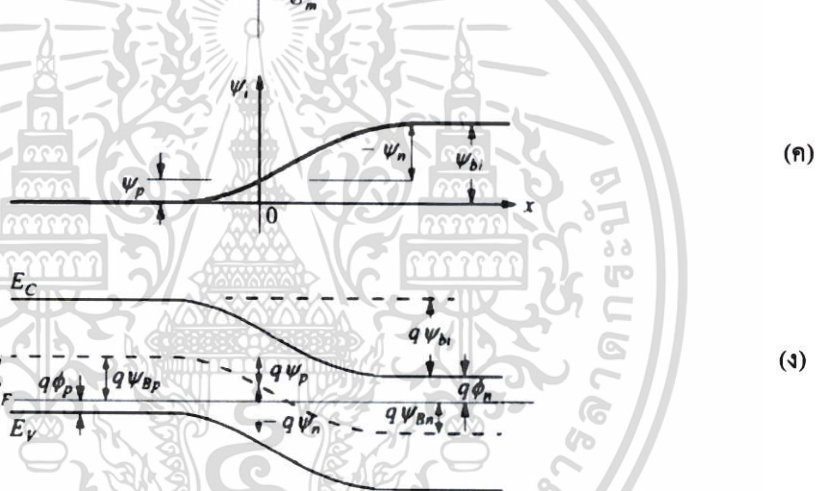
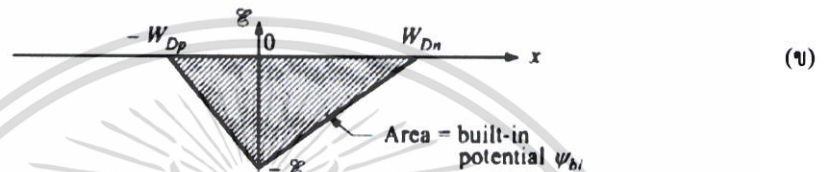
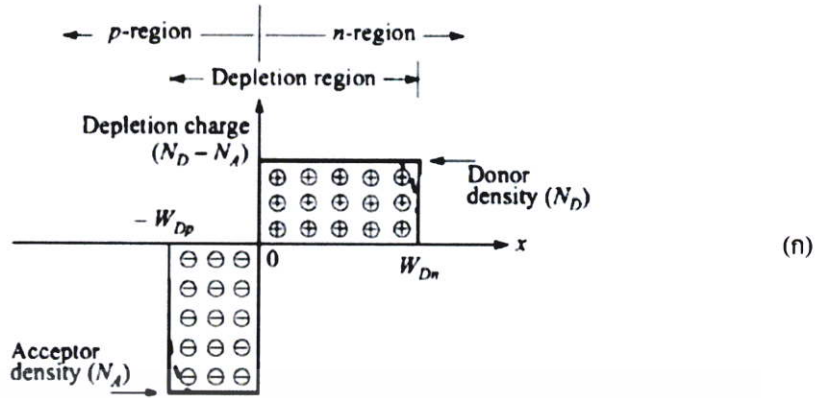
รอยต่อพี-เอ็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็นเป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็นได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอกก์เลย์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

2.10.1 บริเวณพร่องพาหะ (depletion region)

2.10.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน (abrupt junction)

เมื่อความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จากสารเจือผู้รับ (N_A) ไปยังสารเจือผู้ให้ (N_D) แสดงไว้ในรูปที่ 2.26 (ก) ผลที่ได้รับทำให้เกิดรอยต่อฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้า $N_A \gg N_D$ (หรือในทางกลับกัน) ผลที่ได้รับจากรอยต่อฉับพลันทำให้เกิด p^+-n (หรือ n^+-p)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงรอยต่อพี-เอ็นระดับพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน

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

ก่อนอื่นต้องพิจารณาสภาวะสมดุลทางความร้อนขณะที่ไม่มีแรงดันไบแอส กระแสพิตพาและกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 2.26 (ข), 2.26 (ค) และ 2.26 (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 ส่วนบริเวณที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะจะถือว่าสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ 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 2.23(ข):

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดยที่ ξ_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))

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

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

ที่แต่ละด้านของบริเวณพร่องพาหะจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน 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 ψ_{bi} จะมีค่าดังนี้คือ

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

ξ_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) บริเวณพร่องพาหะสามารถคำนวณได้ดังนี้ :

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

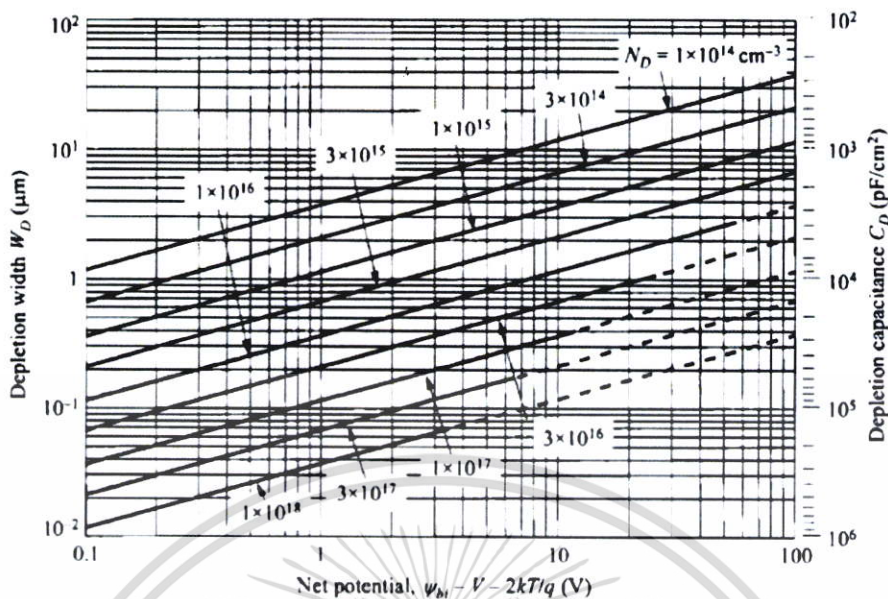
ที่ N คือ N_D หรือ N_A โดยที่ $N_A \gg N_D$ หรือในทางตรงข้ามกัน, และ

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

การอธิบายดังกล่าวข้างต้นนี้อาศัยการประมาณว่าประจุบวก และประจุลบจะปรากฏอยู่เฉพาะในบริเวณพร่องพาหะเท่านั้น แต่ถ้าต้องการความถูกต้องมากขึ้นเราจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายของความหนาแน่นของพาหะข้างมากเพิ่มเติมเข้าไปในสมการปัวซอง เช่น ด้านพีจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น $\rho \approx -q[N_A - p(x)]$ ส่วนด้านเอ็นจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น $\rho \approx q[N_D - n(x)]$ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.66) โดยการแทนที่ ψ_{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 ψ_{bi} ด้วย $(\psi_{bi} - V)$ ลงในสมการที่ (2.70) จะได้ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ของรอยต่อฉับพลันเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนแสดงไว้ในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะและความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ ($\psi_{bi} - V - 2kT/q$) สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉับพลันในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์

ศักย์ไฟฟ้าสุทธิที่ไบแอสเป็นศูนย์สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะมีค่าประมาณ 0.8 โวลต์ และสำหรับแกลเลียมอาเซไนด์ประมาณ 1.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าสุทธิจะลดลงภายใต้ไบแอสตรง และจะเพิ่มขึ้นภายใต้ไบแอสกลับทาง ผลดังกล่าวนี้ใช้ได้กับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาเซไนด์ เนื่องจากทั้งซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตเท่ากัน ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ เช่น เยอรมันเนียม ต้องคูณแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของซิลิคอนเข้าไปด้วย $\sqrt{\epsilon_s(Ge)/\epsilon_s(Si)}$ (=1.16) การคำนวณง่าย ๆ ดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้กับรอยต่อพี-เอ็นฉับพลันของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ V เป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง ผลที่ได้จากความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะแสดงไว้ในรูปที่ 2.24 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 2.25) ค่าความชันที่ได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารเจือ และที่ $1/C^2 = 0$ จุดตัดแกน x คือ $\psi_{bi} - 2kT/q$ สำหรับไบแอสตรงจะมีความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากที่ที่มีความจุของบริเวณพร่องพาหะ ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและข้อมูลความจุ-แรงดันไฟฟ้า จะไม่เปลี่ยนแปลงตามโปรไฟล์ของสารเจือที่ระยะทางน้อยกว่าความยาวเดอบายซึ่งความยาวเดอบาย (Debye length : L_D) คือ ลักษณะเฉพาะของความยาวของสารกึ่งตัวนำ มีนิยามดังนี้คือ

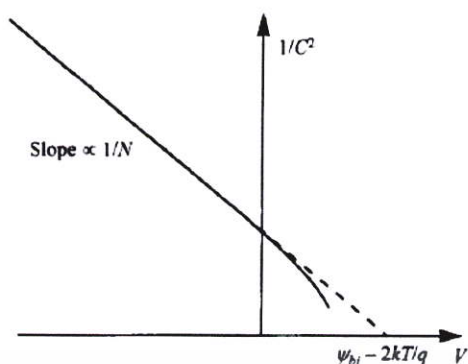
$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s kT}{q^2 N}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qN\beta_m}} \quad (2.74)$$

ความยาวเดอบายให้แนวคิดถึงขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนโปรไฟล์ของสารเจืออย่างฉับพลัน พิจารณาที่ปริมาณการเจือเพิ่มขึ้นทีละน้อย ๆ ลงในสารกึ่งตัวนำ (ΔN_D), ศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปคือ $\Delta\psi_i(x)$ แล้ว

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2-V$ ซึ่งจะทำได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ

2.10.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

2.10.2.1 สมการของชอกคีย์เสยในกรณีอุณหภูมิต่ำ

ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในกรณีอุณหภูมิต่ำจะอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐาน 4 ข้อ ดังนี้คือ

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

อันดับแรกเราพิจารณาความสัมพันธ์ของโบลต์ซมันน์ที่สภาวะสมดุลความร้อน 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ที่ E_{Fn} และ E_{Fp} คือ ระดับควอไซ-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

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

ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอนและโฮล จะแปรตรงกับเกรเดียนต์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิของอิเล็กตรอนและโฮล, ถ้า $E_{Fn} = E_{Fp} =$ ค่าคงที่ (สมดุลความร้อน) แล้ว $J_n = J_p = 0$ การกระจายของศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ และความหนาแน่นของพาหะในรอยต่อพี-เอ็น ภายใต้เงื่อนไขการไบแอสตรงและการไบแอสกลับทางแสดงในรูปที่ 2.2 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) เราจะได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบ ($x = -W_{DP}$) ของบริเวณพร่องพาหะในด้านพี (p-side) ดังสมการ

$$n_p(-W_{DP}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.84ก.)$$

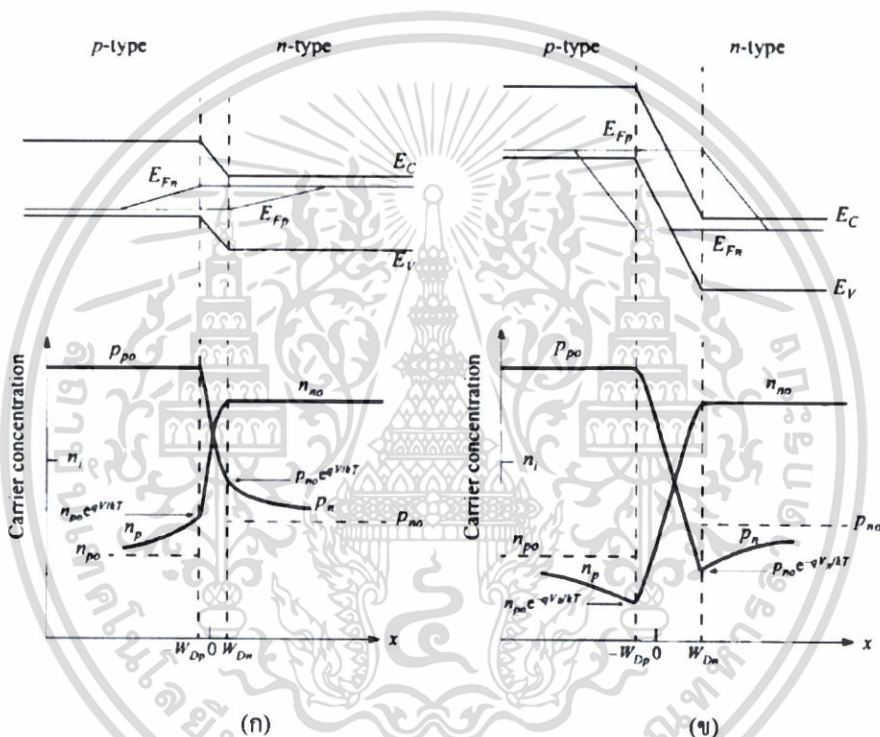
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวข้างต้นมีความสำคัญมากต่อสมการกระแส-แรงดันไฟฟ้าของกรณีอุดมคติ



รูปที่ 2.29 แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮล และการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข

- ก. ไบแอสตรง
- ข. ไบแอสกลับทาง

สมการต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขสภาวะคงตัว (steady-state) ในรอยต่อทางด้านเอ็นคือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.) แล้วนำไปใช้ร่วมกับความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์ $D = (kT/q)\mu$ จะได้

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

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

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

ในการทำงานเดียวกันกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในด้านพีคือ

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

ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย และความหนาแน่นของกระแสภายใต้ไบแอสตรง และไบแอสกลับทาง แสดงไว้ในรูปที่ 2.24 เป็นที่น่าสนใจที่จะต้องกล่าวว่ากระแสโฮลจะถูกฉีดจากด้านพีไปด้านเอ็น

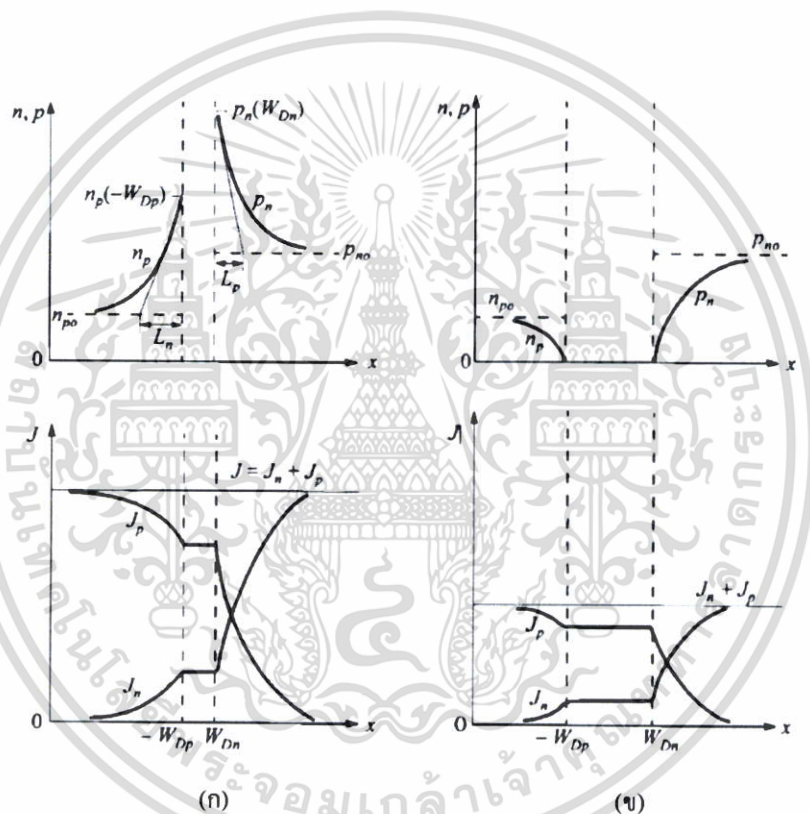
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ขนาดของกระแสโฮลจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ D_p, L_p และ p_{no} ที่อยู่ในด้านเอ็น ส่วนการฉีดกระแสอิเล็กตรอนก็คล้ายคลึงกับกระแสโฮลเช่นเดียวกัน

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

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

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



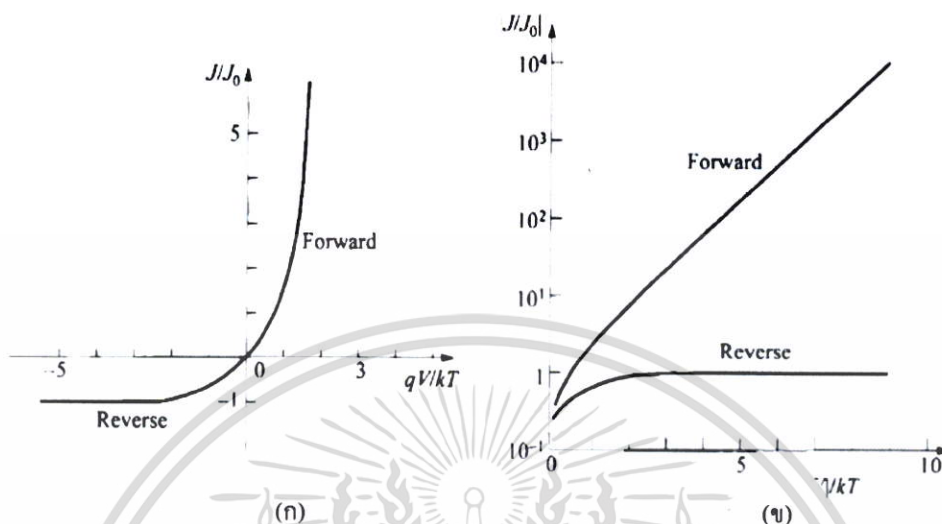
รูปที่ 2.30 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ

- ก. เจ็อนไซไบแอสตรง
- ข. เจ็อนไซไบแอสกลับทาง

สมการที่ (2.94) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของชอกค์เลย์ซึ่งเป็นกฎของไดโอดอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงไว้ในรูปที่ 2.31 (ก) และ 2.31 (ข) โดยเขียนกราฟแบบเชิงเส้นและแบบกึ่งลอการิทึมตามลำดับ ทางด้านไบแอสตรง (แรงดันไฟบวกทางด้านพี) สำหรับ $V > 3kT/q$ จากรูปที่ 2.29 (ข) อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสจะเป็นแบบเชิงเส้นที่ 300 เคลวิน ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุกๆ 10 มิลลิแอมป์, แรงดันจะเท่ากับ 59.5 มิลลิโวลต์ ($2.3kT/q$) ส่วนทางด้านไบแอสกลับทาง กระแสอิ่มตัวที่ $-J_0$



รูปที่ 2.31 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 / τ_p แปรตรงกับ T^γ ที่ γ 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 $\exp[-(E_g - qV)/kT]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 กระบวนการเกิด-การรวมตัวของพาหะอิสระ (generation-recombination process)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการเกิดกระแสของพาหะอิสระภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง เนื่องจากขณะไบแอสกลับทางจะมีปริมาณพาหะอิสระน้อยมาก ($pn \leq n_i^2$) กระบวนการเกิดพาหะอิสระจึงมาจากกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและปลดปล่อยโฮลออกมาจากกับดักประจุ อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้จากทฤษฎีของชอว์คีย์-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 σ_n และ σ_p คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอนและการจับโฮลตามลำดับ ส่วน τ_g คือ ช่วงชีวิตของการเกิดพาหะ (generation time)

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

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 ความหนาแน่นของกับดักประจุ 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 ถ้าช่วงชีวิตของการเกิดพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเล็กน้อยแล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะจะขึ้นกับอุณหภูมิตามค่า n_i ดังนั้นที่อุณหภูมิใดๆ τ_g จะแปรตามความกว้างของบริเวณพร่องพาหะซึ่งจะขึ้นกับแรงดันไบแอสสำหรับรอยต่อฉับพลัน

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

สำหรับรอยต่อเชิงเส้น

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

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

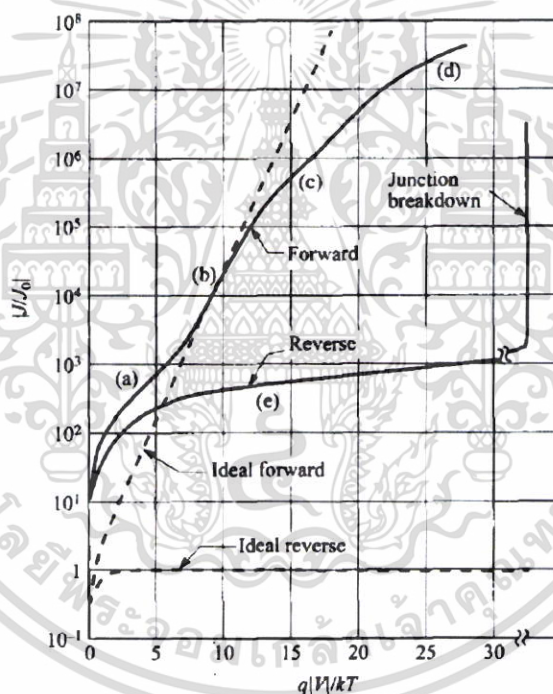
$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_i W_D}{\tau_g}} \quad (2.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ n_i มีค่ามาก (เช่น เยอรมาเนียม) กระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่นที่อุณหภูมิห้อง และกระแสไบแอสกลับทางจะเป็นไปตามสมการชอคเลย์ แต่ถ้า n_i มีค่าน้อยๆ (เช่น ซิลิคอน) กระบวนการเกิดพาหะจะมีบทบาทโดดเด่นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.32 ,เส้นโค้ง (จ) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอกระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่น

ภายใต้ไบแอสตรงกระบวนการเกิด - การรวมตัวของพาหะในบริเวณพร่องพาหะเป็นกระบวนการจับพาหะผ่านกับดักประจุ เราจะได้กระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะ นอกเหนือไปจากกระแสแพร่ซึม เมื่อแทนสมการที่ (2.80) ลงในสมการที่ (2.97) จะได้

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



รูปที่ 2.32 ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน

- ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ
- ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม
- ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง
- ง. ผลของความต้านทานอนุกรม
- จ. การแพร่รั่วไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด - การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

U มีค่าสูงสุดอยู่ในบริเวณพร่องพาหะ 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

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

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

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

ที่ ξ_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 แต่ถักรอยต่อพี-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 และความจุแพร่ซึมดังสมการ

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

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ขอบของบริเวณพ่วงพาหะสามารถหาได้จากสมการที่ (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

$$\begin{aligned} p_n(W_{Dn}) &= p_{no} \exp\left\{\frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT}\right\} \\ &\approx p_{no} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \frac{p_{no}qV_1}{kT} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \exp(j\omega t) \approx p_{no} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \tilde{p}_n(t) \end{aligned} \quad (2.113)$$

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

$$\begin{aligned} J &= \left(qp_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + qn_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \exp \left\{ \frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ &\approx \left(qp_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + qn_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \left[\exp \left(\frac{qV_0}{kT} \right) \right] \left[1 + \frac{qV_1}{kT} \exp(j\omega t) \right] \end{aligned} \quad (2.119)$$

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

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

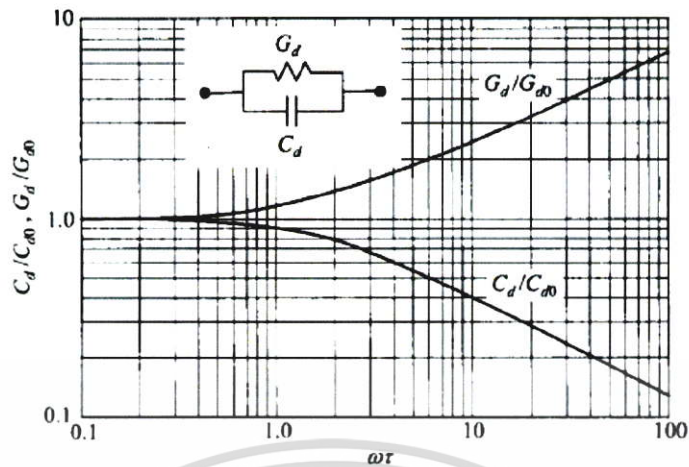
ที่ความถี่ต่ำความจุแพร่ซึมสามารถคำนวณได้โดยใช้การประมาณค่า $\sqrt{1 + j\omega \tau} \approx (1 + 0.5j\omega \tau)$

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

ค่าความจุแพร่ซึมนี้จะแปรตามแรงดันไบแอสตรงสำหรับรอยต่อ $n^+ - p$ จะได้ว่า

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

ความจุแพร่ซึมและความนำแพร่ซึมที่ขึ้นอยู่กับความถี่จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.30 ซึ่งแกนนอนจะเป็นค่า $\omega \tau$



รูปที่ 2.33 แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร์ซีม และความนำแพร์ซีมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$

พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง

วงจรสมมูลของไฟฟ้ากระแสสลับแอดมิตแตนซ์จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.33 ด้วย เพื่อแสดงว่าค่าความจุแพร์ซีมจะลดลงเมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความถี่สูงๆ C_d จะสัมพันธ์กับ $\omega^{-1/2}$ นอกจากนี้ความจุแพร์ซีมยังแปรตามไฟฟ้ากระแสตรง $\propto \exp(qV_0/kT)$ เพราะฉะนั้น C_d จึงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ต่ำ และภายใต้สภาวะไบแอสตรง

2.11 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์ [17-20]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.30 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสที่ขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบแอสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

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

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

โดยที่
 V คือ แรงดันไบแอสตรง
 n คือ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิของไดโอด
 J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
 E_a คือ พลังงานกระตุ้น
 k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์
 J_{00} คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

ซึ่ง J_{00} จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน (V_b) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

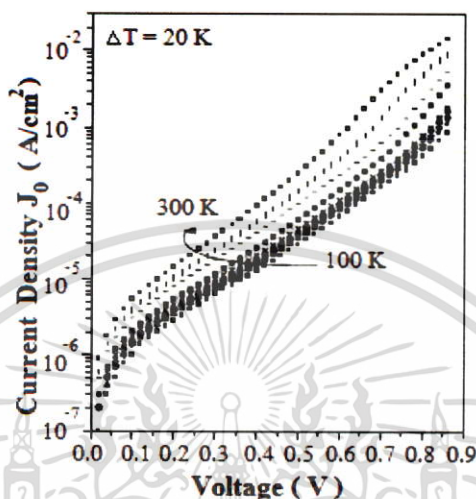
$$J_{00} = qS_p N_v \left[\frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^2 \exp\left[\frac{-qV_n}{kT} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.125)$$

โดยที่

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ S_p คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล, N_v ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ (ϕ_p^0) คือค่าแฟกต์ยกขวางกันโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ

ค่า J_{00} นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อวิวิธพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแสเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่คิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านค่าแฟกต์ยก) คือแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกักประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี และ $\ln J_0$ จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ($\ln J_0 \propto T^{-1}$)

2.11.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ [17-19,25-30]

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

จากแบบจำลองของ ชอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) มีค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง J_0 จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น $E_g/2$ สำหรับกรณีที่เกิดกักประจุมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างผลึกที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

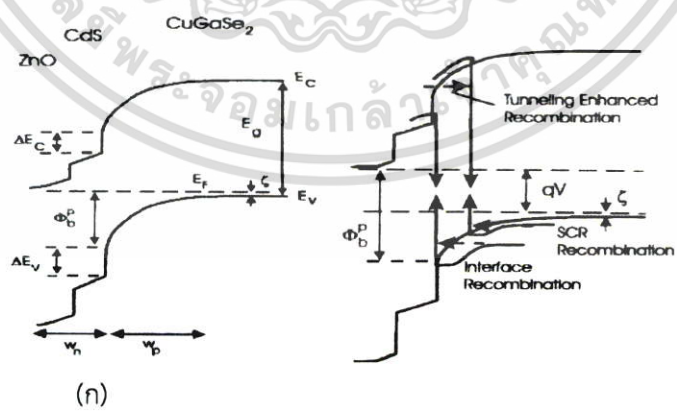
สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น $p-n^+$) ปริมาณ $N_D > N_A$ กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$ ซึ่ง N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า ϵ_n และ ϵ_p คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพีตามลำดับ

2.11.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ [17-18]

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \tag{2.127}$$

โดยที่ A คือ ความชันของกราฟระหว่าง $\ln J$ กับ V ซึ่งค่าของ A ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่าแฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนี้ $\ln J_0$ จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง $\ln J_0$ ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อขอตติ์ การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้ J_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.35 แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย

- ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe₂ 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 นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดกลไกการนำกระแสเกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ แล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน (E_g) ของตัวดูดกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสงขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แพกเตอร์อุณหคณิตของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

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

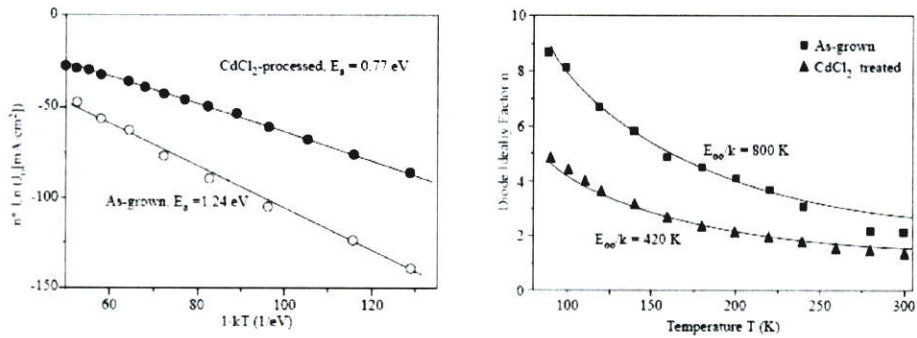
โดย E_{00} คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม E_{00} คือ

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

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ ϵ_s คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง แพกเตอร์อุณหคณิตของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

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

ซึ่ง kT^* คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.36 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิมิตวย้อนกลับ J_0 และแฟกเตอร์อุทกคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนีสและเมื่อผ่านการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซ $CdCl_2$

2.12 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [17-20]

อัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

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

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 ระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุ, n และ p คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ, n_i คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิค แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือโฮล (electron/hole cross section: $\gamma_{n/p}$) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

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

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

เมื่อ $S_{n/p}$ คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กตรอน หรือโฮล, $\tau_{n/p}$ คือค่าชีวิตของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ส่วน Γ คือ แฟกเตอร์แก้ (correction factor) ของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

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

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลาดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 พลังงานลักษณะเฉพาะของการกระจายตัวของกับดักประจุ และ $\eta = E_v - \frac{E_T}{\eta}$ หรือ

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.120) ร่วมกับสมการ (2.123) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดักกลืนแสงดังนี้คือ

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

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) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดักกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ $T^* \rightarrow \infty$ กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี $E_{00} \rightarrow 0$ จะได้ว่า $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกค์เลย์-ริด-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนั้นยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่ออิวิวิพันธ์ แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) สามารถจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 $E_g = \phi_a^p$ ซึ่ง ϕ_a^p ก็คือ ϕ_b^p นั่นเองเมื่อ ϕ_b^p คือ กำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงานของตัวดูดกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง V_{oc} กับ T ซึ่ง V_{oc} นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ซอกค์เลย์-ริด-ฮอลล์ อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} กับ T ในสมการ (2.113) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.123) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_g)

2.13 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [17-25]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีการไบแอสกระแสดังรูปที่ 2.34 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอสหรือไม่มีการไบแอส ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใด ๆ ปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆ ไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีความต้านทานเป็นอนันต์ เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.31 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

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

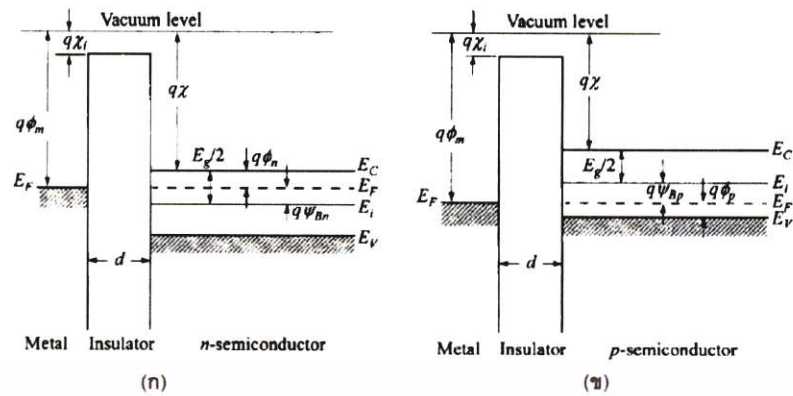
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad (2.140ข)$$

เมื่อ χ, χ คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

ψ_{Bn}, ψ_{Bp} คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน

ϕ_n, ϕ_p คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

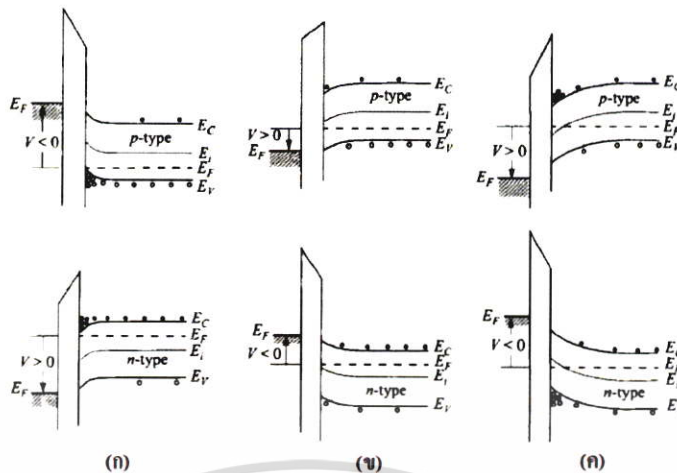


รูปที่ 2.37 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุล เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$)

- ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาทะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้นโดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.37 (ก) โดยกรณีแรกตามรูปที่ 2.37(ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟลบให้กับขั้วโลหะ ($V<0$) จะทำให้พาทะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมุกขมูของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อโดยกรณีนี้จะเรียกว่าบริเวณขมุกขมูพาทะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นไฟบวก ($V>0$) จะส่งผลให้พาทะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก (E_i) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าบริเวณพร่องพาทะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.37(ข) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้นจนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก (E_i) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนขมุกขมูกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.38 (ค) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าบริเวณชั้นกลับกลาย (inversion case)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

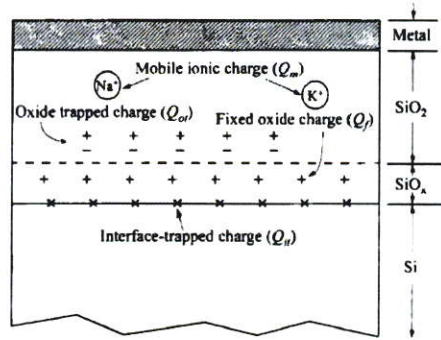


รูปที่ 2.38 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิด

- ก. บริเวณขุมนุ้พพาหะ
- ข. บริเวณพร่องพาหะ
- ค. บริเวณชั้นกลับกลาย

2.14 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน [17-20, 30]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.39 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และประจุค้างภายในกัณฑ์ (Q_{it}) ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO₂ โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ Q_{it} จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ (Q_f) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ (Q_{ox}) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอกซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนร้อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



รูปที่ 2.39 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

2.15 กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [19-25]

กัณฑ์ที่ผิวเชื่อมต่อจะแสดงลักษณะถึงความเป็นอะตอมผู้ให้ (donor) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุบวก (+) โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกไป และเช่นเดียวกับลักษณะของอะตอมผู้รับ (accepter) จะมีการรับเอาอิเล็กตรอนเข้ามาจนเปลี่ยนลักษณะทางไฟฟ้าจากเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุลบ (-) ฟังก์ชันการแจกแจงของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อสามารถเขียนได้ 2 กรณี ได้แก่

สำหรับกรณีที่เป็นกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้ให้

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

$$= \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]}$$

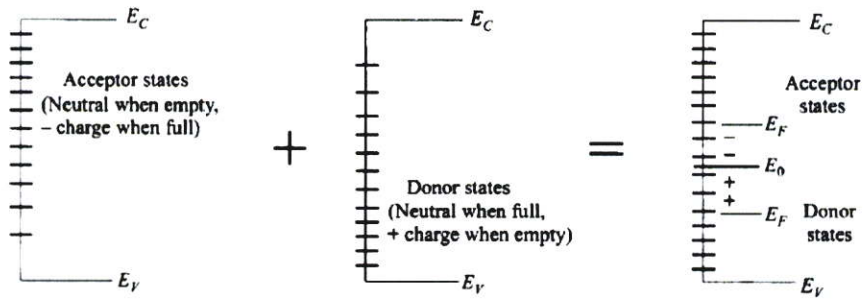
สำหรับกรณีที่เป็นกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้รับ

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

เมื่อ E_t คือ ระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

g_D คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้ให้

g_A คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้รับ



รูปที่ 2.40 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากรูปที่ 2.40 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ E_0

ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

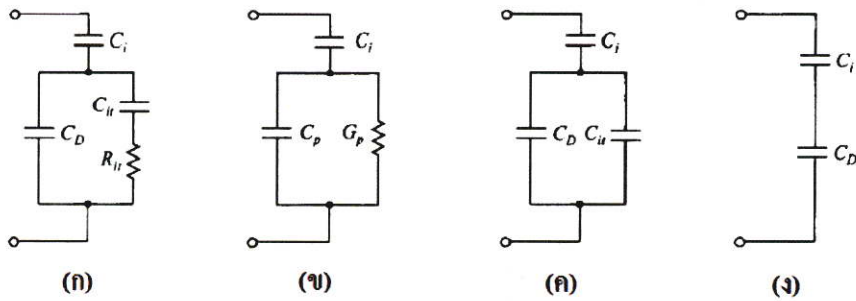
$$Q_{it} = -q \int_{E_0}^{E_C} D_{it} dE \quad \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0$$

$$= +q \int_{E_V}^{E_0} D_{it} dE \quad \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \quad (2.142)$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

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

สมการที่ (2.143) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด Q_{it} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.41 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{it} และ R_{it} ของกัปกัดประจุที่ผิวเชื่อมต่อยู่ด้วย
 ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ
 ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกัปกัดประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกัปกัดประจุนี้ส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน (C-V) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกัปกัดประจรรวมอยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.41 (ก) โดยที่ C_i และ C_D เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ C_{it} และ R_{it} คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกัปกัดประจุซึ่งกัปกัดประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ $C_{it}R_{it}$ จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกัปกัดประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (τ_{it}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรม การตอบสนองต่อความถี่ของกัปกัดประจุ เนื่องจาก C_p และ G_p จะต่อขนานกันทั้ง C_p และ G_p จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกันโดยที่

เมื่อ

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

และ

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

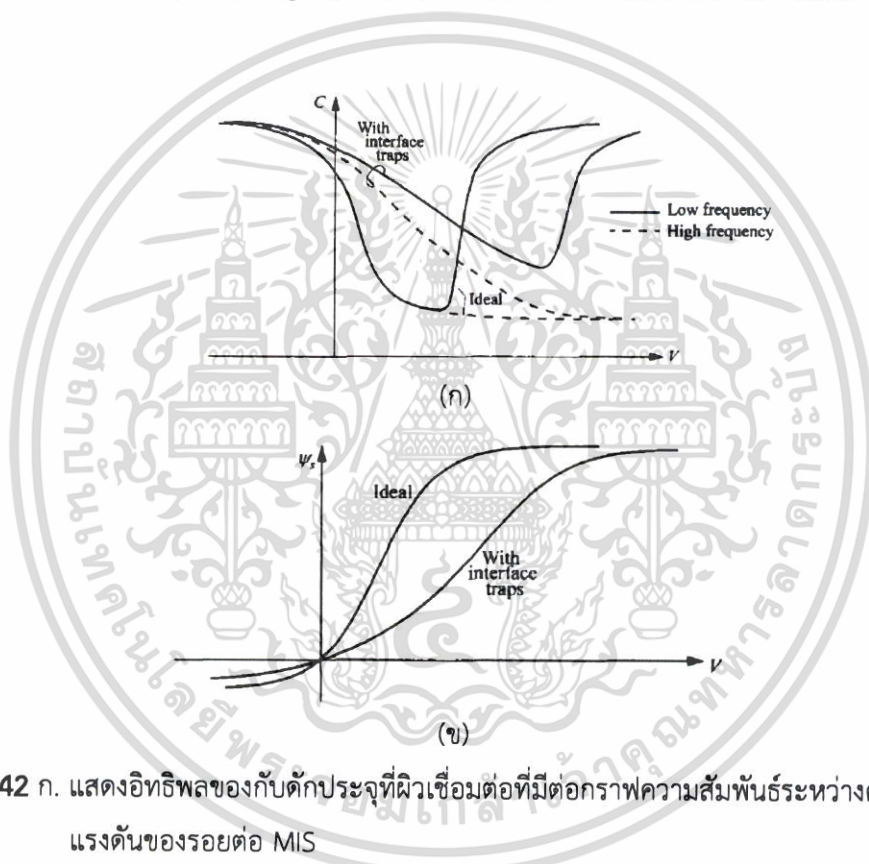
สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ R_{it} ของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.41(ก) จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้ว C_D จะขนานกับ C_{it} ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด C_{it} และ R_{it} ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากัปกัดประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูง และที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ψ_s ในรูปที่ 2.37ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\psi_s - V$ สามารถนำไปคำนวณหา D_{it} ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ D_{it}



รูปที่ 2.42 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS

ข. แสดงการยึดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s

2.16 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ [25-27, 30]

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการสื่อสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ 2.147 และสมการที่ 2.146 จะเขียนได้ว่า

$$C_H = \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - C_D$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \quad (2.148)$$

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

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

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกักประจุนั้นแปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า (ΔC) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ D_{it} ได้ก็สามารถที่จะหาค่า Ψ_s ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

2.16.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ความแตกต่างของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.34 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ว่า 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพิกัดค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่เดียวกัน จากภาพวงจรสมมูลในรูปที่ 2.36(ก) ความจุของฉนวน C_i ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการชุมนุมพาหะอย่างมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนจะถูกนำเอาไปหักออกจากราคาอิมพีแดนซ์ 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการไบแอสแรงดันจะสามารถวัดค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ที่สัมพันธ์กับความถี่ได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{G_p}{\omega}$ และ ω 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 เป็นการหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดียว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุก็มีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงดังความสัมพันธ์

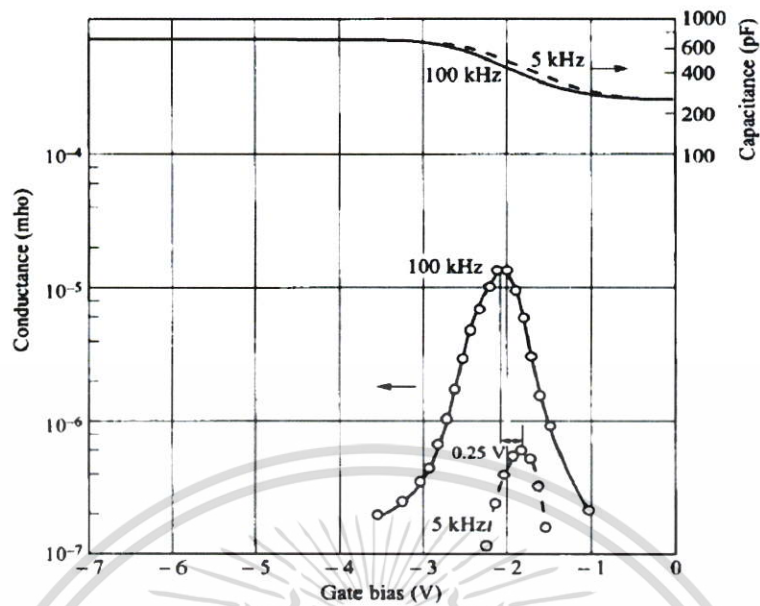
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qD_{it}}{2\omega\tau_{it}} \ln(1+\omega^2\tau_{it}^2) \quad (2.152)$$

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

$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}}{0.402q} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.153)$$

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

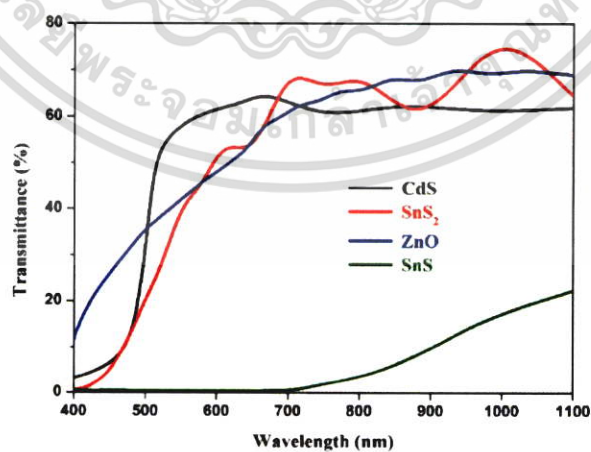
เมื่อ σ_T คือพื้นที่ภาคตัดขวางของการจับประจุของกับดักประจุมีค่าประมาณ 10^{-15} ต่อตารางเซนติเมตร ส่วน v_{th} คือความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน มีค่าประมาณ 10^7 เซนติเมตรต่อวินาที และ $N_{C,V}$ คือค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ สำหรับ E_T คือระดับพลังงานของกับดักประจุ



รูปที่ 2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันขอรอยต่อ MIS

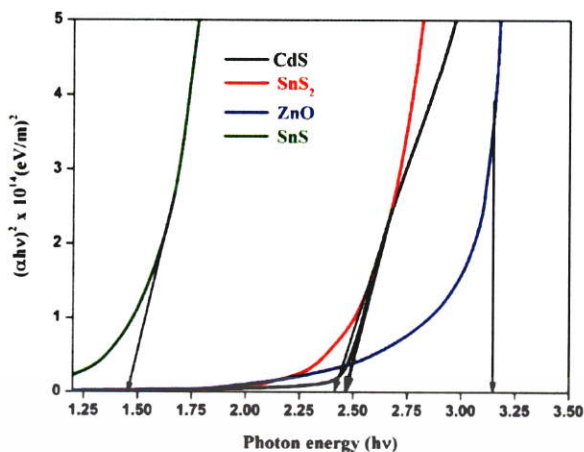
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [31]

จากการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ พบว่า Arulanantham และคณะได้ทำเตรียมฟิล์มบาง CdS/SnS/SnS₂/SnS และ ZnO/SnS ที่เตรียมโดยใช้วิธีพ่นละอองของสารละลายเคมี จากรูปที่ 2.44 แสดงการลดลงของการส่งผ่านในขณะที่ฟิล์ม SnS แสดงการดูดซับที่สูงขึ้นในช่วงความยาว 400-700 นาโนเมตรเมื่อเทียบกับชั้นอื่นๆ



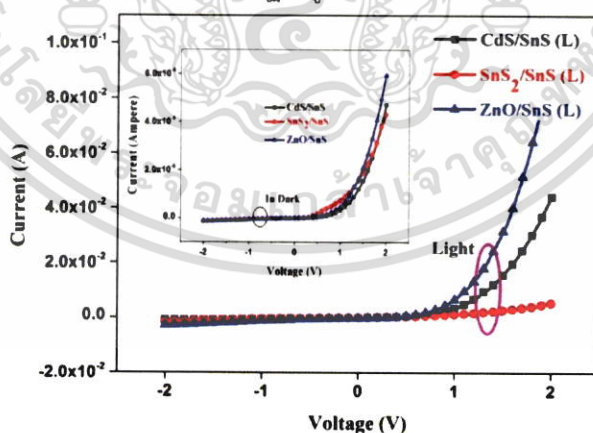
รูปที่ 2.44 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS/ SnS/ SnS₂/ SnS และ ZnO/ SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



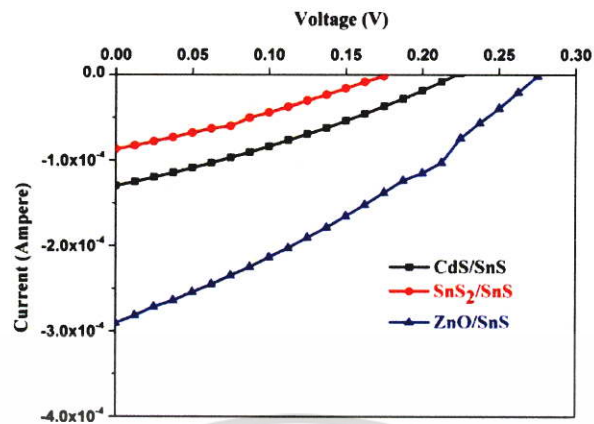
รูปที่ 2.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง CdS/ SnS/ SnS₂/SnS และ ZnO/ SnS

นอกจากนี้พิจารณา n-CdS, SnS₂ และ ZnO เป็นชั้นหน้าต่างและ SnS เป็นชั้นดูดซับเซลล์ต่าง ๆ โครงสร้างเซลล์สุริยะ (PV) เช่น CdS / SnS, SnS₂ / SnS พร้อมกับ ZnO / SnS โดยใช้วิธีการพ่น nebulizer ทางเลือกและลักษณะของวัสดุหน้าต่างช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการแปลงพลังงานไฟฟ้าด้วยรูปถ่ายขึ้นอยู่กับลักษณะชั้นหน้าต่าง กล่าวอีกนัยหนึ่งการศึกษาพฤติกรรมการแยกของชั้น p-SnS กับชั้นหน้าต่างต่าง ๆ เป็นสิ่งจำเป็นในการวิจัยเซลล์สุริยะโครงสร้าง กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับโวลต์ของ CdS / SnS, SnS₂ / SnS และ ZnO / SnS heterostructures ภายใต้การฉายแสงและการไม่ฉายแสงจะปรากฏในรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของ FTO/CdS/SnS, FTO/SnS₂/SnS และ FTO/ZnO/SnS ขณะไม่ฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่ออวิวิธพันธ์ ของ FTO/CdS/SnS, FTO/SnS₂/SnS และ FTO/ZnO/SnS ขณะฉายแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไป ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานสูง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรือเซนเซอร์ต่อไป

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. แผ่นกระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
7. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอດประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)
8. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล้องแก๊สไฟต์
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิหือ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทั้งสแตน 1,000 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผงผลึกแคดเมียมเซลีไนต์และแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. ปากคืบ
5. หน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี
6. แวนตากรองแสง
7. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีสามารถควบคุมความชื้นได้
8. ครอบบดสาร

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ โดยที่เจาะวัดจากมุม 20-80 องศา



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วีไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750 โดยใช้ความยาวคลื่น 350-2500 นาโนเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องยูวี-วีไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

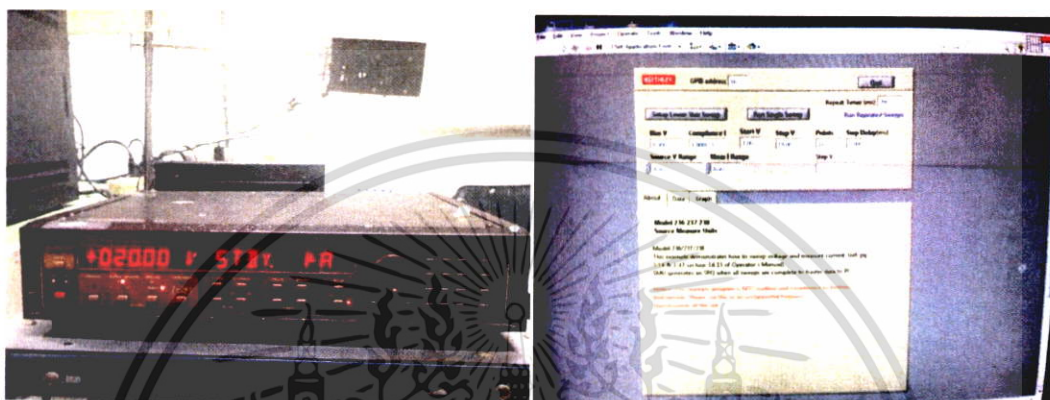
1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. กาวเงิน
6. สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. คอมพิวเตอร์

3.1.7 เครื่องมือใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

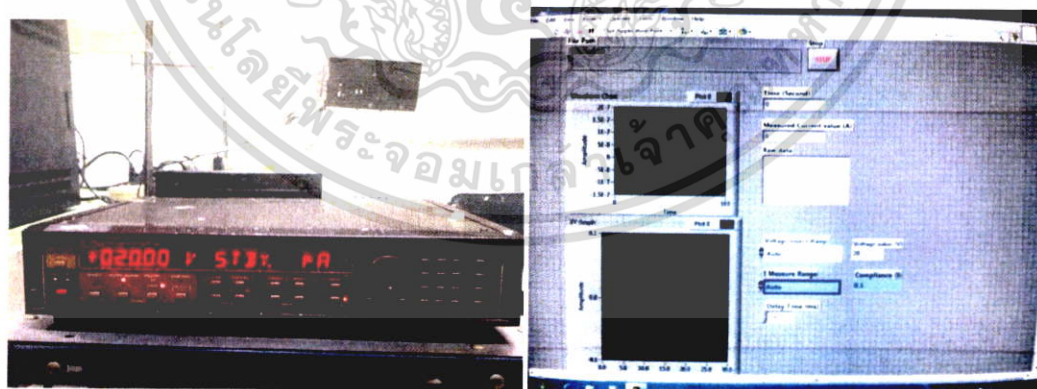
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- โปรแกรม Lab View



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น

3.1.8 เครื่องมือใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสง

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

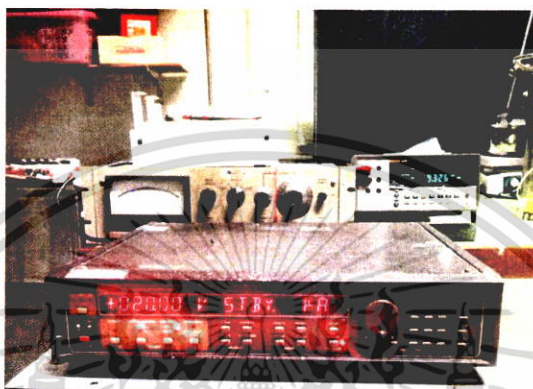


รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

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



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์

3.1.10 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูง

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



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

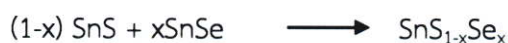
1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
5. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
6. เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
8. เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงพลาสติกซิปล็อก

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วแล้วเปิดบีมดูดอากาศออกจนกระทั่งมีความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์
4. ทำความสะอาดท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เขย่าทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
5. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยอะซิโตน

3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe



มวลอะตอมของธาตุ Sn, S และ Se มีค่าเท่ากับ 118.69, 32.06 และ 78.96 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ SnS} = 118.69 + 32.06 = 150.75 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ SnSe} = 118.69 + 78.96 = 197.65 \text{ กรัมต่อโมล}$$

กรณี $x=0.2$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SnS}_{0.8}\text{Se}_{0.2} &= 118.69 + (0.8 \times 32.06) + (0.2 \times 78.96) \\ &= 160.13 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdTe}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.8 \times 150.75}{160.13} \right) = 0.7531 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.2 \times 197.65}{160.13} \right) = 0.2469 \text{ กรัม}$$

กรณี $x=0.4$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SnS}_{0.6}\text{Se}_{0.4} &= 118.69 + (0.6 \times 32.06) + (0.4 \times 78.96) \\ &= 169.50 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

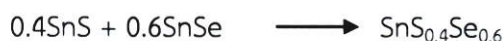
ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{SnS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.6 \times 150.75}{169.5} \right) = 0.5336 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.4 \times 197.65}{169.5} \right) = 0.4664 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x=0.6$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{SnS}_{0.4}\text{Se}_{0.6} &= 118.69 + (0.4 \times 32.06) + (0.6 \times 78.96) \\ &= 178.88 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{SnS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.4 \times 150.75}{178.88} \right) = 0.3371 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.6 \times 197.65}{178.88} \right) = 0.6529 \text{ กรัม}$$

กรณี $x=0.8$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{SnS}_{0.2}\text{Se}_{0.8} &= 118.69 + (0.2 \times 32.06) + (0.8 \times 78.96) \\ &= 188.26 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{SnS}_{0.2}\text{Se}_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.2 \times 150.75}{188.26} \right) = 0.1602 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.8 \times 197.65}{188.26} \right) = 0.8399 \text{ กรัม}$$

หมายเหตุ : ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้จริงในแต่ละครั้งของการทดลองเท่ากับ 0.01 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

Molar Ratio (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	SnS	SnSe		
0.0	1.0000	-	668	593
0.2	0.8338	0.1660	645	530
0.4	0.6529	0.3467	649	559
0.6	0.4554	0.5440	655	555
0.8	0.2387	0.7604	645	530
1.0	-	1.0000	650	571



รูปที่ 3.8 แสดงผงผลึกของสารตั้งต้น $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่ปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายรูป

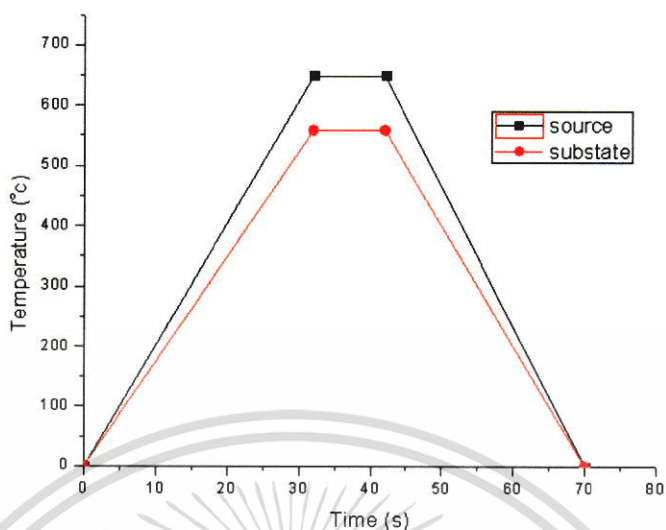
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

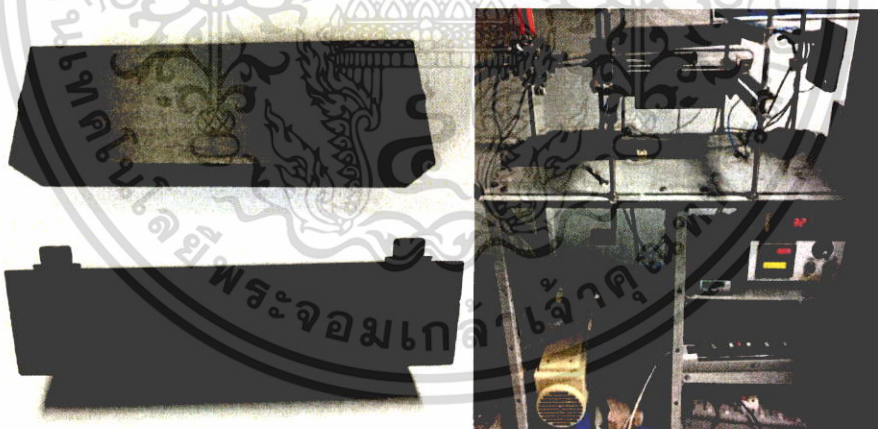
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 30 นาที
5. นำอลูมิเนียมพอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งอลูมิเนียมพอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 30 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ตามข้อ 4
7. เมื่อปลุกฟิล์มบางเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิจากสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงมาต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิจากสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าสมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที



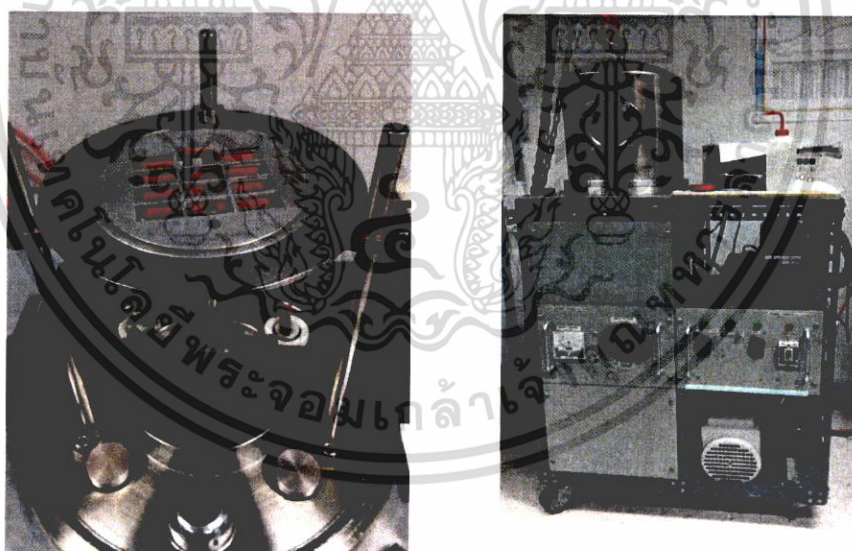
รูปที่ 3.10 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การเคลือบฟิล์มบาง CdS/SnS โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ปรับระยะห่างของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมกับขอบด้านบนของภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศให้มีระยะเท่ากับ 17 เซนติเมตร
2. ตักสารตั้งต้นใส่ให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วางแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับระเหยสารตั้งต้นลงบนขาตั้งในระบบสุญญากาศ
4. วางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วลงบนช่องของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม แล้ววางแผ่นทำความร้อน (heater) ทับลงบนกระจกสไลด์อีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. ตรวจสอบระบบวัดอุณหภูมิ ปิดระบบสุญญากาศ แล้วทำการสูบลมออกจนได้ความดันอยู่ในระดับ 3×10^{-5} ถึง 4×10^{-5} มิลลิบาร์
6. ให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆ จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ละน้อยจนได้กระแสไฟฟ้าประมาณ 100-150 แอมแปร์ ในขณะที่สารตั้งต้นจะเริ่มระเหิด ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จะขึ้นกับปริมาณสารตั้งต้นและความดันเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า
7. เมื่อสังเกตเห็นสารตั้งต้นระเหิดจนหมด ลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจนเป็นศูนย์ ปิดระบบที่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบสุญญากาศลดลงจนมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงปิดระบบปั๊มสุญญากาศและนำฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วไปเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/SnS ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5402 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-70 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของยี่ห้อ LED รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000, และ 5,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องเครื่องยูวี-วิไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750 โดยใช้ความยาวคลื่น 350 ถึง 2500 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมไปทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน และค่าอุณหภูมิสูงในช่วง 303 – 473 เคลวิน และค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงด้วยวิธี

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว

1. ต่อวงจรและใช้โปรแกรมร่วมกับ โดยป้อนแรงดันและวัดกระแสที่ได้
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ

3. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

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

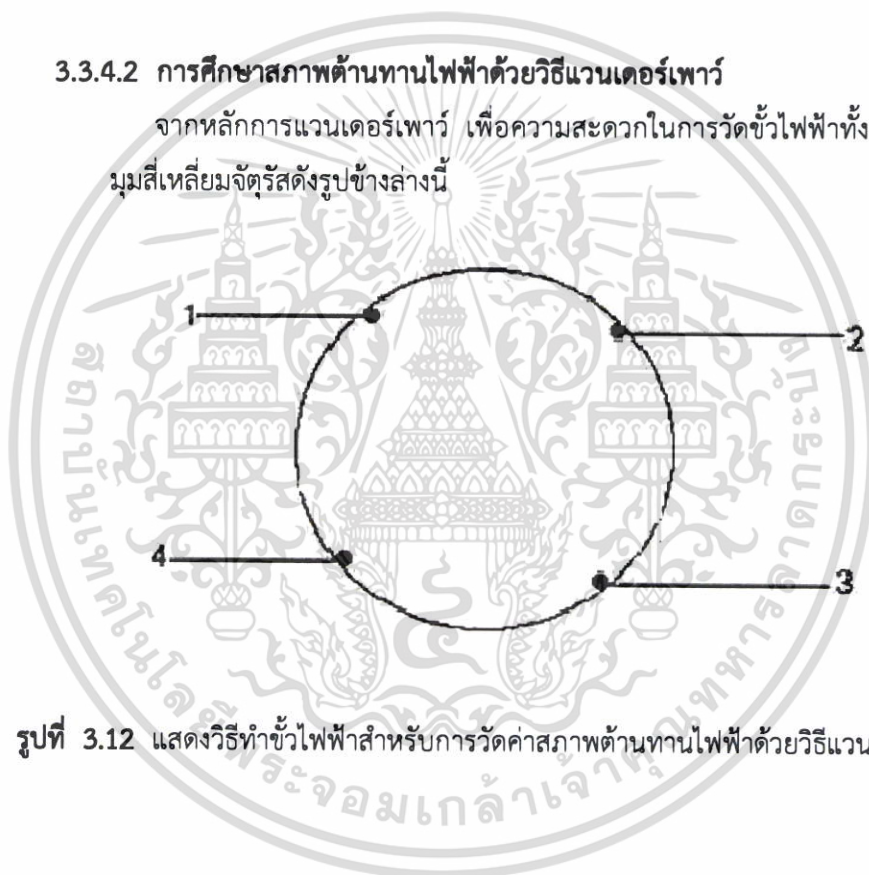
เมื่อ R คือ ค่าความชันกราฟ

w คือ ความกว้างของฟิล์มบาง

l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง

3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

จากหลักการแวนเดอร์เพาว์ เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



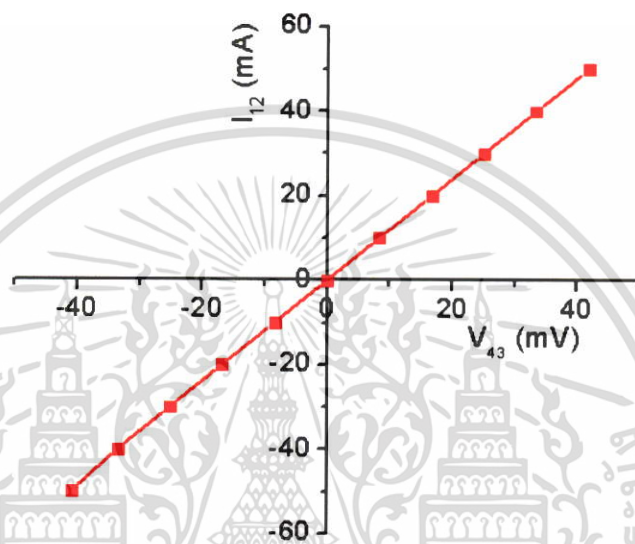
รูปที่ 3.12 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยโดยการวัดค่าความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์จากนั้นเริ่มตามขั้นตอนดังนี้

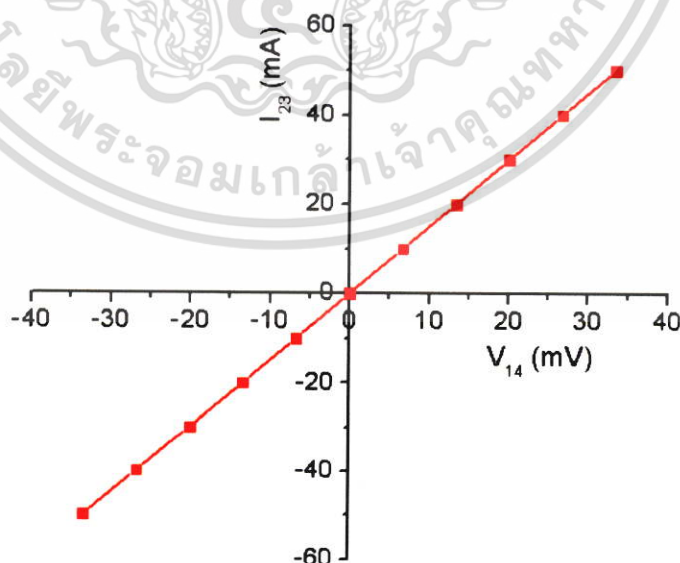
1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดย ทำการวัดความต่างศักย์ V_{43} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนเป็นจ่ายกระแสทางขั้ว 2 และออกทางขั้ว 3 โดย ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{14} แทน
3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (I_{12}) กับ (V_{43}) และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (I_{23}) กับ (V_{14}) แล้วคำนวณหาค่าความชันของทั้ง 2 กราฟจะได้ R_1 และ R_2



รูปที่ 3.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

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

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

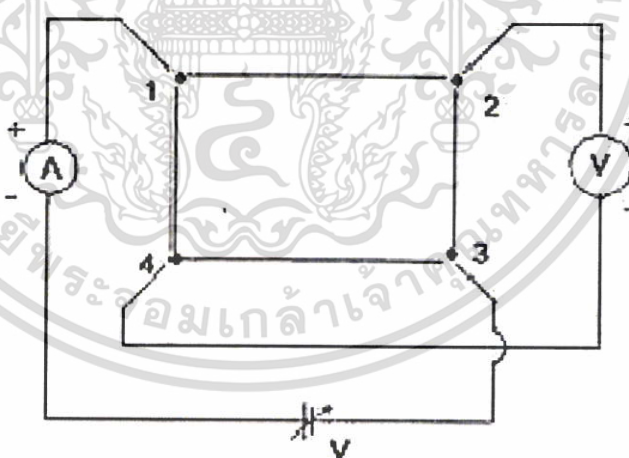
5. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากสูตร

$$\rho = R_{sh} d$$

เมื่อ d คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 5×10^{-5} เซนติเมตร

3.3.4.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

ทำขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดตั้งรูปข้างล่าง และเริ่มทำการทดลองดังนี้

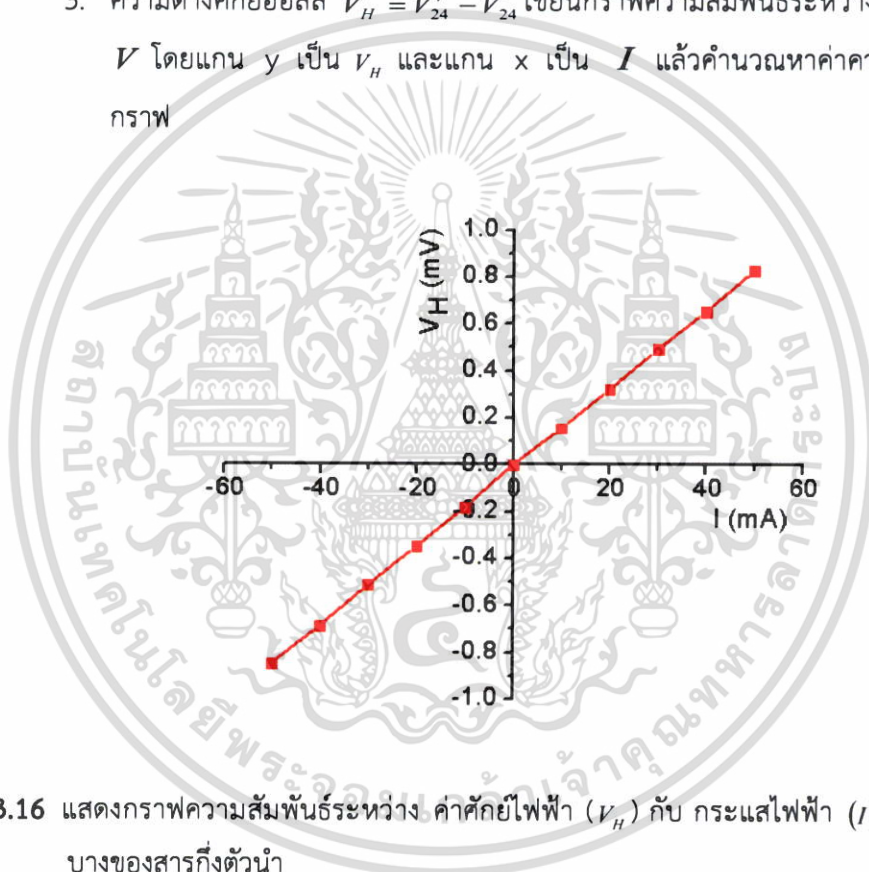


รูปที่ 3.15 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

1. ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B=0$) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วัดค่าความต่างศักย์ V_{24} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามนาฬิกาแล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
- นำตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก ($B \neq 0$) ความต่างศักย์ V_{24} ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสดำเดิมในที่นี้เรียกว่า V'_{24} เนื่องจากมีผลจากความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ V_H เข้ามาเกี่ยวข้องจ่ายกระแส ($I = -0.6$ ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์) แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ V'_{24}
 - ความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H = V'_{24} - V_{24}$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V โดยแกน y เป็น V_H และแกน x เป็น I แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ



รูปที่ 3.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

- คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ จากสูตร

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

เมื่อ $\left(\frac{V_H}{I} \right)$ คือ ค่าความชันของกราฟ

B คือ สนามแม่เหล็ก มีค่า 4600 เกาส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่า 5×10^{-5} เซนติเมตร

5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ (n) จากสูตร

$$n = \frac{1}{qR_H}$$

เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} คูโลมบ์

6. คำนวณหาค่าสภาพคล่องของฮอลล์ (μ_H) จากสูตร

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

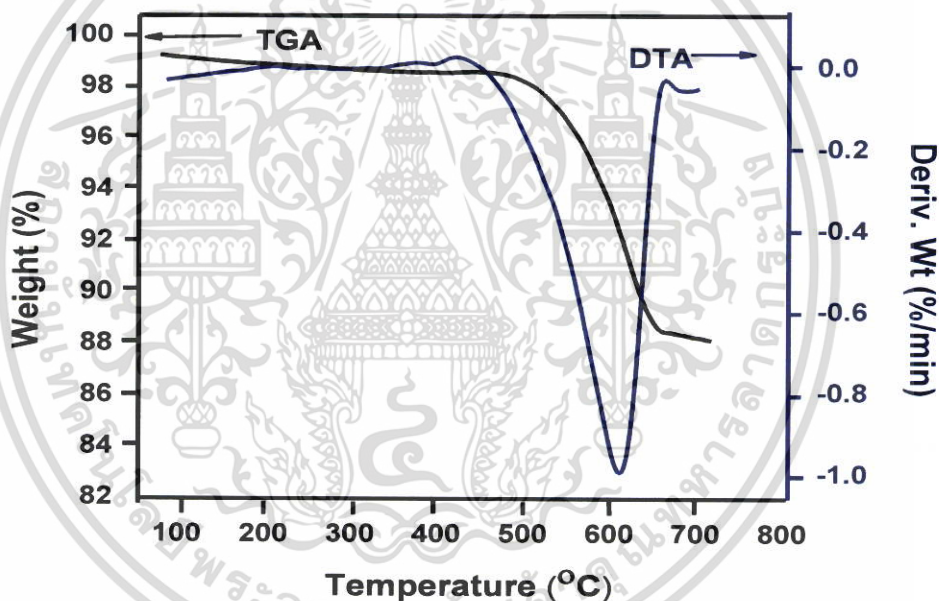
ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศที่ความดัน 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (X) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จะให้อุณหภูมิแก่ สารตั้งต้นเท่ากับ 645-668 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 530-593 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาทีและ 5 นาที จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และตลอดจนทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อทำการคำนวณหาค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnSe ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

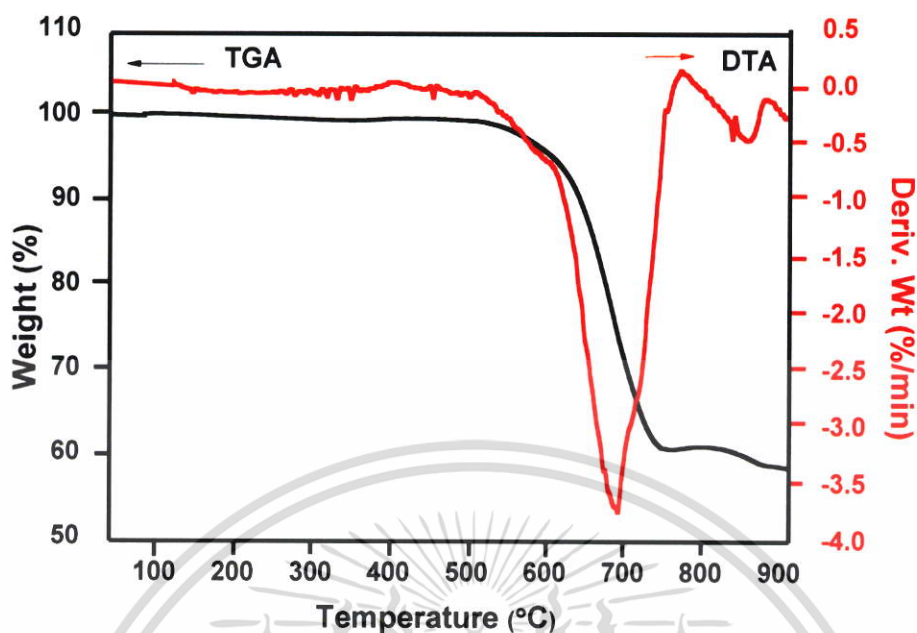
เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ภายใต้บรรยากาศก๊าซออกซิเจน โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0-800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะบ่งชี้บ่งบอกว่าสารตัวอย่าง มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือปฏิกิริยาสลายความชื้น (dehydration) โดยใช้สารตั้งต้น 0.01 มิลลิกรัม

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ปริมาณของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300-660 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ไป 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เป็นของแข็ง $\text{SnS}(s)$ เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ $\text{SnS}(g)$ ดังนั้นอุณหภูมิในช่วง 650-740 องศาเซลเซียส จึงถูกเลือกเป็นอุณหภูมิของสารตั้งต้น ซึ่งรายงานโดยงานวิจัยของ Tan. et al. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

al. (2014). และจากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ปริมาณของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 630-690 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ไป 25 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ที่เป็นของแข็ง SnSe(s) เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ SnSe(g) ดังนั้นอุณหภูมิในช่วง 630-690 องศาเซลเซียส จึงถูกเลือกเป็นอุณหภูมิของสารตั้งต้น ซึ่งอุณหภูมิของสารตั้งต้นที่ถูกเลือกจะอิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค อิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคลักษณะพื้นผิวและค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งรายงานโดยงานวิจัยของ Chen. Et al. (2018).



รูปที่ 4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

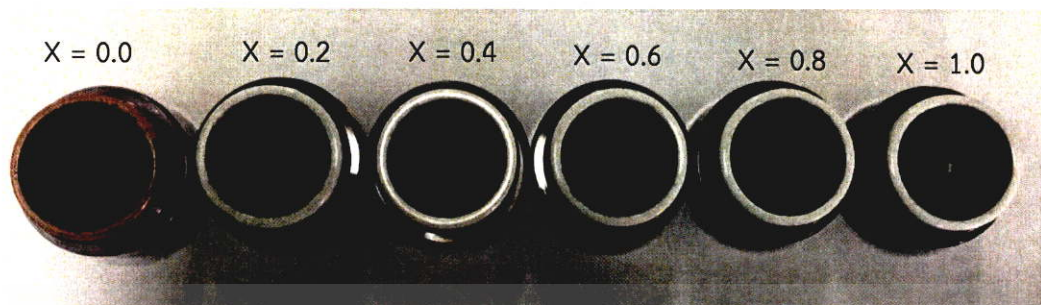


รูปที่ 4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

4.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ที่เศษส่วน โดยโมลอะตอม (X) = 0 ที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีเทา มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุนและที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (X) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีดำซึ่งแตกต่างไปจากสารตั้งต้น มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนแม้ทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnSe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 668 และ 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 593 และ 571 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นอยู่ในช่วง 645-655 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับอยู่ในช่วง 530-559 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที ภาพถ่ายของสารตั้งต้นและภาพถ่ายของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมได้ จะแสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที



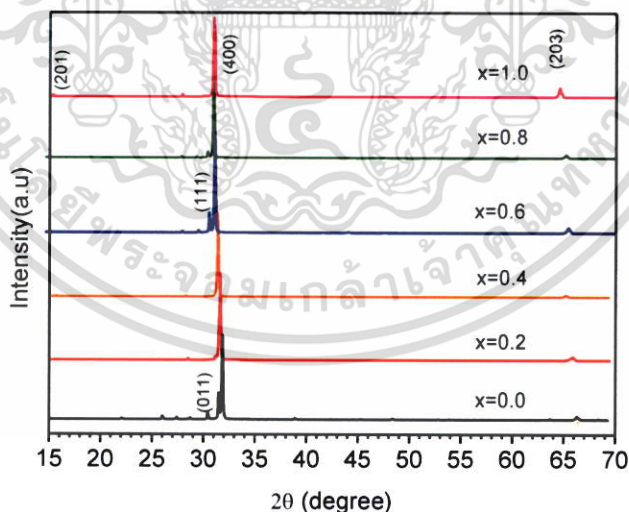
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

จากรูปที่ 4.5 เป็นการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด กรณีฟิล์มบางของสารประกอบ SnS จะแสดงลักษณะสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีพิคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 31.997 องศา ตรงกับระนาบผลึก (400) สำหรับกรณีที่เจือด้วยสารประกอบ SnSe พบว่าเฟสมีการเลื่อนไปทางซ้ายซึ่งก็คือพิคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางค่ามุมเลี้ยวเบน 2θ ที่เล็กลง และในกรณีที่ฟิล์มบางของ [32]



รูปที่ 4.5 แสดงพิคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	2θ	(h,k,l)	Lattice Constant (Å)			Volume (Å) ³
			a	b	c	
0.0	26.450	(201)	11.1434	3.9650	4.3252	191.108
	30.574	(011)				
	31.609	(111)				
	31.999	(400)				
	66.900	(203)				
0.2	15.775	(200)	11.2637	3.9614	4.3277	193.109
	30.575	(011)				
	31.600	(111)				
	31.726	(400)				
	66.900	(203)				
0.4	15.575	(200)	11.3717	4.0026	4.3250	196.618
	30.550	(011)				
	31.275	(111)				
	31.450	(400)				
	66.900	(203)				
0.6	15.575	(200)	11.3964	4.0615	4.3247	200.165
	30.500	(011)				
	30.841	(111)				
	31.376	(400)				
	66.900	(203)				
0.8	15.500	(200)	11.4515	4.0892	4.3231	202.444
	30.475	(011)				
	30.644	(111)				
	31.226	(400)				
	66.900	(203)				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะเวลา 10 นาที

Composition (x)	2θ	(h,k,l)	Lattice Constant (Å)			Volume (Å) ³
			a	b	c	
1.0	15.500	(200)	11.5186	4.2013	4.4558	215.637
	30.225	(011)				
	30.944	(111)				
	47.200	(400)				
	64.767	(203)				

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะเวลา 10 นาที พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลต่อม $0.0 \leq x \leq 1.0$ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ระนาบผลึกที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก ของทั้ง SnS และ SnSe คือระนาบ (400) ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

และ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.00)$$

สัมประสิทธิ์ของการจัดเรียงระนาบ (texture coefficient) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$T = \frac{\left(\frac{I_{\text{measure}}}{I_{\text{standard}}} \right)}{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{I_{\text{measure}}}{I_{\text{standard}}} \right)} \quad (4.01)$$

เมื่อ N คือจำนวนพีคที่ปรากฏ I_{measure} คือความเข้มของพีคที่วัดได้ จากเครื่องเอกซเรย์ และ I_{standard} คือ ความเข้มของพีคตามมาตรฐาน JCPDS

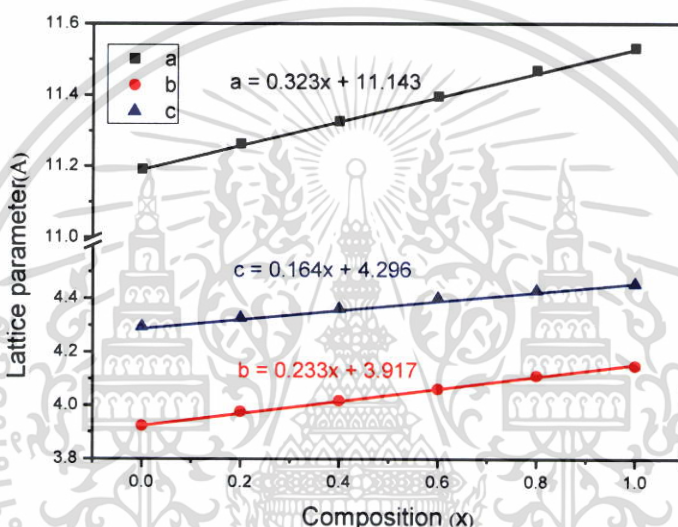
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่โครงผลึก a,b และ c สัมพันธ์กับเศษส่วนโมล (x) แบบเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องดีกับ กฎของวีการ์ต (Vegard’s law) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$a = 0.323x + 11.143$$

$$b = 0.233x + 3.917$$

$$c = 0.164x + 4.296$$



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_{1-x}Se_x นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [33] สำหรับกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ SnSe สามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากสมการ [33]

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{4.02}$$

$$D = \frac{(0.94)(0.154 \times 10^{-9})}{\frac{2\pi(0.16)}{360} \times \cos\left(\frac{31.999}{2}\right)} = 55.81 \text{ nm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้ง ขนาดของเกรนสามารถหาค่าได้จากพิกของความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้วิธี วิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall method) ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาผลของค่าความเครียดของสาร ตัวอย่างมาคำนวณด้วยซึ่งสมการคือ

$$\beta = \beta_D + \beta_s \quad (4.03)$$

$$\beta = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} + (4\varepsilon \tan \theta) \quad (4.04)$$

$$\beta \cos \theta = \left(\frac{k\lambda}{D} \right) + (4\varepsilon \sin \theta) \quad (4.05)$$

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \left(\frac{k}{D} \right) + \left(\frac{4\varepsilon \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (4.06)$$

เมื่อ D คือ ค่าขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

β คือ ระยะเวลาความกว้างของพิกที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าเป็น ครึ่งหนึ่ง ของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

ε คือ ค่าความเครียด

เมื่อทราบค่า β , θ และ λ จากผลการทดลองก็สามารถคำนวณหาค่า ε ได้

ส่วนความหนาแน่นดิสโลเคชัน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

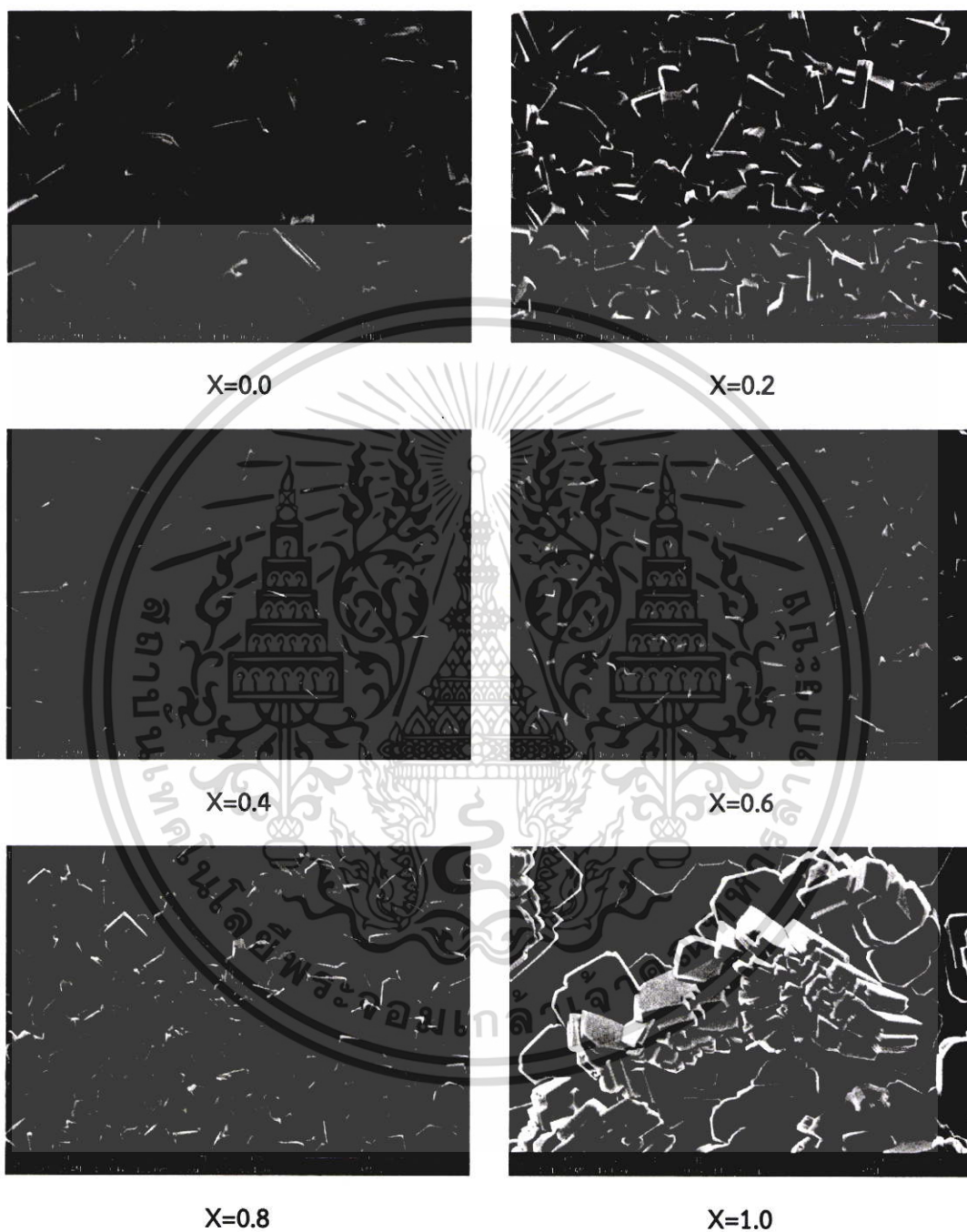
$$\text{Dislocation density} = \frac{1}{D^2} \quad (4.07)$$

4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกิ่งตัวนำได้
 ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกิ่งตัวนำ
 $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการ
 ระเหิด 10 นาที

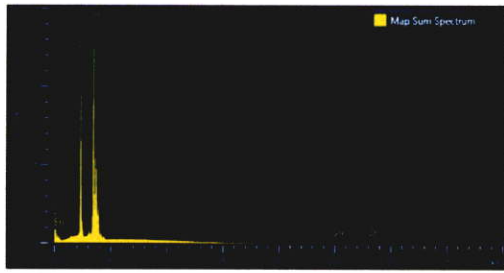
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	Texture Coefficient	Grain size (nm) From XRD	Dislocation Density (line/m ²)	Strain (ϵ)
0.0	3.006	55.81	32.10×10^{13}	1.74×10^{-4}
0.2	3.798	55.77	32.15×10^{13}	1.40×10^{-4}
0.4	2.502	55.73	32.19×10^{13}	1.39×10^{-4}
0.6	3.354	55.72	32.20×10^{13}	1.38×10^{-4}
0.8	3.302	55.70	32.23×10^{13}	1.38×10^{-4}
1.0	2.163	55.66	32.27×10^{13}	1.88×10^{-4}

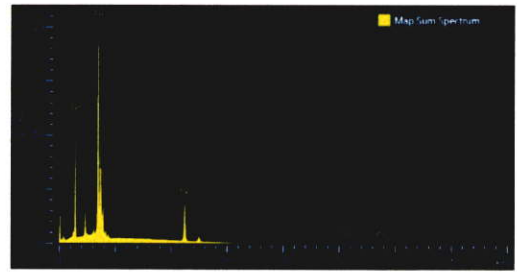
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาคาร์วิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดด้วย EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิด และปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



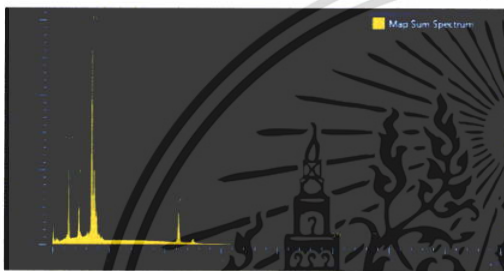
Full Scale 2765 Cursor. 0.000

X=0.0



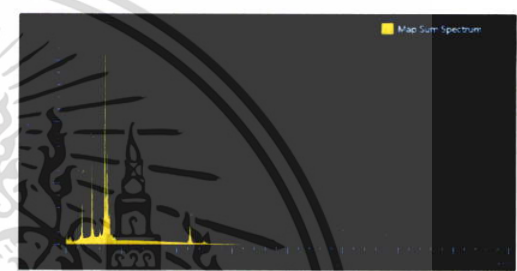
Full Scale 3121 Cursor. 0.000

X=0.2



Full Scale 3105 Cursor. 0.000

X=0.6

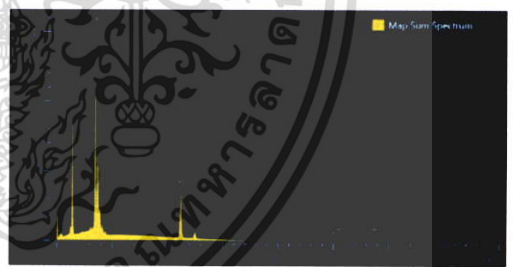


Full Scale 3176 Cursor. 0.000 X=0.4



Full Scale 2765 Cursor. 0.000

X=0.8



Full Scale 2765 Cursor. 0.000

X=1.0

รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

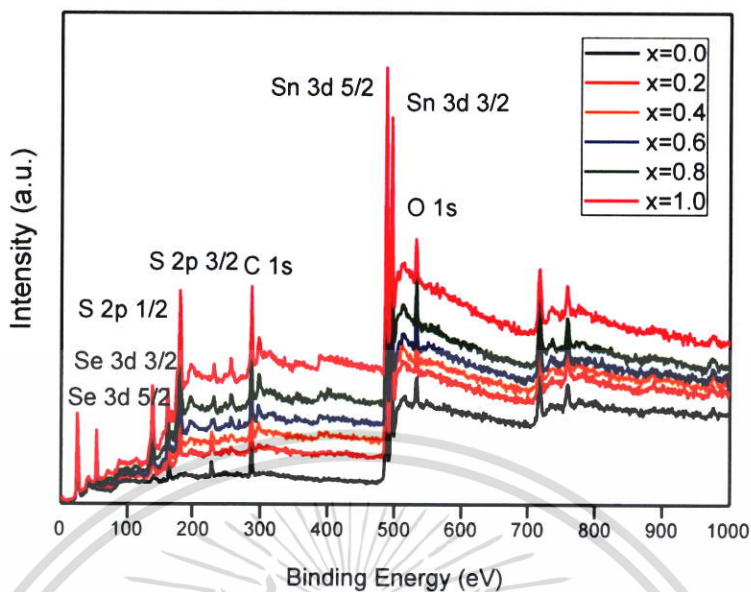
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

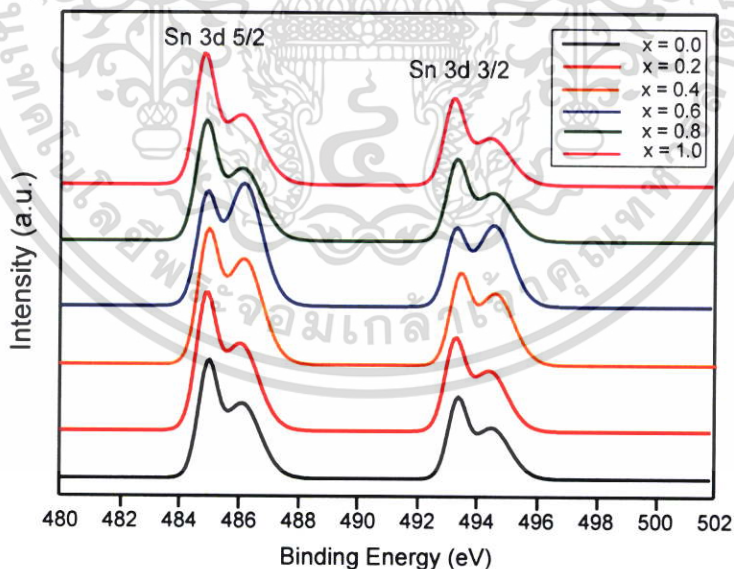
Composition (x)	Weight (%)			Atomic (%)		
	Sn	S	Se	Sn	S	Se
X=0.0	80.20	19.80	-	52.25	47.25	-
X=0.2	69.10	10.15	20.75	50.15	27.24	22.63
X=0.4	69.47	10.97	19.76	49.97	28.67	21.36
X=0.6	63.14	6.33	30.53	47.67	17.69	34.65
X=0.8	61.64	3.20	35.16	48.79	9.37	41.84
X=1.0	57.78	-	42.22	47.66	-	52.34

4.3.4 ผลการศึกษาสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับแก้วกระจกสไลด์ โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) เพื่อเป็นการระบุชนิดของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบาง

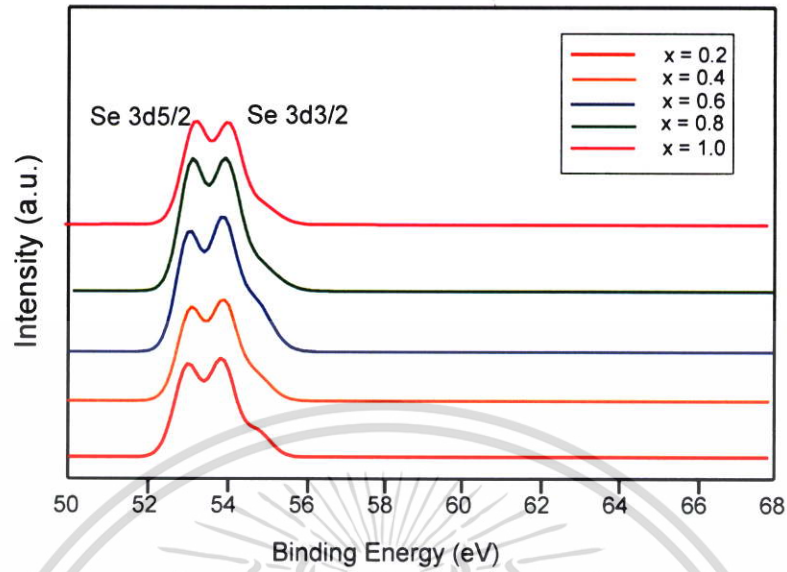


รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

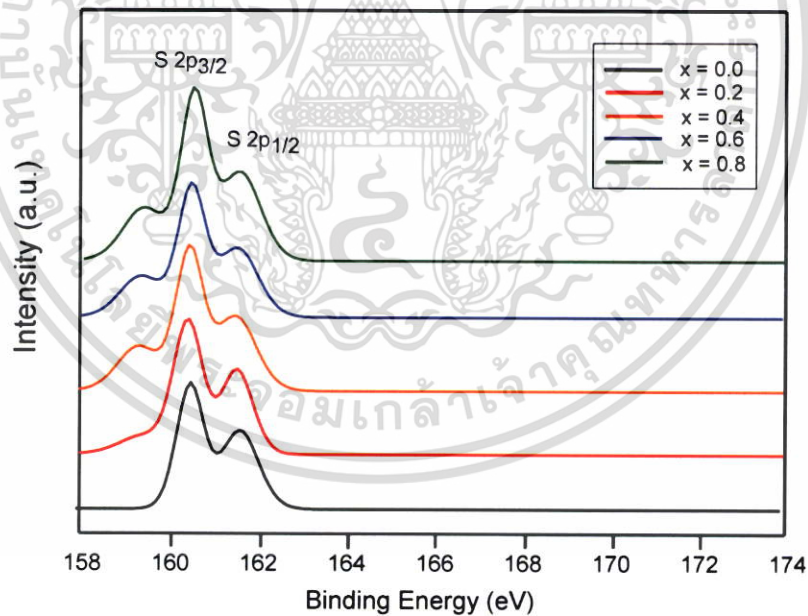


รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 485-495 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 160-163 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 53-55 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS พบธาตุ Sn คือ Sn3d_{5/2} และ Sn3d_{3/2} ที่พลังงาน 485.1-485.5 และ 493.2-494.1 eV ดังรูปที่ 4.10 ตามลำดับ ธาตุ S คือพบ S2p_{5/2} และ S2p_{3/2} ที่พลังงาน 160.9-161.1 และ 162.1-162.2 eV ดังรูปที่ 4.11 ตามลำดับ และธาตุ Se คือพบ Se3d_{5/2} และ Se3d_{3/2} ที่ระดับพลังงาน 53.0-53.4 eV และ 53.8-54.2 ดังรูปที่ 4.12 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ มีค่า ใกล้เคียงกับของ Cheng. Et al. (2011)

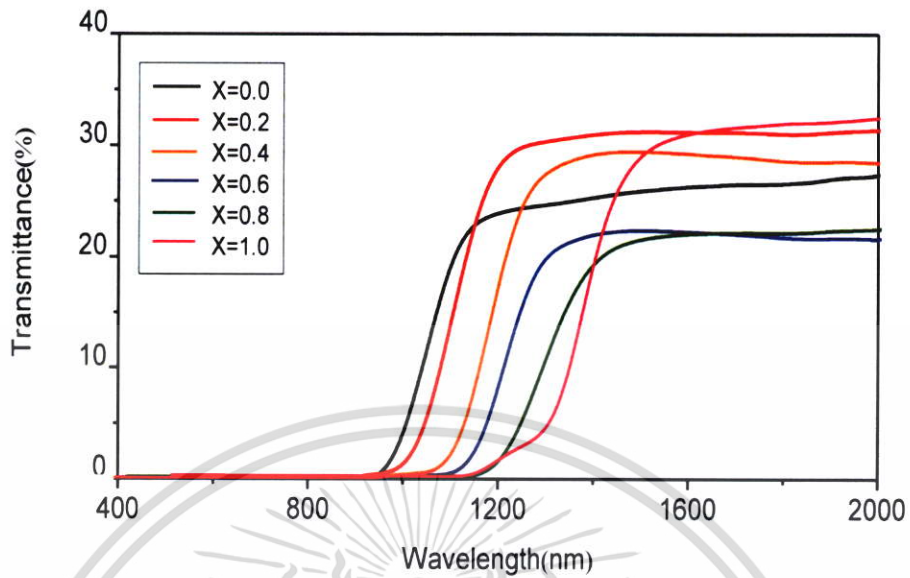
ตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Binding Energy (eV)					
	Sn		S		Se	
	3d _{5/2}	3d _{3/2}	2p _{5/2}	2p _{3/2}	3d _{5/2}	3d _{3/2}
0.0	485.4	493.2	161.1	162.2	-	-
0.2	485.5	493.6	160.9	162.1	53.3	54.2
0.4	485.5	494.1	160.9	162.0	53.4	54.1
0.6	485.4	493.8	161.0	162.0	53.0	53.8
0.8	485.2	493.8	160.9	162.1	53.1	53.9
1.0	485.1	493.6	-	-	53.2	54.0

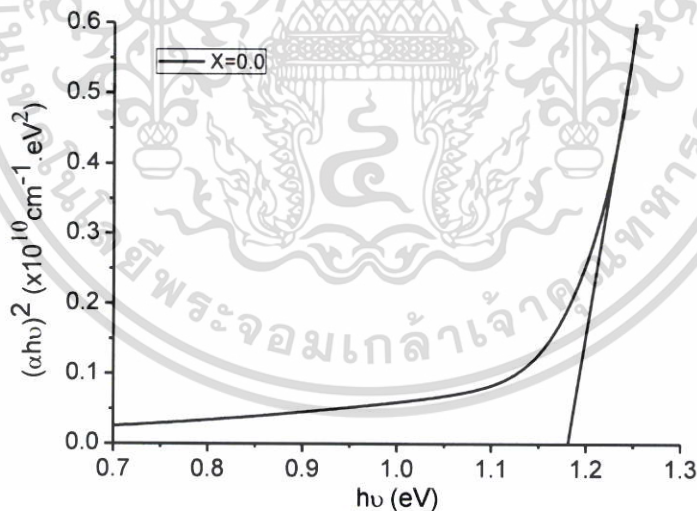
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

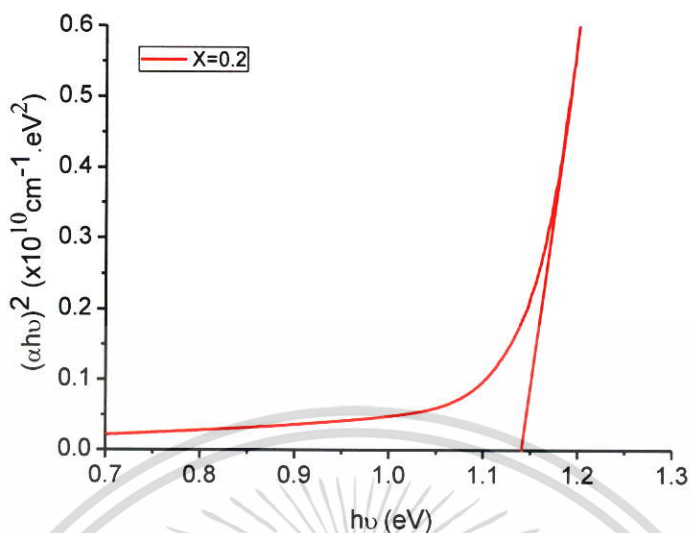


รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

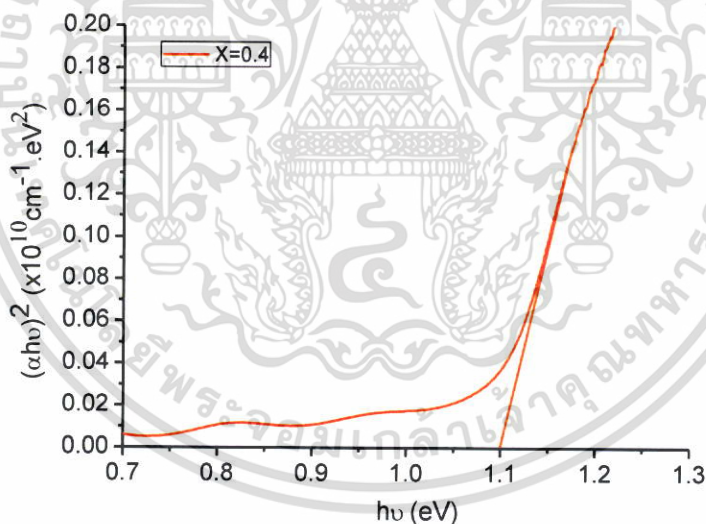


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

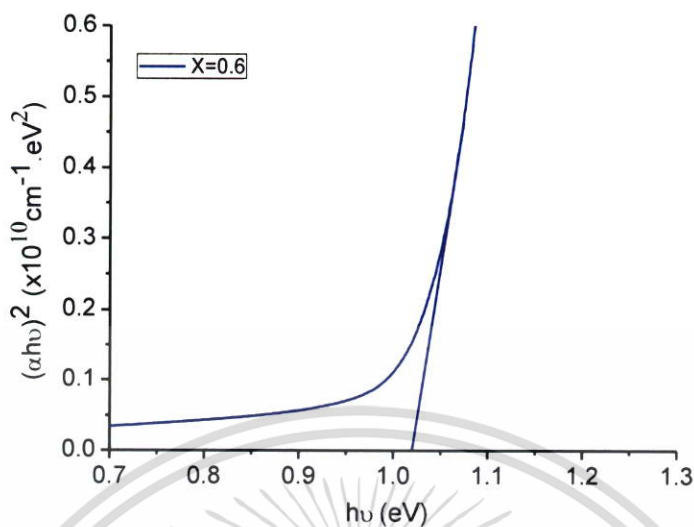


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.2$

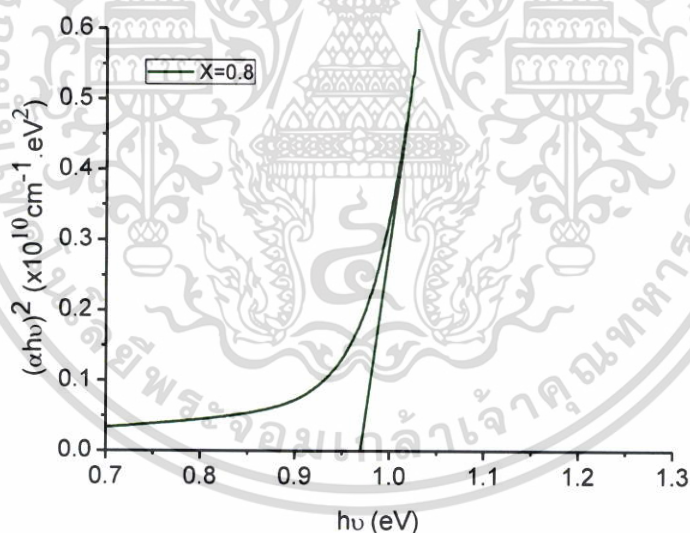


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

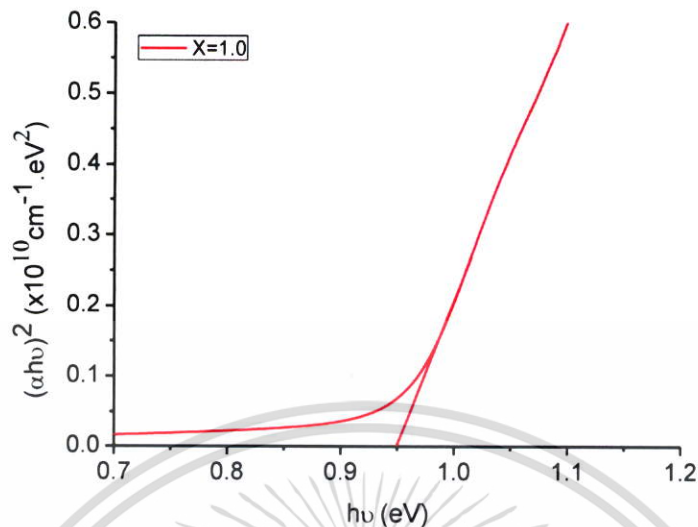


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.6$

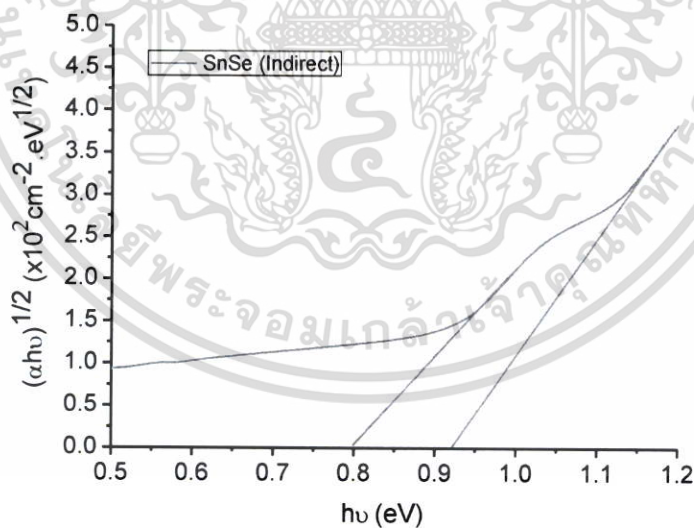


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

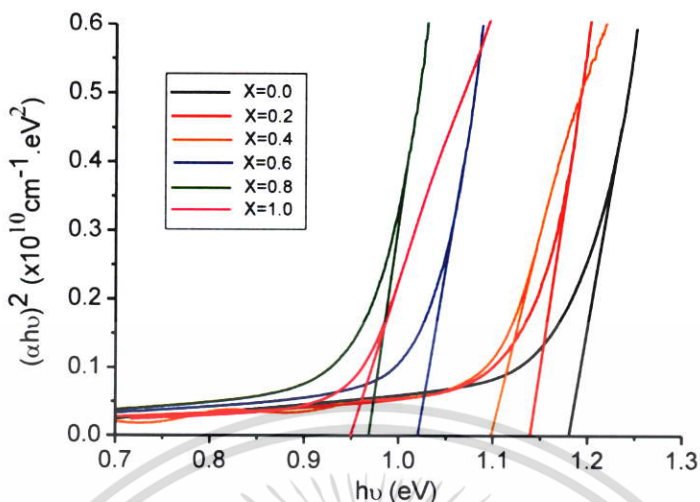


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$ (ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง)



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$ (ช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

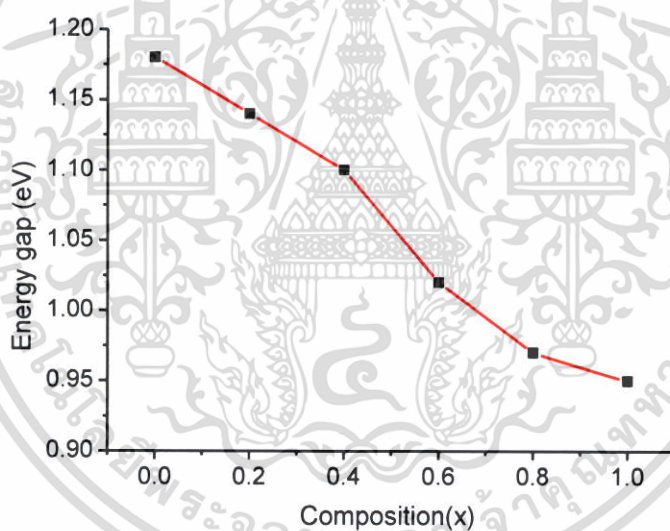


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ X เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ พบว่าที่เศษส่วนโดยโมลของ $x=1.0$ (SnSe) ดังรูปที่ 4.20 มีช่องว่างแถบพลังงาน แบบตรง (Direct gap) และแบบเฉียง (Indirect gap) ซึ่งแบบเฉียงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานมี 2 ค่า คือ 0.80 และ 0.92 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi, et al. (2012)

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	Energy Gap (eV)
0.0	1.18
0.2	1.14
0.4	1.10
0.6	1.02
0.8	0.97
1.0	0.95 (Direct gap) 0.8,0.92 (Indirect gap)



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

จากรูปที่ 4.22 พบว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ลดลงเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องดีกับผลการทดลอง [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที ในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้สนามแม่เหล็กถาวรและไม่มีสนามแม่เหล็ก ตลอดจนการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบาง เพื่อใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ

4.5.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีความกว้างเป็น w มีความยาว l มีความต้านทาน R และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบแผ่น (R_{sh}) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$R_{sh} = R \left(\frac{w}{l} \right) \quad (4.08)$$

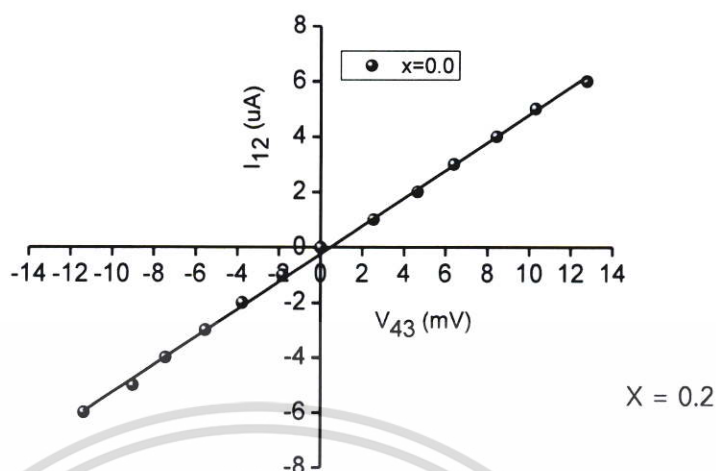
โดยที่ R คือ ความต้านทานที่วัดได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที ในระบบสุญญากาศ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์สามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ได้ ดังนี้

$$f = - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (4.09)$$

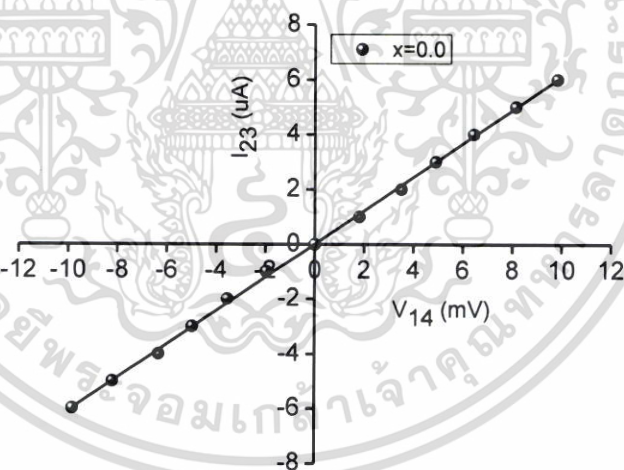
$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (4.10)$$

$$\rho = R_{sh} \times d \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

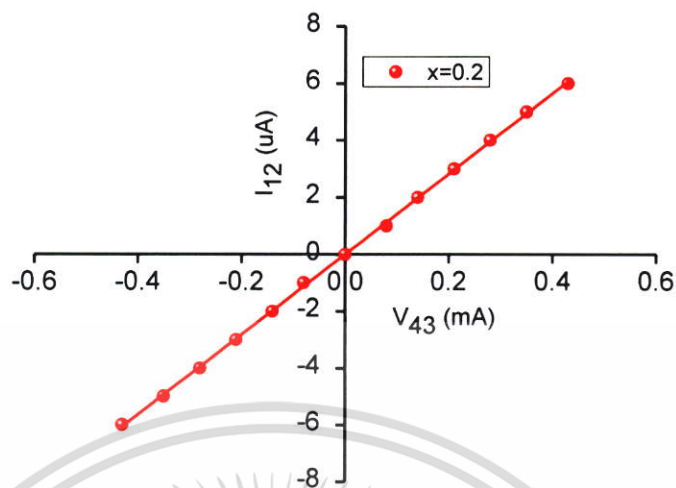


รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)

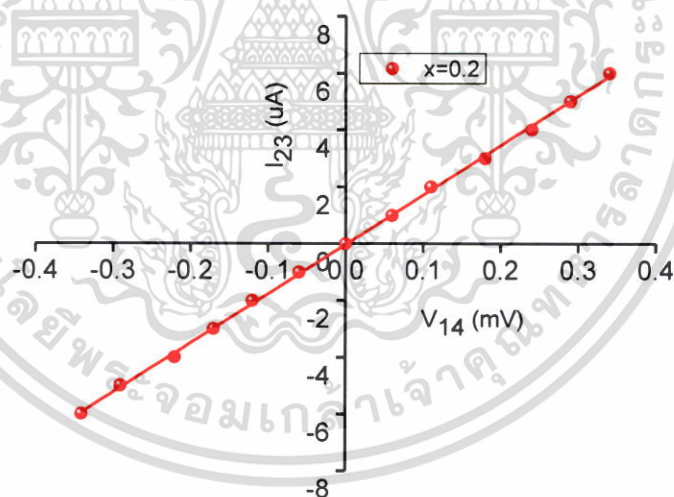


รูปที่ 4.24 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

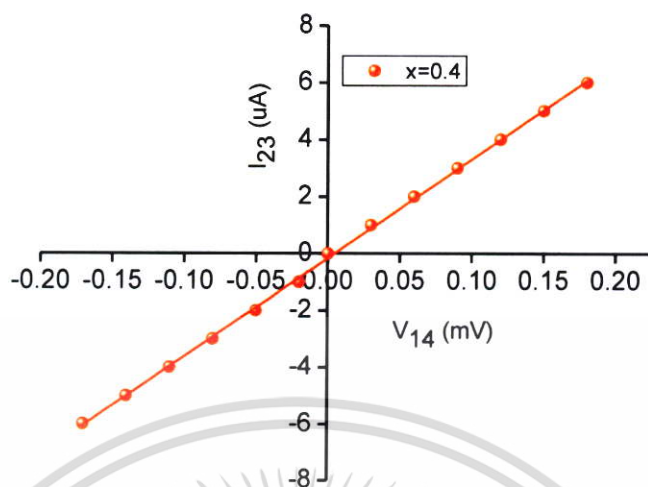


รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

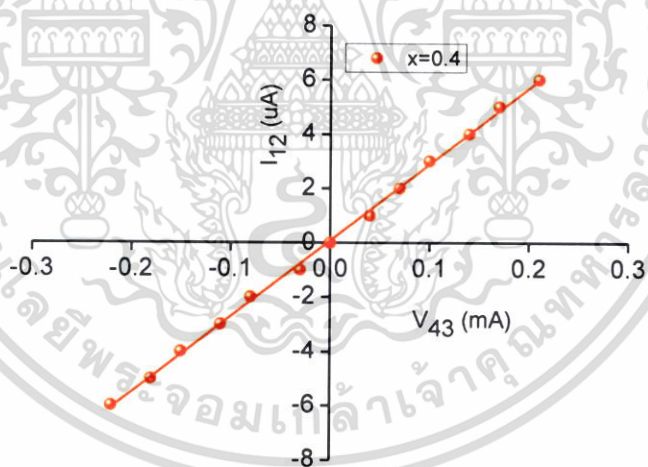


รูปที่ 4.26 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

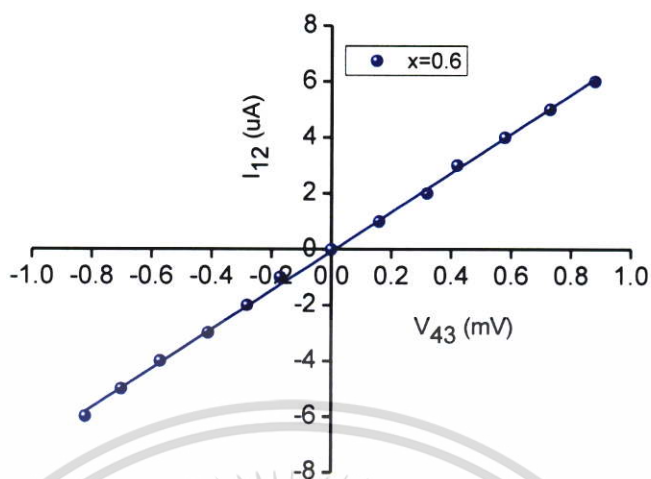


รูปที่ 4.27 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

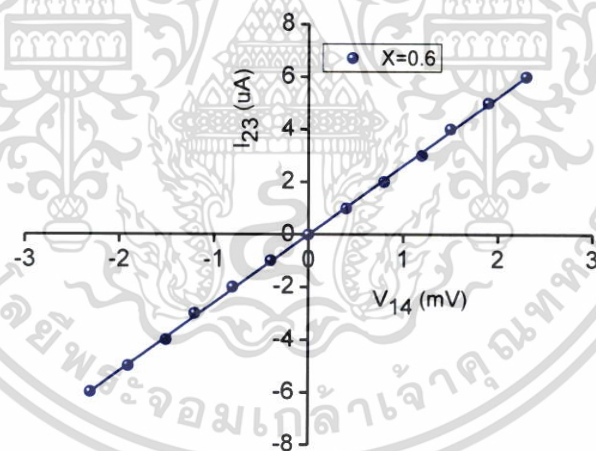


รูปที่ 4.28 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

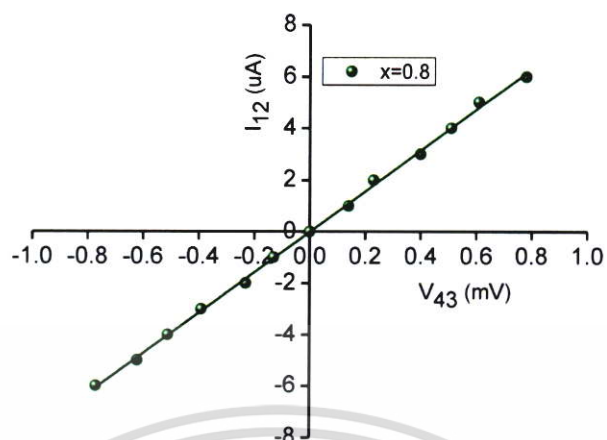


รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

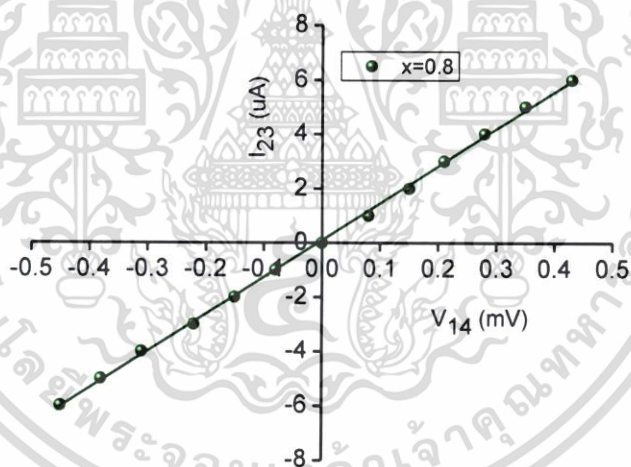


รูปที่ 4.30 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

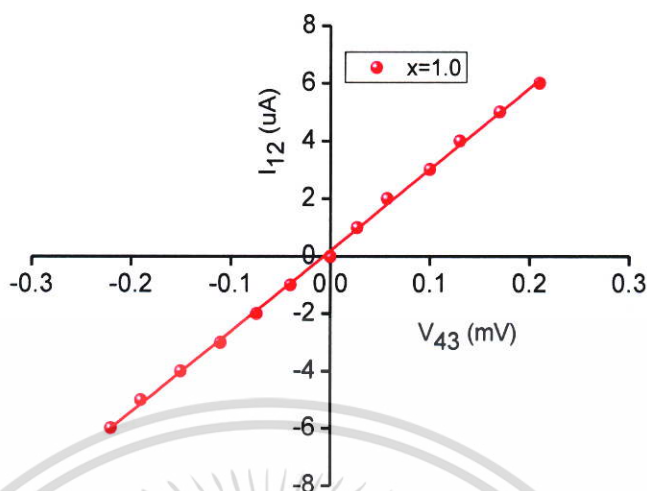


รูปที่ 4.31 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากกราฟวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

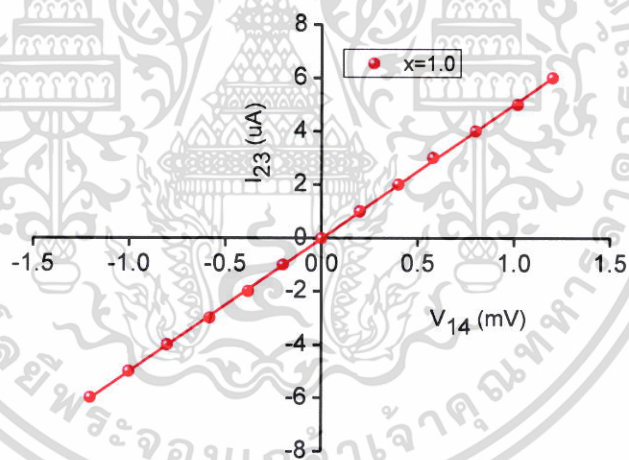


รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากกราฟวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



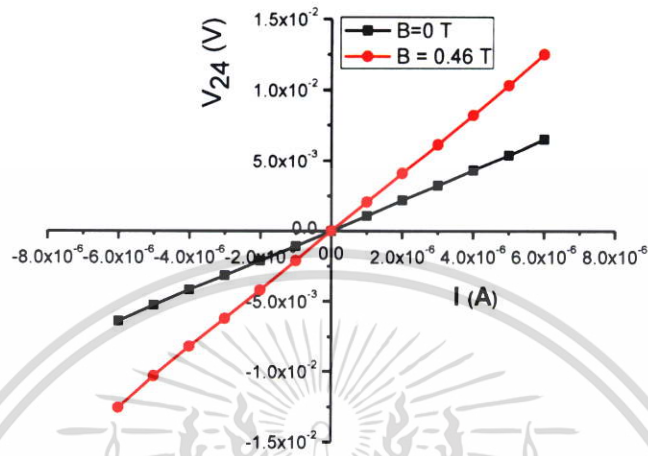
รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)



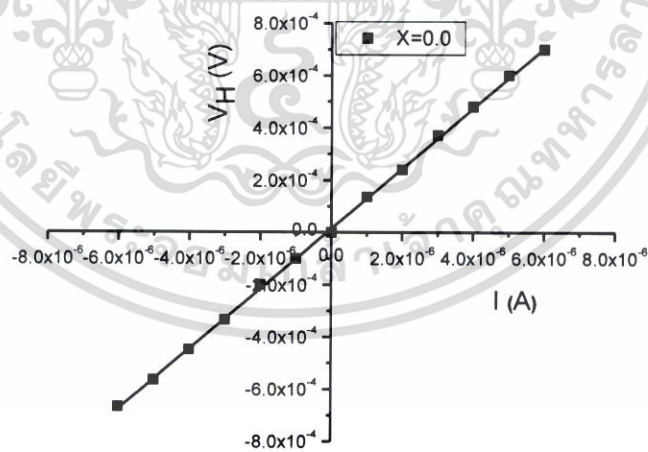
รูปที่ 4.34 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

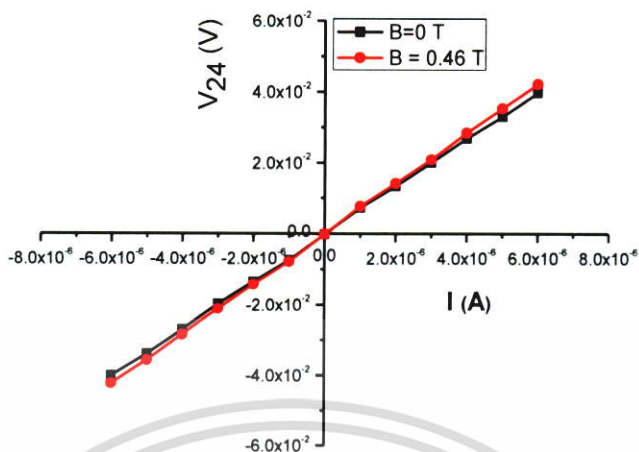


รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)

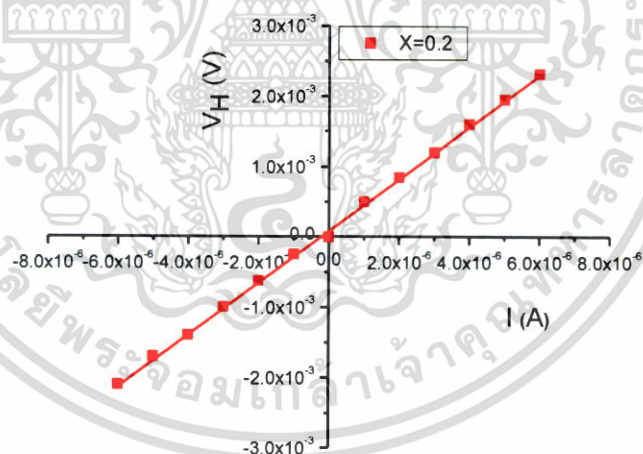


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

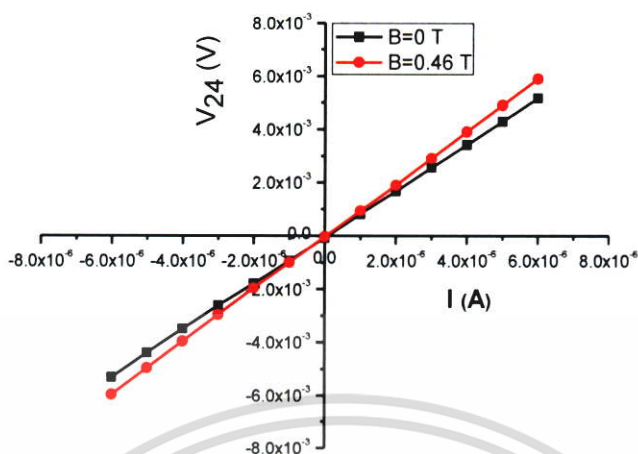


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

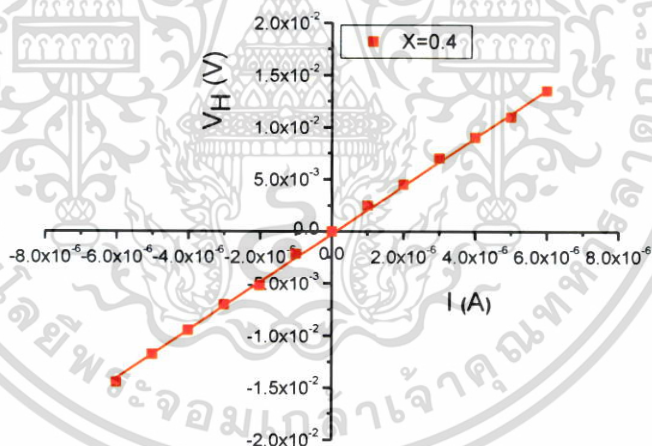


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

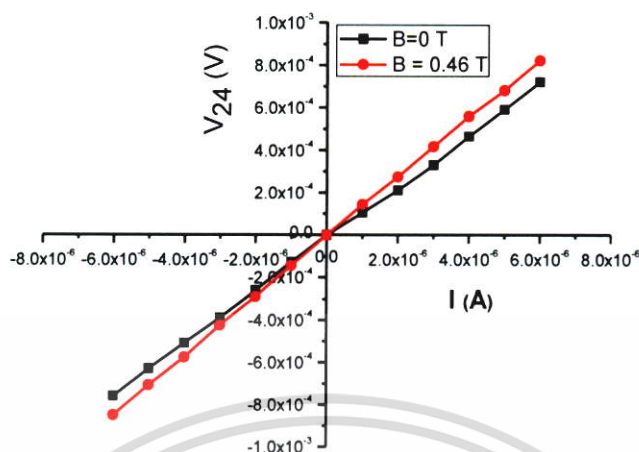


รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

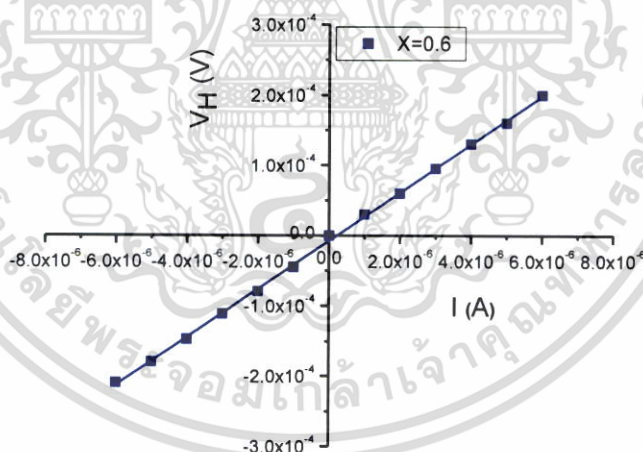


รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

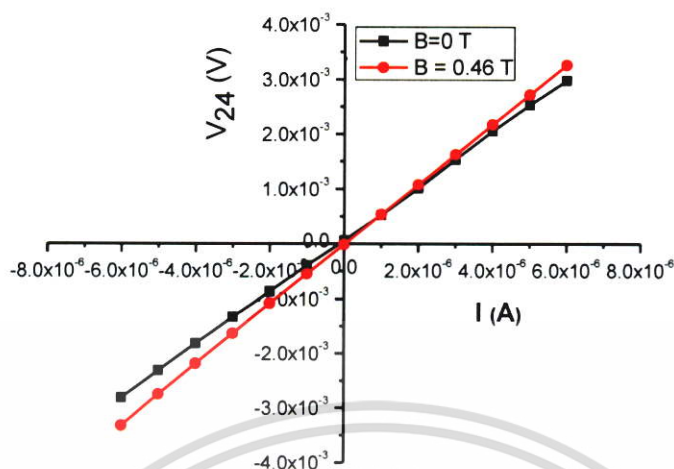


รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

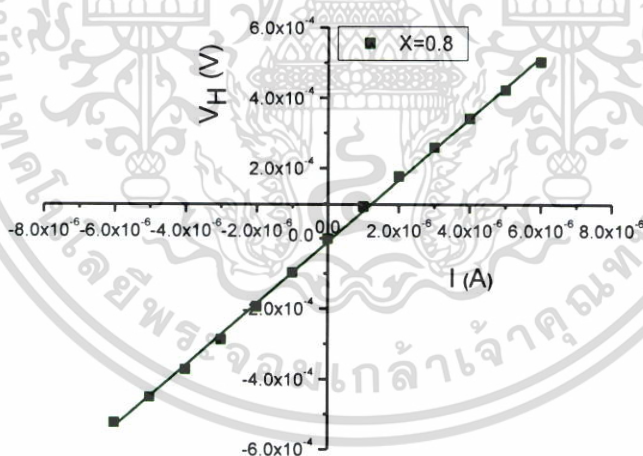


รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

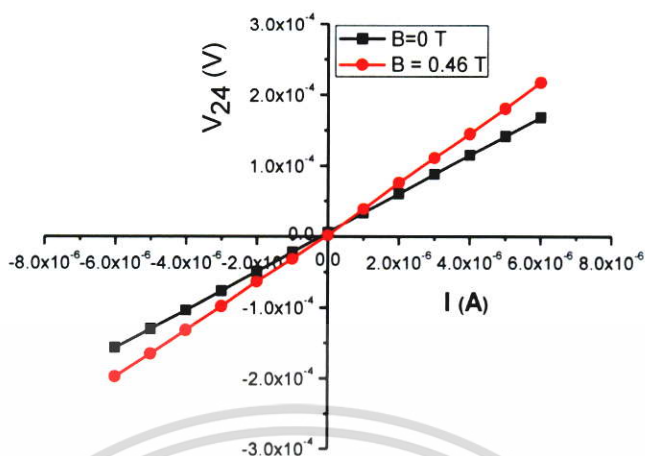


รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

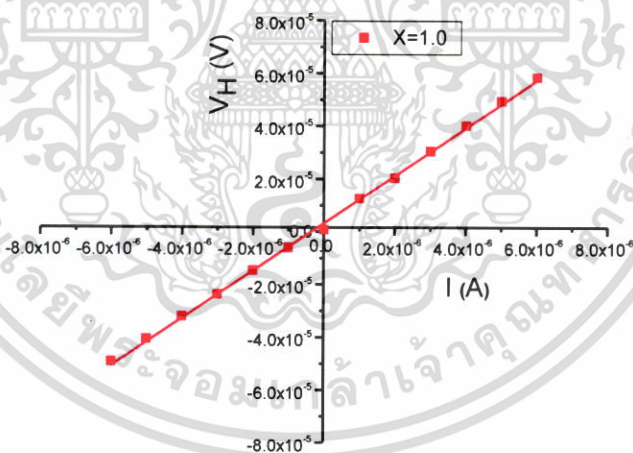


รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)

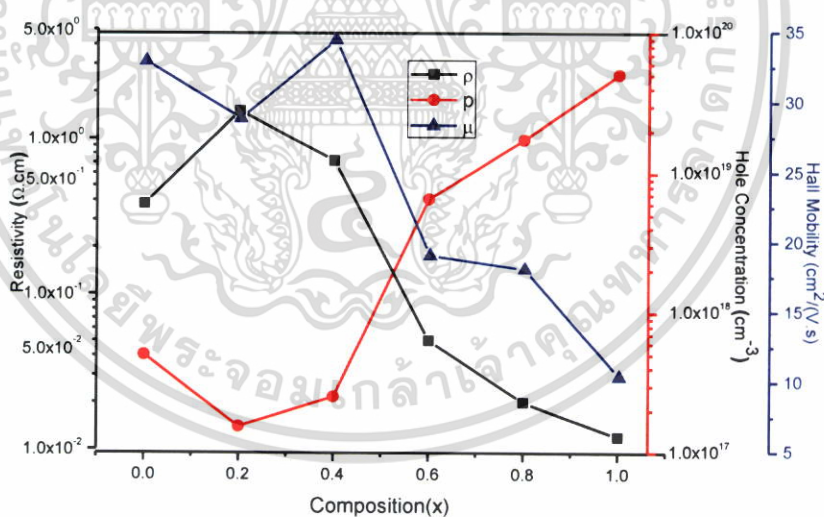


รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะเวลา 10 นาที

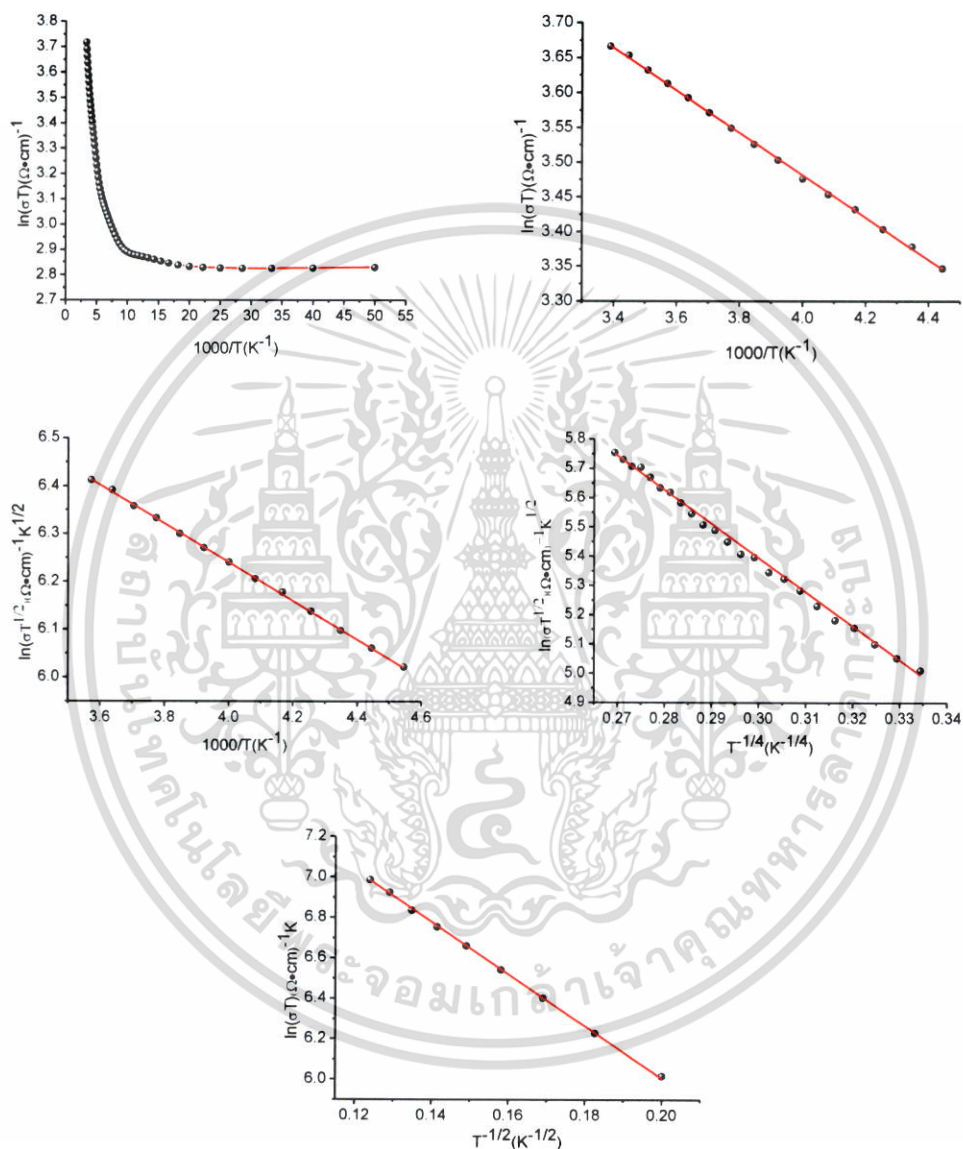
Composition (x)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Constant (cm^3/C)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)	Ref.
0.0	7.560×10^3	0.380	12.50	5.02×10^{17}	32.89	[35]
0.2	2.812×10^4	1.400	40.60	1.54×10^{17}	28.80	-
0.4	1.435×10^4	0.720	24.80	2.52×10^{17}	34.44	-
0.6	4.337×10^2	0.050	0.95	6.57×10^{18}	19.01	-
0.8	1.094×10^3	0.020	0.36	1.74×10^{19}	18.02	-
1.0	4.419×10^3	0.012	0.124	5.08×10^{19}	10.33	[36]



รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี้จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ ($x = 0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโตที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นกรณี $N_d < N_d^*$ เกรนของผลึกจะเป็นสถานะพร่องพาหะทั้งหมด (entirely depleted) เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.12)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (4.13)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (4.14)$$

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\text{ความชัน} = \frac{E_a}{1000k} \quad (4.15)$$

แทนค่า

$$E_a = \frac{1000k(\text{Slope})}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (4.16)$$

$$E_a = \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(-0.7132)}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.0615 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าเฟอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4.17)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของ SnS มีค่าเท่ากับ 10.64

$$\text{แทนค่า} \quad \epsilon_s = (10.64)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 9.416 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (4.18)$$

$$N_a = \frac{8 \epsilon_s E_b}{e^2 L^2} \quad (4.19)$$

แทนค่า $N_a = \frac{8(9.416 \times 10^{-13})(0.0615)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (55.81 \times 10^{-7})^2} = 9.295 \times 10^{20}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

-การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.20)$$

แทนค่า $L_D = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)(9.416 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (9.295 \times 10^{20})} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.286 \times 10^{-8}$ เซนติเมตร

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_t)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (4.21)$$

$$E_t = \frac{1}{2} E_g - E_a \quad (4.22)$$

แทนค่า $E_t = \frac{1}{2}(1.12) - 0.0615 = 0.4985$ อิเล็กตรอนโวลต์

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_t)

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.23)$$

$$N_t = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a \quad (4.24)$$

สามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะ (v_c) ได้จาก

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่า } v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)}{2\pi(0.2 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}} = 5.8129 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

สามารถหาค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่แถบวาเลนซ์ (N_v) ได้จาก

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.26)$$

มวลยังผลของ SnS และ SnSe มีค่าเท่ากับ $0.2m_0$ และ $0.15m_0$ ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } N_v &= 2 \left[\frac{2\pi(0.2 \times 9.1 \times 10^{-31}) \times 1.38 \times 10^{-23} \times 280}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{\frac{3}{2}} \\ N_v &= 2.0156 \times 10^{24} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร} \\ \text{ดังนั้น } N_i &= \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a \quad (4.27) \\ N_i &= \left[\frac{(55.81 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19})^2 (2.0156 \times 10^{24}) (9.295 \times 10^{20}) (5.8129 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (280) (1.5471 \times 10^{-9})} \right] \times \\ &\quad \exp\left(-\frac{0.0615 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 280}\right) + (55.81 \times 10^{-7} \times 9.295 \times 10^{20}) \\ &= 5.1875 \times 10^{15} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ เพื่อกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่ทะเลาะข้ามกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนได้ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour doners) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (4.28)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (4.29)$$

$$\text{ความชัน} = \frac{E_{NNH}}{1000k}$$

$$E_{NNH} = \frac{1000k}{1.6 \times 10^{-19}} (\text{ความชัน}) \quad (4.30)$$

$$E_{NNH} = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(-0.5406)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_{NNH} = 0.2649 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_{0,NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/3}}{4\pi\epsilon_s} \quad (4.31)$$

$$N_d = \left[\frac{E_{0,NNH} 4\pi\epsilon_s}{0.99e^2} \right]^3 \quad (4.32)$$

$$N_d = \left[\frac{(4\pi)(9.425 \times 10^{-13})(0.04663)(1.6 \times 10^{-19})}{0.99(1.6 \times 10^{-19})^2} \right]^3$$

$$N_d = 7.7712 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\rho_{0,NNH}$ คือ ค่าคงที่

N_d คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)

E_{NNH} คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{cl} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B} \quad (4.33)$$

สมการที่ (4.26) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $k > 0.5$ ค่า k นี้คือ อัตราส่วนของ $\frac{N_a}{N_d}$ (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left(\frac{N_0(E_F) e^2}{2\epsilon_2} \right)^{3/4} \left(\frac{1}{N_d} \right)^{1/2} \quad (4.34)$$

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_{cl}) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า ξ_{Mott} , N_d และ ϵ_s ตามลำดับ

จากสมการ
$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (4.35)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{0,NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (4.36)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาการระเหิด 10 นาที

Temperature Range (K)	$\sigma_{0,\text{NNH}}$ (S/cm) (10^3)	$E_{0,\text{NNH}}$ (meV)	T_{C1} (K)	N_a (cm^{-3}) (10^{19})	k
295-220	1.10	26.49	183.74	7.77	1

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^s \right] \quad (4.37)$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s} \quad (4.38)$$

ในกรณีที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว $s = \frac{1}{4}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยตัวเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างที่เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{(-1/4)}$ จาก ค่าความชันของกราฟเส้นตรง

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และ ค่าแฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (σ_0)

$$m = -T_0^{(1/4)} = -48.606$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{0,Mott} = (-14.5636)^4 = 4.4986 \times 10^4 \text{ เคลวิน}$$

$$c = \ln \sigma_0 = 8.5676$$

$$\sigma_0 = e^{9.6485} = 15.50 \times 10^3 \text{ S/cm ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ $[N(E_F)]$

โดยที่ $T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)}$ เมื่อ $\alpha = 2.3678 \times 10^7$ ต่อเซนติเมตร

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{kT_0} \quad (4.39)$$

$$N_0(E_F) = \frac{18(2.3678 \times 10^7)^3}{\left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}}\right)(4.4986 \times 10^4)}$$

$$N_0(E_F) = 2.358 \times 10^{22} \text{ eV}^{-1}$$

$$= 2.358 \times 10^{22} \text{ ต่ออิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{\text{hop,mott}}$)

โดยที่ $R_{\text{hop,mott}} = \left[\frac{9\xi_{\text{mott}}}{8\pi k_b TN(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$ (4.40)

$$R_{\text{hop,mott}} = \left[\frac{9}{8\pi \alpha \left[\frac{k_b}{q} \right] TN(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R_{\text{hop,mott}} = \left[\frac{9}{8\pi (2.3678 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (190) (6.1584 \times 10^{22})} \right]^{\frac{1}{4}}$$

เมื่อ $T = 190$ เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \left(\frac{9}{6.0057 \times 10^{29}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$= 2.027 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด ($W_{\text{hop,Mott}}$)

$$\text{โดยที่ } W_{\text{hop,mott}} = \frac{3}{4\pi R_{\text{hop,mott}}^3 N(E_F)} \quad (4.41)$$

$$= \frac{3}{4\pi (6.2219 \times 10^{-8})^3 (6.1584 \times 10^{22})} = \frac{3}{1.8640 \times 10^2}$$

$$= 1.630 \times 10^{-2} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ $\alpha R_{\text{hop,Mott}} = (2.3678 \times 10^7) (6.2219 \times 10^{-8})$

$$\alpha R_{\text{hop,Mott}} = 1.4732$$

$$\xi_{\text{Mott}} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{2.3678 \times 10^7} = 4.2233 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}$$

และ $\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}} > 1$

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$T_{C1} = \frac{e^2 N_d^{\frac{2}{3}} \xi_{\text{Mott}}^{\frac{2}{3}}}{k_B (4\pi \epsilon_s)} \quad (4.42)$$

$$T_{C1} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.2384 \times 10^{19})^{\frac{2}{3}} (4.2233 \times 10^{-8})^{\frac{2}{3}}}{(1.38 \times 10^{-23}) (4\pi) (9.425 \times 10^{-13})} = \frac{1.3102 \times 10^{-32}}{1.634 \times 10^{-34}}$$

$$= 26.84 \text{ เคลวิน}$$

$$\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,\text{Mott}}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{4.4986 \times 10^4}{190} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 3.94$$

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาการระเหิด 10 นาที

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพอส-ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพอส-ชล็อฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4.44)$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} + \ln \sigma_{0,ES} \quad (4.45)$$

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

Temperature Range (K)	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm) (10^3)	$T_{0,Mott}$ (K) (10^4)	$N_0(E_F)$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$) (10^{22})	T_{C1} (K)	$W_{hop,Mott}$ (meV)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$
190-80	15.50	37.55	2.35	26.84	16.30	20.71	3.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \epsilon_s} \quad (4.46)$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(1.5918 \times 10^2)(9.425 \times 10^{-13})}$$

$$\xi_{ES} = 3.4622 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร}$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของสมการดังกล่าวข้างต้น

$$T_{0,ES} = (-18.5159)^2 = 342.84 \text{ เคลวิน}$$

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} สามารถหาได้จากสมการที่ (4.46) ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \quad (4.47)$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1.5918 \times 10^2}{65} \right)^{1/2}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = 0.45$$

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

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \quad (4.48)$$

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

$$= \frac{1}{2} \frac{(1.38 \times 10^{-23})}{(1.6 \times 10^{-19})} (65) \left(\frac{1.5918 \times 10^2}{65} \right)^{1/2}$$

$$= 8.18 \times 10^{-3} \text{ เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

Temperature Range (K)	$\sigma_{0,ES}$ (S/cm^{-1}) (10^3)	$T_{0,ES}$ (K)	ξ_{ES} (nm)	T_{C2} (K)	$W_{hop,ES}$ (meV)	Δ_C ($10^{-6} eV$)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$
105-50	11.32	342.84	160.75	39.68	8.18	7.75	0.45

$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{1/2}} \quad (4.49)$$

หรือ

$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} \quad (4.50)$$

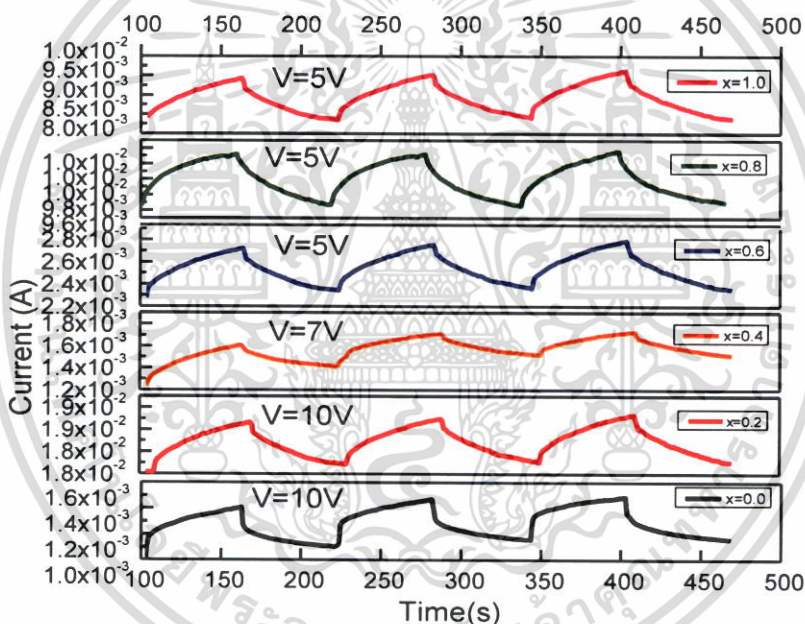
$$\begin{aligned} \Delta_C &= k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} \\ &= (1.38 \times 10^{-23}) \left(\frac{1.5918 \times 10^2}{4.4986 \times 10^4} \right)^{1/2} \\ &= \frac{8.2089 \times 10^{-25}}{1.6 \times 10^{-19}} = 7.75 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสโฟโตขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งเรียกว่า กระแสโฟโตขาลง ซึ่งจากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าช่วงเวลาตอบสนองสั้นมากที่ช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น โดยเวลาขาขึ้นสามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉาย ดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

สำหรับช่วงกระแสโฟโตขาลงจะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d} \tag{4.51}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่าเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติ

เพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการ

$$I = \sum_2^n A_{n-1} [\exp(-t / \tau_{dn})] + A_n [\exp((-t / \tau_{dn})^\beta)] \quad (4.52)$$

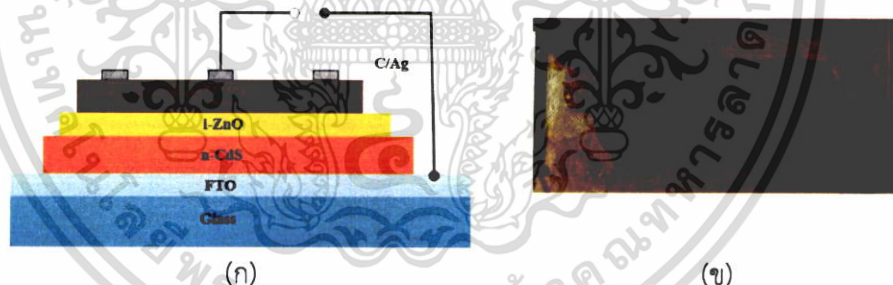
และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกับดักประจุได้จากสมการ

$$\sigma_i = \frac{I_n}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (4.53)$$

และผลการทดลองของกระแสโฟโตขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ

4.6 การศึกษาสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

4.6.1 โครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS



รูปที่ 4.1 (ก) แสดงแผนภาพของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS
(ข) แสดงภาพถ่ายของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

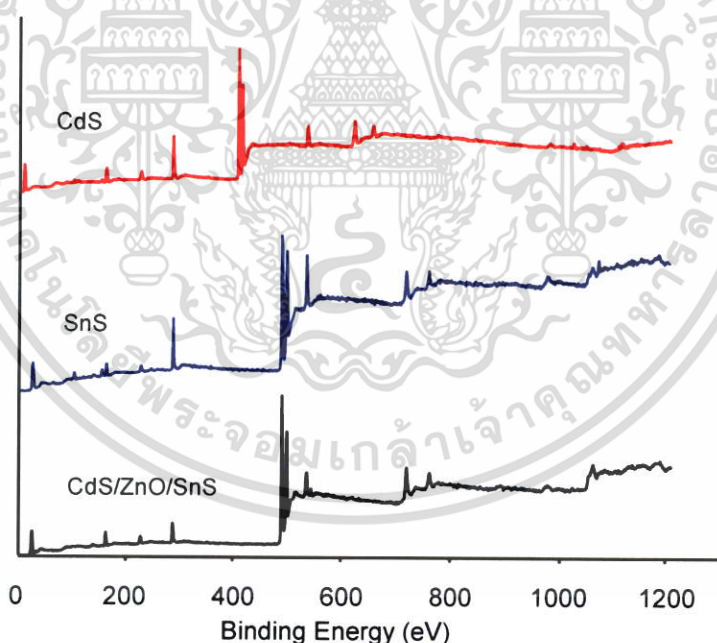
รูปที่ 4.1 (ก) แสดงแผนภาพโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบอยู่บนกระจก FTO โดยเริ่มจากการเตรียมฟิล์มของ CdS เคลือบอยู่บนกระจก FTO โดยวิธีอบสารละลายเคมี ขั้นตอนถัดไปคือทำการเตรียมชั้นบัฟเฟอร์ ZnO เคลือบบนชั้น CdS โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นจึงทำการเตรียมฟิล์มบาง SnS เคลือบทับบน ZnO โดยวิธีระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ สำหรับรอยต่อโอห์มมิกที่สัมผัสกับฟิล์มบาง SnS จะใช้กาวคาร์บอนและกาวเงินป้ายเป็นรูปวงกลม รัศมี 2 มิลลิเมตร จากนั้นจึงต่อขั้วไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่างของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS เพื่อทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป รูปที่ 4.2 (ข) แสดงภาพถ่ายของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่ประดิษฐ์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตมิสชัน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

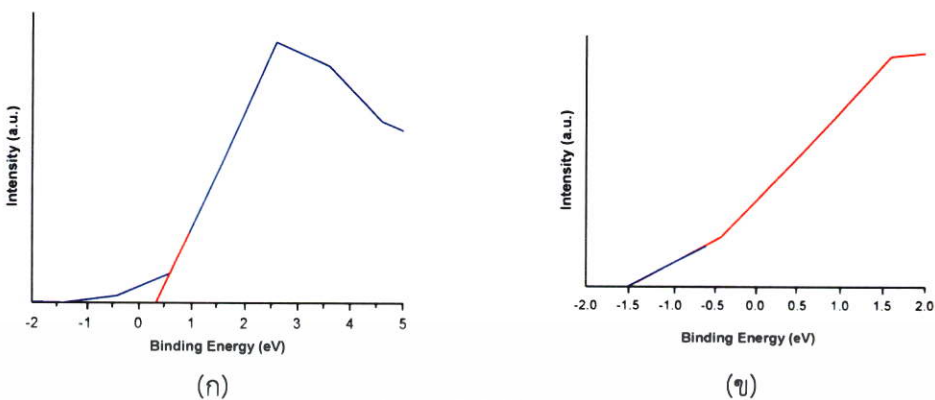
จากผลการวัดสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray photoemission spectroscopy : XPS) เพื่อศึกษาจำนวนโฟโตมิสชันได้แล้ว ยังสามารถนำไปหาความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ (valence band offset; ΔE_v) ที่อยู่ระหว่างรอยต่อได้

สเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ (เส้นแดง) สเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ (เส้นสีน้ำเงิน) และรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) (เส้นสีดำ) แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถนำไปหาค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ได้ (valence band maximum; VBM) จากการลากเส้นตรงตัดกับเส้นแกนนอนจะได้ค่า VBM ดังรูปที่ 4.3ก) และ 4.3ข) ซึ่งจากการลากเส้นตรงนี้พบว่า สารกึ่งตัวนำ CdS และสารกึ่งตัวนำ SnS มีค่าแถบวาเลนซ์สูงสุดเท่ากับ 0.4 และ -1.5 eV ตามลำดับสอดคล้องดีกับผลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้ [36-37]



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, SnS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

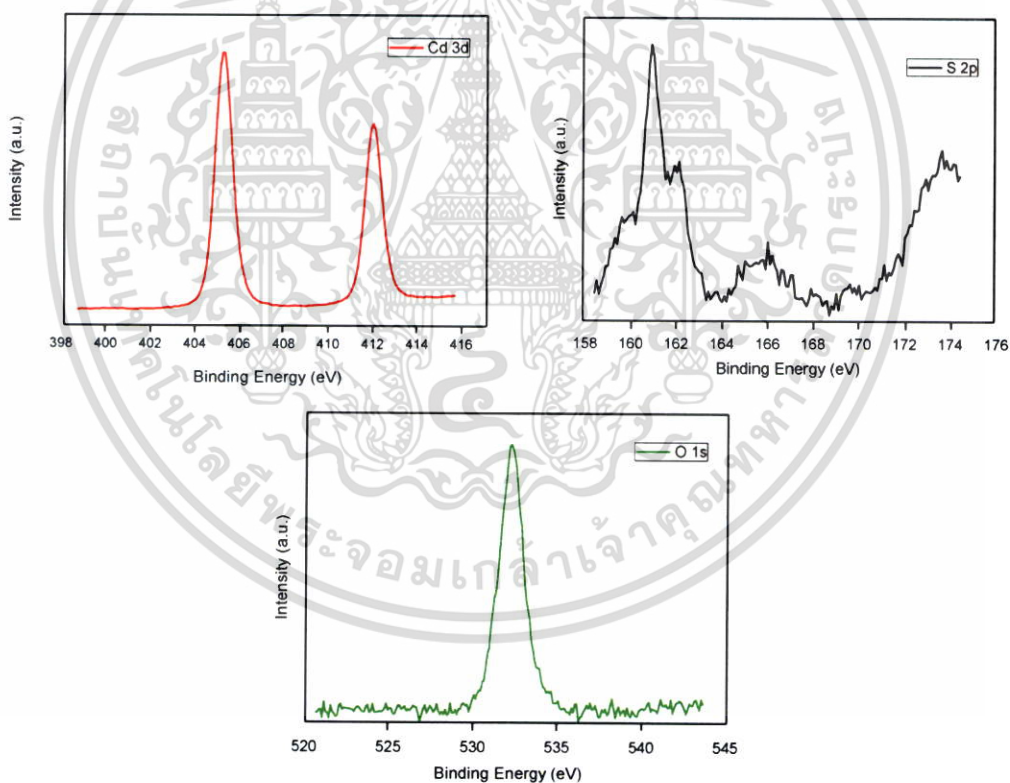
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม XPS ของค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์

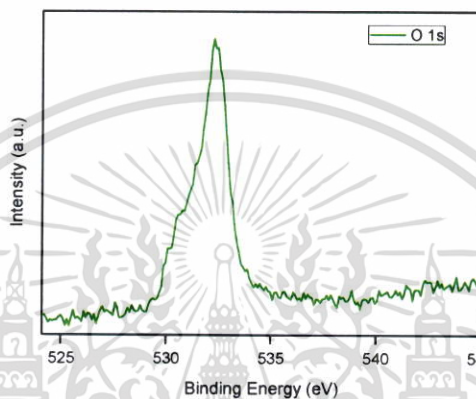
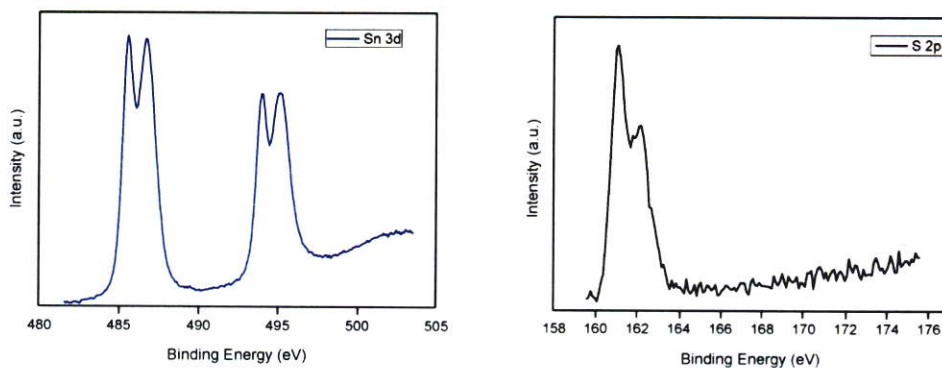
ก) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์

ข) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์

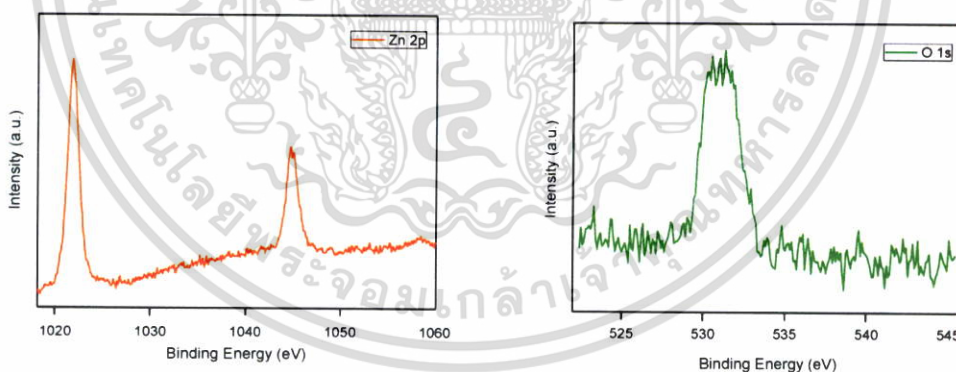


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

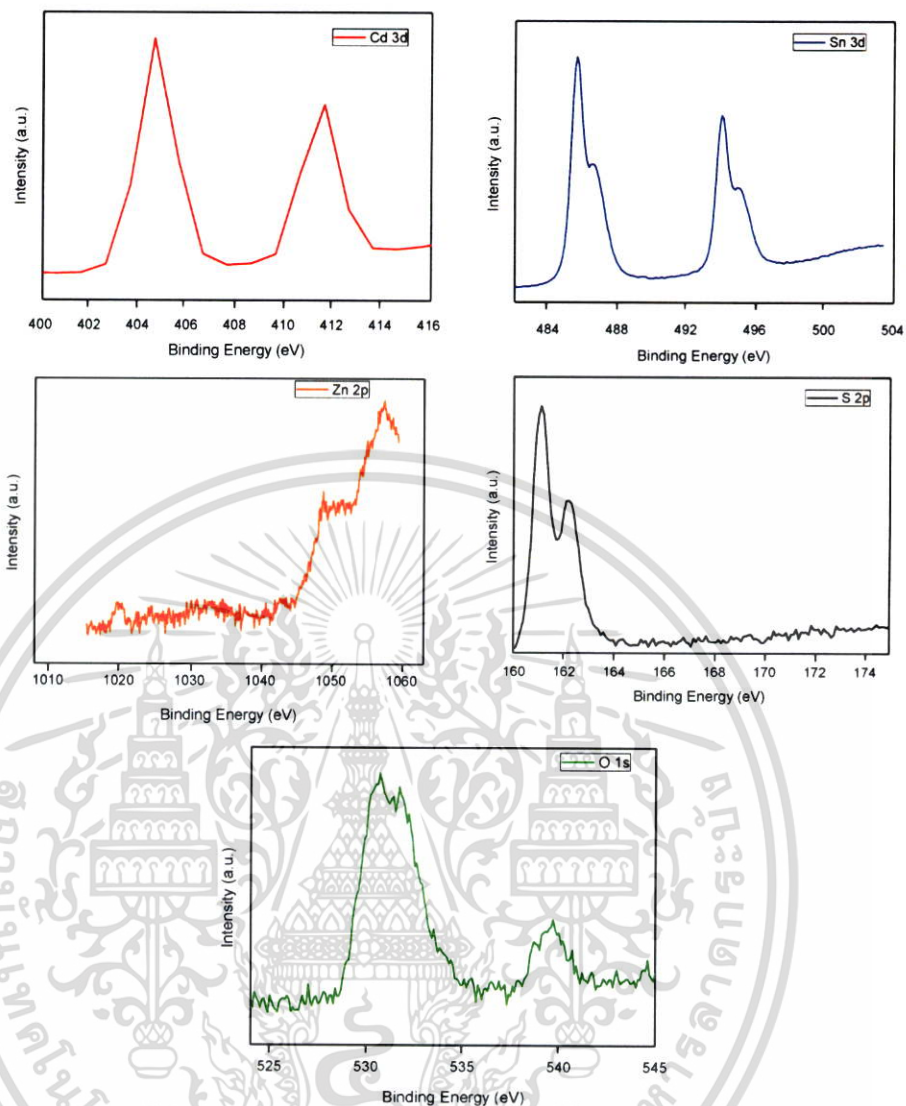


รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบาง SnS ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบาง ZnO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม XPS ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, SnS และรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

Core level	Binding energy (eV)		
	CdS	SnS	CdS/ZnO/SnS
Cd 3d _{3/2}	405.17	-	405.14
Cd 3d _{5/2}	411.90	-	411.88
Sn 3d _{3/2}	-	485.38	485.57
	-	486.64	486.84
	-	493.90	493.98
	-	495.00	495.15

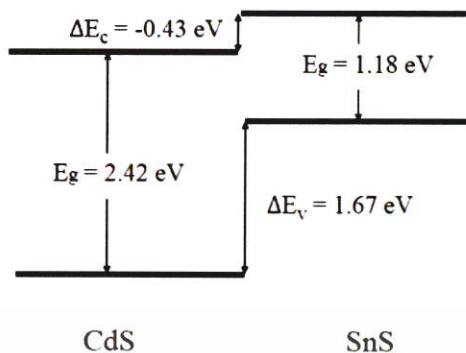
ค่าความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ (valence band offset; ΔE_{VBO}) ที่อยู่ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ CdS กับสารกึ่งตัวนำ SnS สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\Delta E_{VBO} = (E_{CL}^{SnS} - E_{VBM}^{SnS}) - (E_{CL}^{CdS} - E_{VBM}^{CdS}) - (E_{CL}^{SnS} - E_{CL}^{CdS})_{interface}$$

จากการศึกษาสเปกตรัม XPS ข้างต้นพบว่า E_{CL}^{SnS} , E_{CL}^{CdS} , $(E_{CL}^{SnS})_{interface}$ และ $(E_{CL}^{CdS})_{interface}$ มีค่า 485.38, 405.17, 485.59 และ 405.15 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ [39-41] จะได้ค่าความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 1.67 อิเล็กตรอนโวลต์ นั้นหมายความว่า แถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ SnS อยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS เท่ากับ 1.67 อิเล็กตรอนโวลต์ [42] ส่วนค่าความไม่ต่อเนื่องของแถบนำ (ΔE_{VBO}) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

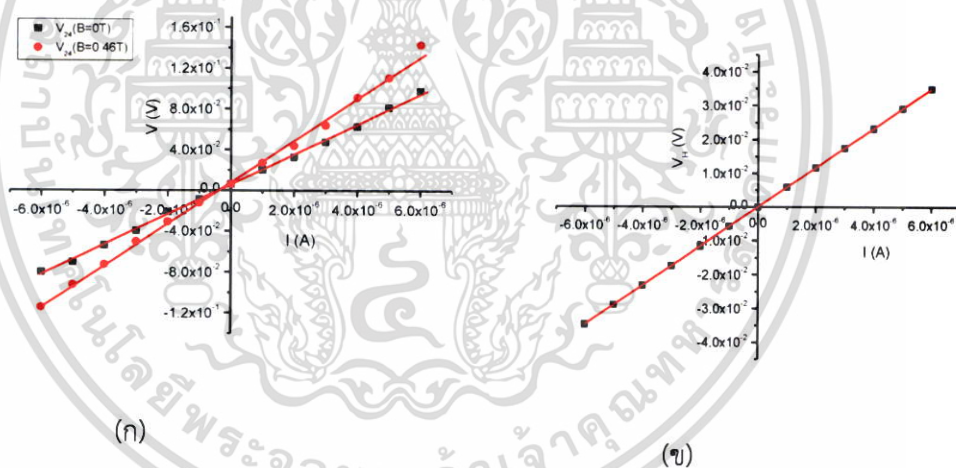
$$\begin{aligned} \Delta E_{CBO} &= [E_g^{CdS} - E_g^{SnS}] - \Delta E_{VBO} \\ &= (2.42 - 1.18) - 1.67 \\ &= -0.43 \text{ eV} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



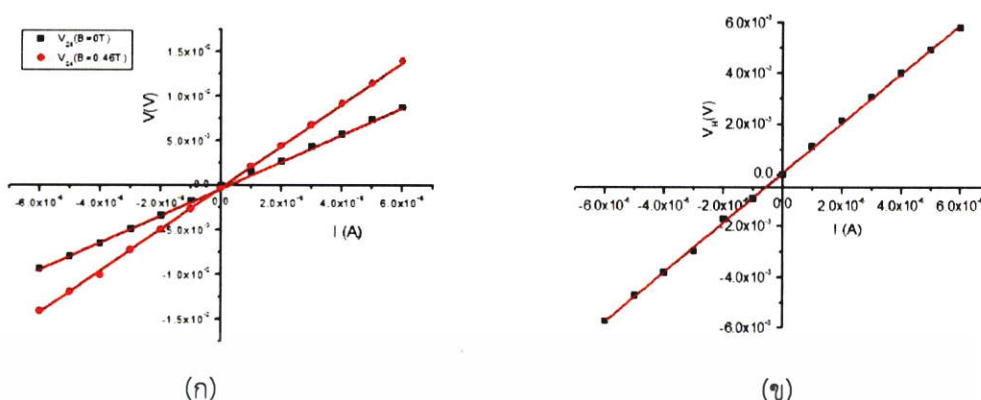
รูปที่ 4.8 แสดงค่า ΔE_{VBO} และ ΔE_{CBO} ของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/SnS

4.6.3 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง CdS และ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
 ก) ความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
 ข) ความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

- ก) ความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
- ข) ความต่างศักย์ (V_{μ}) กับกระแสไฟฟ้า (I)

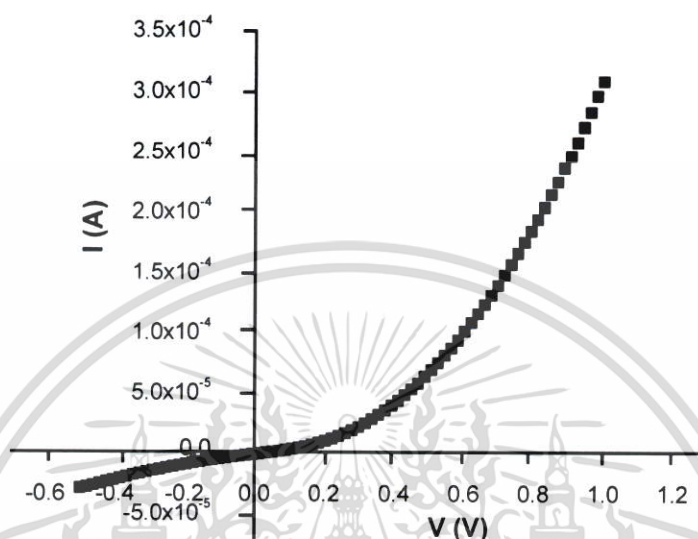
จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แสดงดังรูปที่ 4.9 และฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แสดงดังรูป 4.10 เมื่อนำไปคำนวณ พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของอิเล็กตรอนของฟิล์มบาง CdS เท่ากับ 9.92×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและ 36.86 ตารางเซนติเมตร/(โวลต์·วินาที) สำหรับฟิล์มบาง SnS จะมีความหนาแน่นของโฮลและสภาพคล่องของโฮล เท่ากับ 5.92×10^{17} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 25.75 ตารางเซนติเมตร/(โวลต์·วินาที) ตามลำดับ และจากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบาง CdS และ SnS พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.71×10^2 และ 0.41 โอห์ม·เซนติเมตร ตามลำดับ

4.6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS กรณีไบแอสตรง (forward bias)

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS โดย การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.4 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ SnS และของสารกึ่งตัวนำ CdS (ที่ได้จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์) อยู่ในระดับ 10^{17} และ 10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่ออวิวิพันธ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS เป็นแบบรอยต่อ $p^+ - n$ ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้ เช่นเดียวกับรอยต่อขอตติ์ โดยบริเวณพร่องพาหะตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรง เนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของ ไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า สามารถแบ่งช่วงแรงดันไบแอสออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ I ($0 < V < 0.1$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ II ($0.10 < V < 0.35$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ส่วนบริเวณที่ III ($0.35 < V < 1.0$) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซิโพเนนเชียล

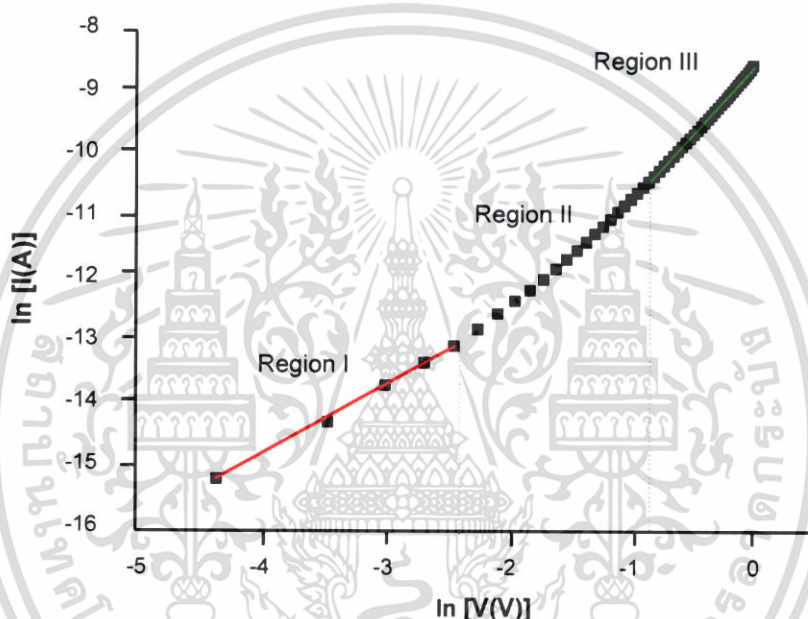
กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ [44]

$$I = kV^m \quad (4.54)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำงจะเป็นไปตามกฎของ ไซต์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.13 สำหรับค่าความชันของแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่าได้ค่า m เท่ากับ 2.26 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล



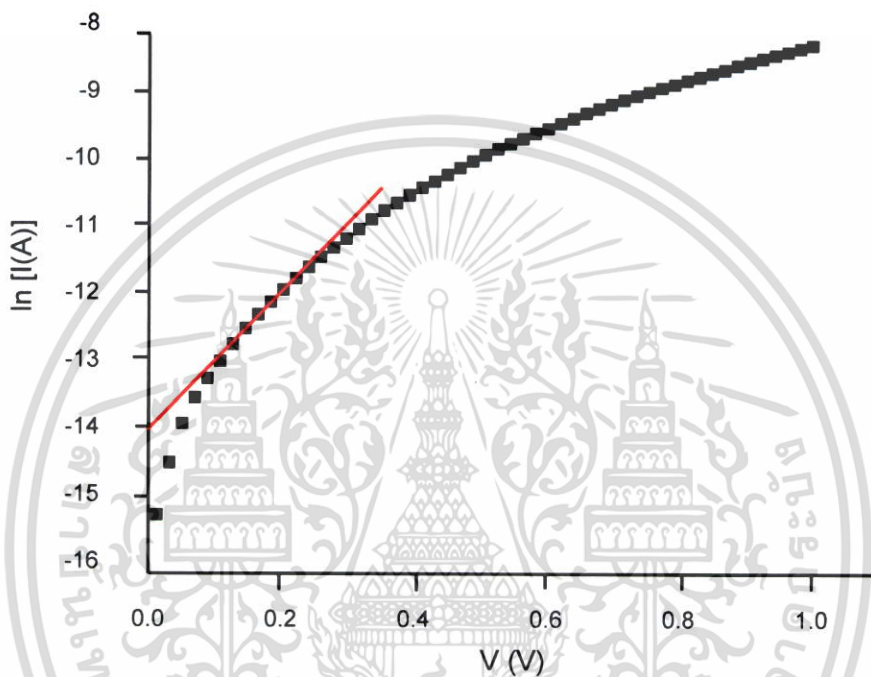
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(I)$ กับค่า $\ln V$ ที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

Temperature (K)	Region I ($0.0 < V < 0.10$) Ohm's law	Region II ($0.10 < V < 0.35$) Ideality Factor (n)	Region III ($0.35 < V < 1.00$) Exponent Value (m)
300	1.26	4.42	2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

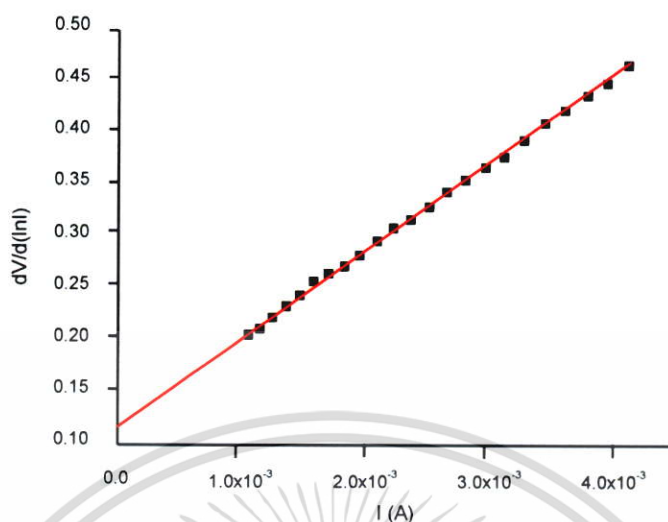
พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เพื่อหาค่าความสูงของ กำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_0) และนำไปใช้เป็นค่า เริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ แรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เพื่อช่วยหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_0) ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น



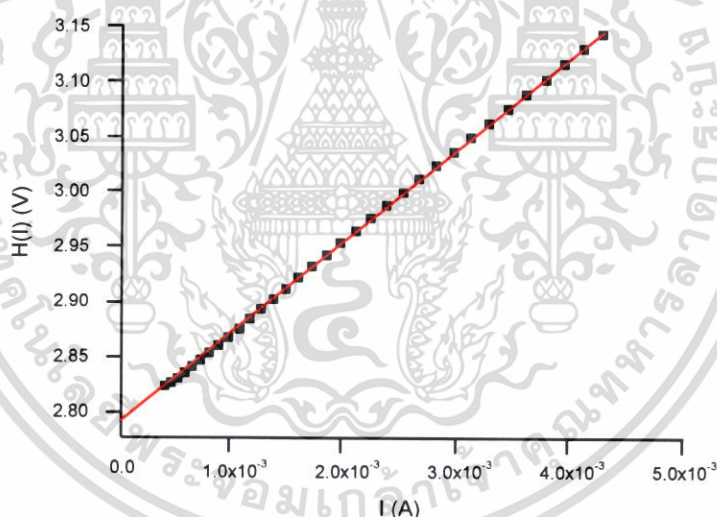
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $CdS/ZnO/SnS$ ที่เคลือบลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุก ออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

การหาค่าความต้านทานอนุกรมโดยใช้วิธีของชวง จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากการเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ วิธีของนอร์ดจะเขียนกราฟได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับ V ดัง แสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทาน อนุกรม โดยค่าความสูงกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และค่าความ ต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด แสดงดัง ตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

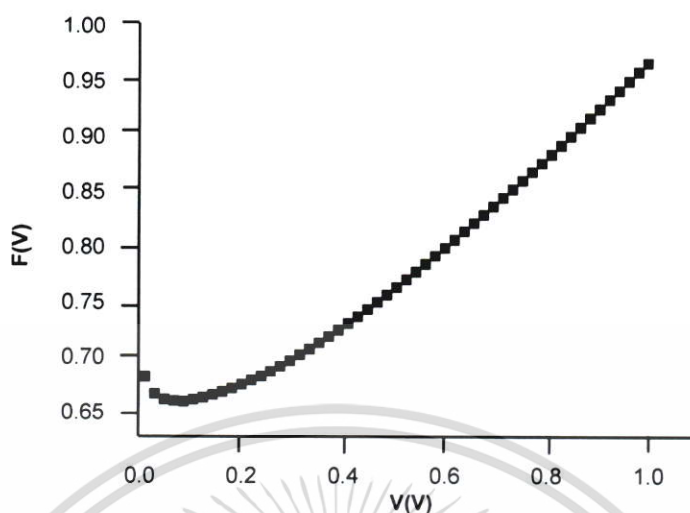


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d(\ln I)$ กับค่า I ที่อธิบายวิธีของวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I โดยวิธีของวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า $V(V)$ โดยวิธีของนอร์ดเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิริพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

จากรูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของกระแส และแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงของช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังสมการ [44]

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.56)$$

เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA \cdot T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{BO}}{kT}\right) \quad (4.57)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ตัดแกน $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ได้ และจากสมการที่ (4.56) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ คือ

$$\phi_{Bo} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA \cdot T^2}{I_s}\right) \quad (4.58)$$

ความสูงของกำแพงศักย์ ϕ_{Bo} ของสมการที่ (4.58) จะเป็นค่าในขณะที่แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^* (CdS) เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อ(ตารางเซนติเมตร-เคลวินยกกำลังสอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแพกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.59)$$

ในความเป็นจริงแล้วสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสาร และขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีความสัมพันธ์ดังนี้ [44]

$$I = I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s)\right) - 1 \right\} \quad (4.60)$$

เมื่อ I_s คือกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.61)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของช่วง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้า โดยการแทนสมการที่ (4.61) ลงในสมการที่ (4.59) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (4.62)$$

หาอนุพันธ์ของค่า V เทียบกับ ค่า $\ln I$ เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.61) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.62)$$

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d \ln I$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.17 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจรถ (R_s) และจุดตัดแกนของค่า $dV/d \ln I$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.63) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า $H(I)$ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.63)$$

แล้วสมการที่ (4.63) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (4.64)$$

เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ก็จะได้ดังรูปที่ 4.18 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า $(n\phi_B)$ ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า $H(I)$ นั่นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.62) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม โดยวิธีของนอร์ด (Norde's Method) ดังสมการ

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

แทนค่า I จากสมการที่ (4.59) จะได้ว่า

$$F(V) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) V + \frac{IR_s}{n} + \phi_{BO} \quad (4.65)$$

เมื่อทำการคำนวณหาค่า $F(V)$ จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V (V) ก็จะได้ดังรูปที่ 4.19 ที่แรงดัน V_{\min} จะทำให้ฟังก์ชัน $F(V)$ มีค่าต่ำสุด และที่ $F(V)_{\min}$ นี้จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานอนุกรมได้ ดังนี้

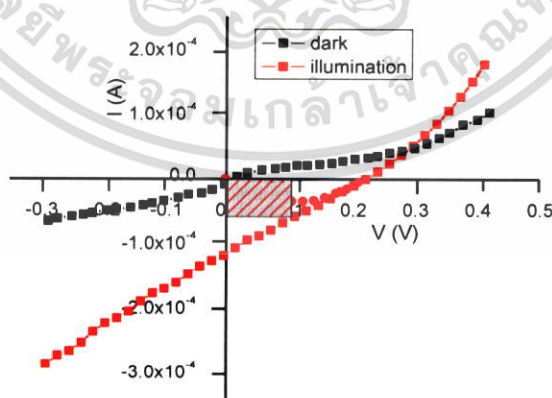
$$R_s = \frac{2 - n}{I_{\min}} \left(\frac{kT}{q} \right) \quad (4.66)$$

เมื่อ I_{\min} คือค่ากระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องกับฟังก์ชัน $F(V)_{\min}$

ตารางที่ 4.12 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

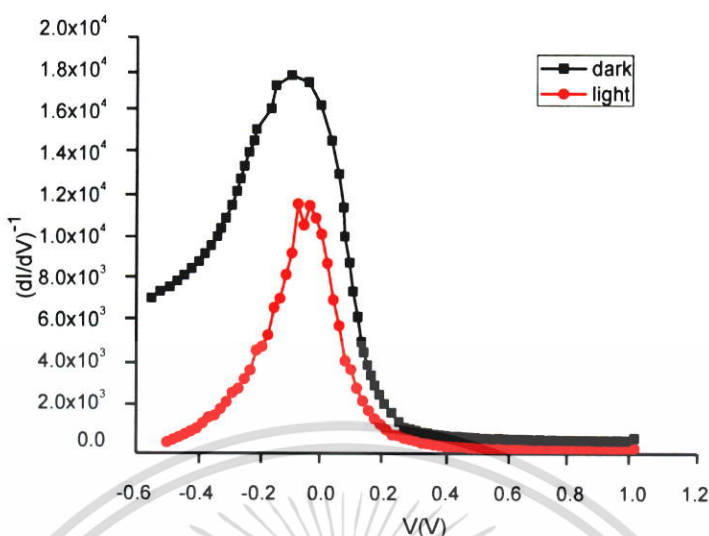
Temperature (K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, ϕ_b (eV)			Series Resistance, R_s (Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	$dV/d(\ln)I$	I-V	$H(I)-I$	$F(V)-V$	$H(I)-I$	$dV/d(\ln)I$	$F(V)-V$
300	7.52×10^{-6}	4.42	4.62	0.57	0.60	0.68	83.44	84.02	87.01

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟ ELH พบว่า รอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS แสดงพฤติกรรมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยมีค่า ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 0.92 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันวงจรเปิด เท่ากับ 0.23 โวลต์ ค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.04 และค่า ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า (PCE) เท่ากับ 0.0036 % ความต้านทานอนุกรม (R_s) และค่าความต้านทานชั้้นท์ ขณะไม่มีการฉายแสงจะมีค่าเท่ากับ 176.61 โอห์ม และ 18.19 กิโลโอห์ม และต้านทานอนุกรม และค่าความต้านทานชั้้นท์จะลดลงเป็น 116.56 โอห์ม และ 12.06 กิโลโอห์ม ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH



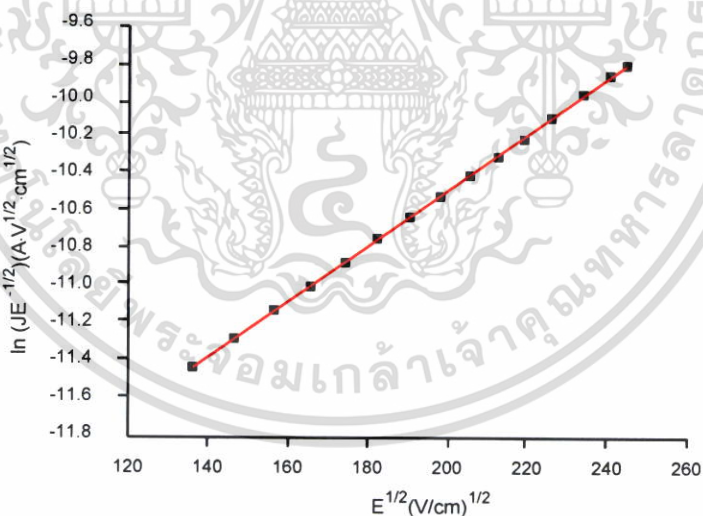
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ ของไดโอดของฟิล์มบางของ CdS/ZnO/SnS ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และ ขณะไม่มีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงการหาค่า R_s และ R_{sh} ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับ V ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และขณะไม่มีการฉายแสง

กรณีไบแอสไปกลับทาง (reverse bias)



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{-1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ รอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

ในกรณีไบแอสย้อนกลับสามารถอธิบายการนำกระแสไฟฟ้าได้ด้วยกลไกการนำกระแสพูล-แฟรงเคิลแบบปรับปรุงใหม่ (Modified Poole-Frenkel conduction) [43] ซึ่งกลไกนี้อธิบายถึงการนำกระแสที่อยู่ในกับดักของสารกึ่งตัวนำ ก่อนที่พาหะกำลังเคลื่อนที่จะถูกกับดักจับไว้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าของกำลังภายในกับดักลดลง ทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปได้ง่ายขึ้น
จากสมการความสัมพันธ์ [43]

$$J \propto J_0 \left[\frac{kTE^{1/2}}{q\beta_{PF}} \right] \exp \left[\frac{\beta_{PF}E^{1/2}}{kT} \right] \quad (4.67)$$

$$\ln(JE^{-1/2}) = \left(\frac{\beta_{PF}}{kT} \right) E^{1/2} + \ln \left(\frac{J_0 kT}{q\beta_{PF}} \right) + \text{constant} \quad (4.68)$$

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(JE^{-1/2})$ กับค่า $E^{1/2}$ ดังรูปที่ 4.19 โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ β_{PF}/kT โดยค่าสัมประสิทธิ์ของกลไกพูล-แฟรงเคิล (Poole-Frenkel coefficient) β_{PF} นำไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ ϵ_r ได้ จากความสัมพันธ์

$$\beta_{PF} = \left[\frac{q^3}{\pi\epsilon_r\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (4.69)$$

จากกราฟที่ 4.19 β_{PF} และ ϵ_r มีค่า $2.49 \times 10^{-4} \text{ eV}\cdot\text{cm}^{1/2}\cdot\text{V}^{-1/2}$ และ 9.38 ตามลำดับ

4.6.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

กรณีไบแอสตรง

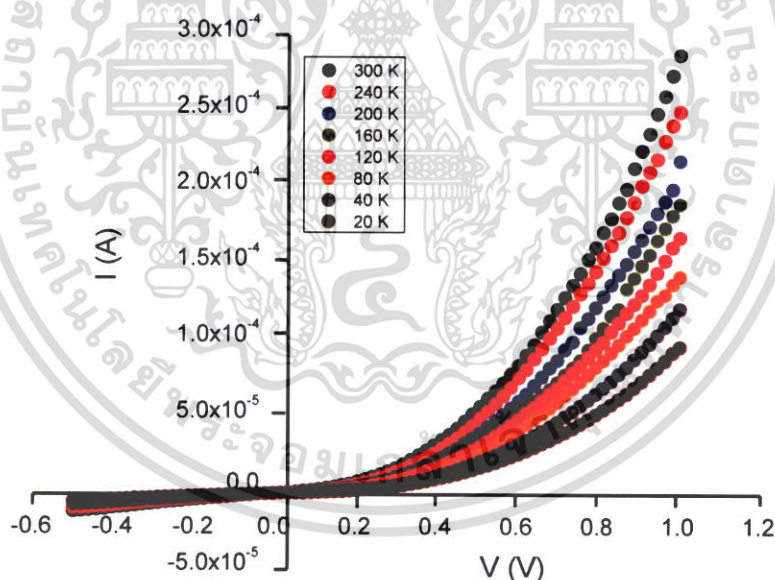
การศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน เมื่ออุณหภูมิลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้น ตั้งแต่ 0.4-1.0 โวลต์

การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS ที่ช่วงแรงดัน 0-1.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ ที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณที่ I ($0 < V < 0.10$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ II ($0.10 < V < 0.35$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออเนกนิมิสชัน และส่วนบริเวณที่ III ($0.35 < V < 1.00$) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 4.21

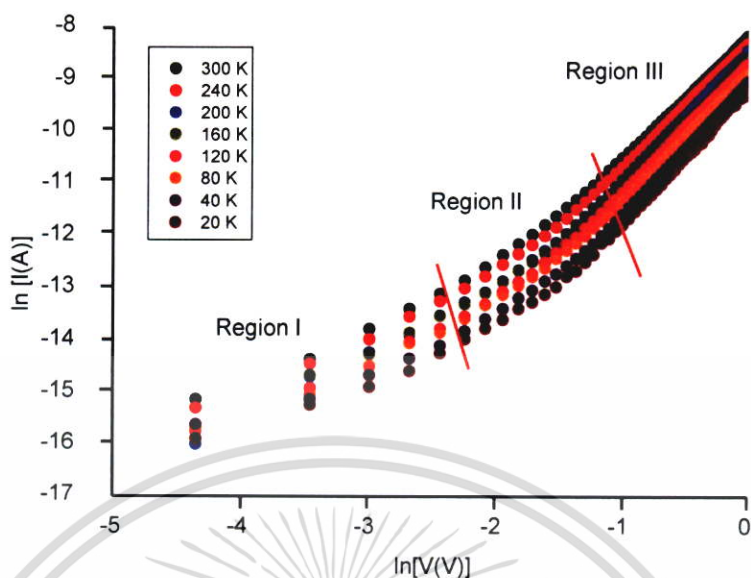
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_0) และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เพื่อช่วยหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_0) ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

การหาค่าความต้านทานอนุกรมโดยใช้วิธีของชวง จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบอัสเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ วิธีของนอร์ดจะเขียนกราฟได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบอัสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานอนุกรม โดยค่าความสูงกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด แสดงดังตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่ออิมิตชันของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

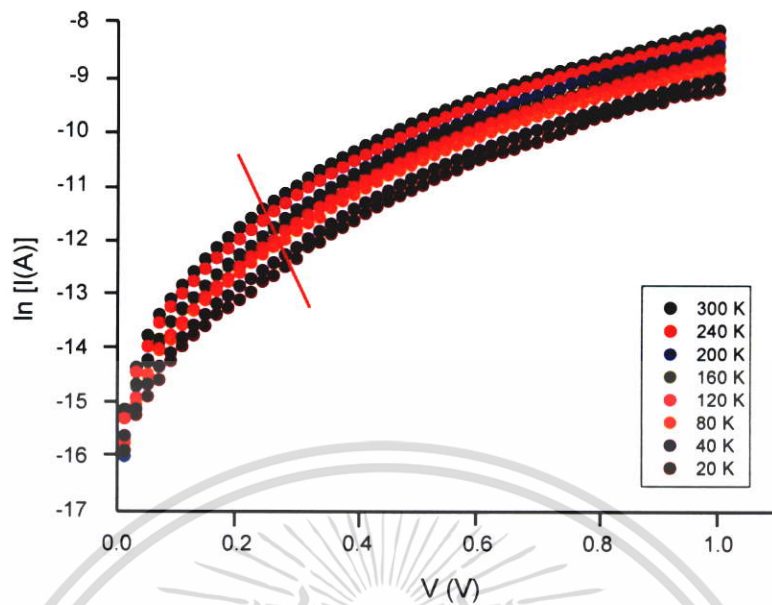


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS

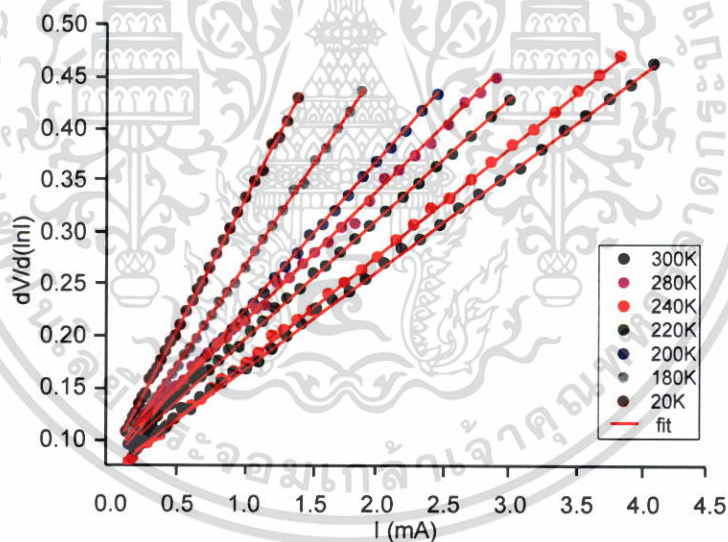
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

Temperature (K)	Region I ($0 < V < 0.10$) Ohm's law	Region II ($0.10 < V < 0.35$) Ideality Factor (n)	Region III ($0.35 < V < 1.00$) Exponent Value (m)
300	1.26	4.42	2.36
280	1.24	5.03	2.38
260	1.22	5.40	2.40
240	1.21	6.12	2.42
220	1.20	6.64	2.49
200	1.18	6.70	2.50
180	1.15	7.55	2.36
160	1.14	8.96	2.38
120	1.17	11.61	2.49
80	1.18	17.85	2.47
60	1.19	23.91	2.49
40	1.05	36.19	2.58
20	1.08	70.82	2.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

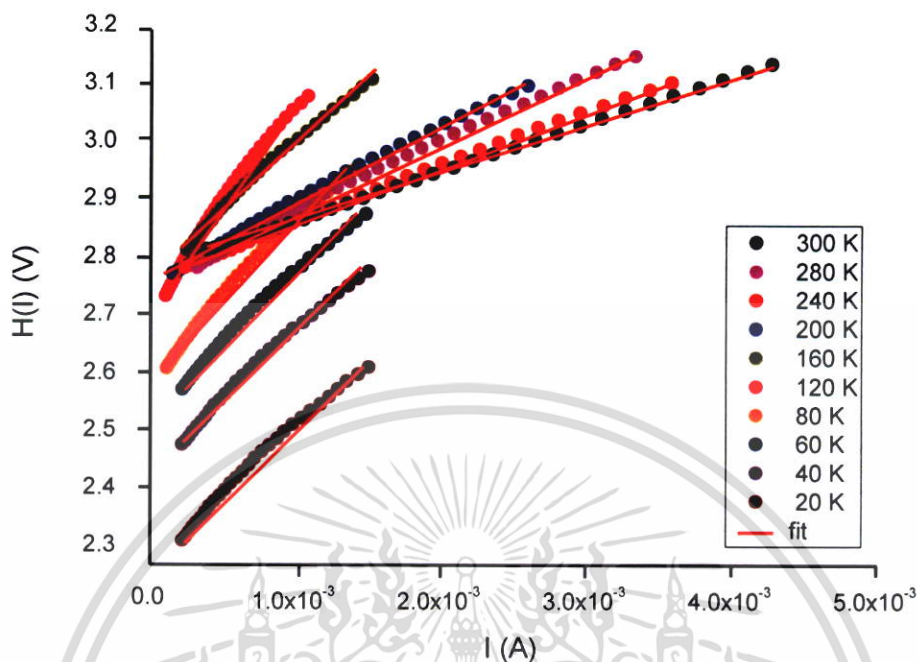


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(I)$ กับค่า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

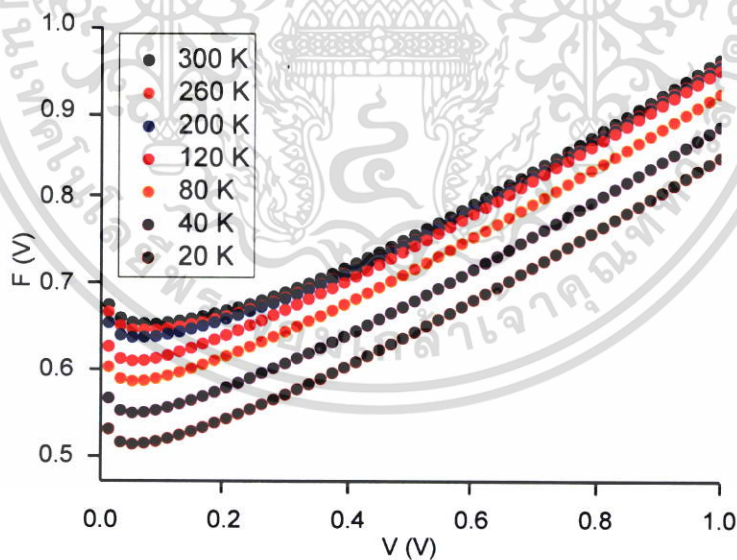


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

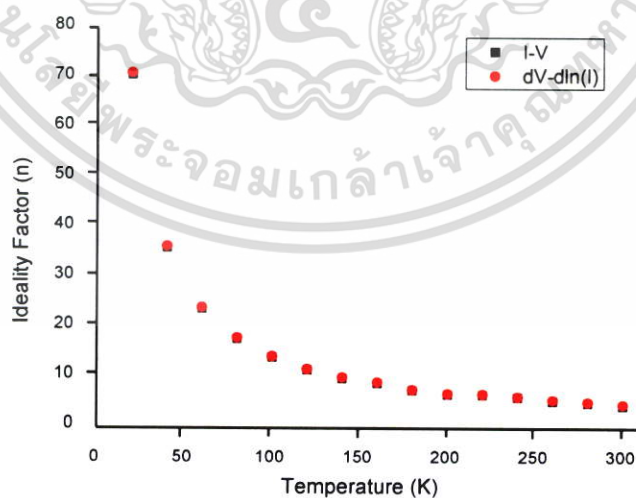


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

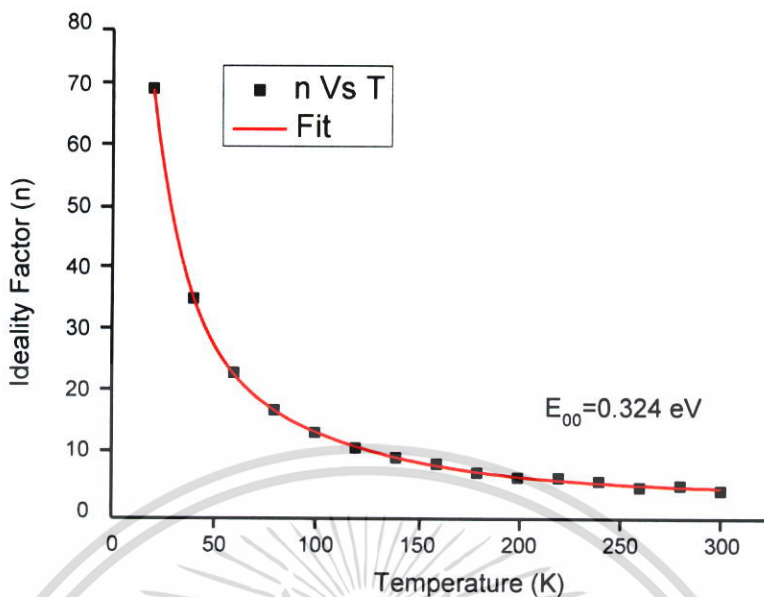
ตารางที่ 4.14 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

T (K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, ϕ_b (eV)			Series Resistance, R_s (Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	$dV/d(\ln I)$	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	$dV/d(\ln I)$	F(V)-V
300	7.52×10^{-7}	4.42	4.62	0.57	0.60	0.68	83.44	84.02	87.01
280	6.33×10^{-7}	5.03	5.14	0.52	0.53	0.57	87.25	86.36	88.13
260	5.41×10^{-7}	5.40	5.58	0.48	0.50	0.54	97.26	92.74	98.15
240	4.87×10^{-7}	6.12	6.24	0.42	0.44	0.50	100.85	101.90	110.43
220	4.45×10^{-7}	6.64	6.73	0.40	0.41	0.45	121.11	119.58	122.50
200	3.34×10^{-7}	6.70	6.82	0.36	0.40	0.42	135.52	130.82	134.52
180	3.03×10^{-7}	7.55	7.61	0.32	0.36	0.39	176.60	169.15	177.70
160	1.64×10^{-7}	8.96	9.12	0.28	0.30	0.35	200.42	211.75	212.73
140	1.32×10^{-7}	9.92	10.09	0.24	0.27	0.31	230.01	216.96	232.07
120	1.17×10^{-7}	11.61	11.76	0.20	0.23	0.29	236.37	219.98	237.31
100	6.92×10^{-8}	14.13	14.27	0.17	0.18	0.21	237.55	220.01	240.56
80	6.05×10^{-8}	17.85	18.04	0.13	0.14	0.15	240.84	232.16	249.89
60	3.79×10^{-8}	23.91	24.11	0.09	0.10	0.12	259.91	266.17	270.11
40	2.74×10^{-8}	36.19	36.43	0.06	0.07	0.10	307.71	300.25	310.18
20	1.86×10^{-8}	70.82	71.13	0.02	0.03	0.05	312.58	306.47	315.09

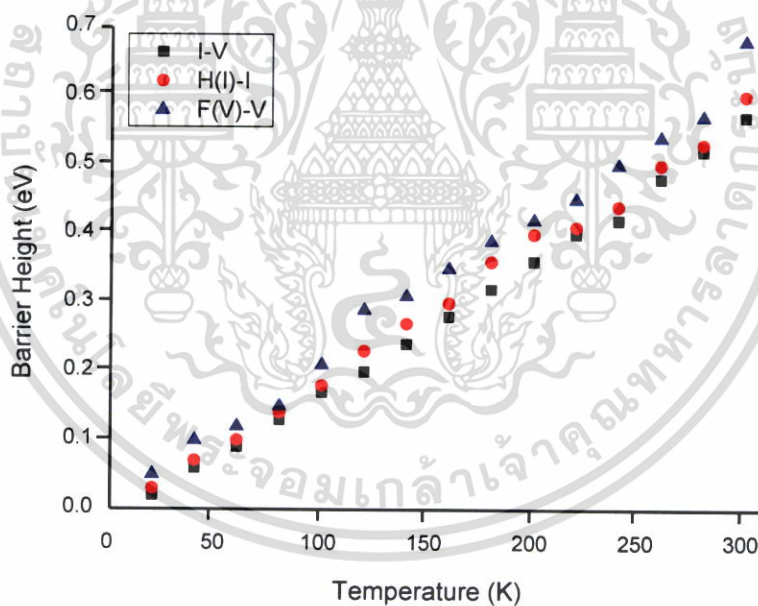


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

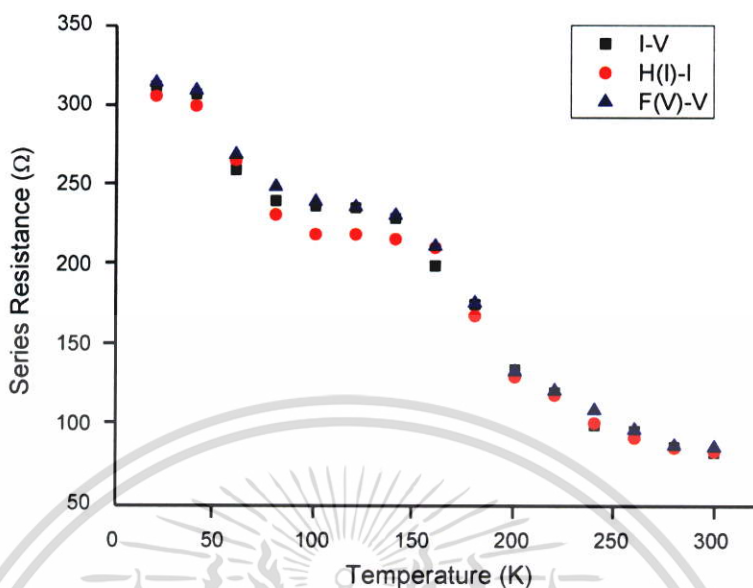


รูปที่ 4.27 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



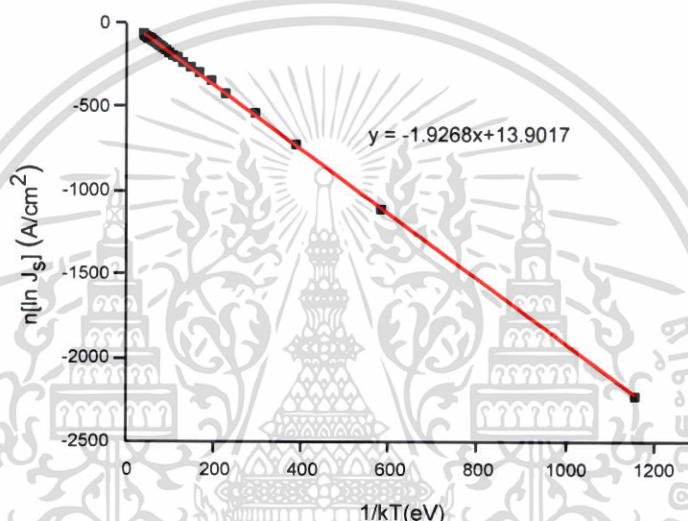
รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับมีค่าลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และวิธีของชวงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และวิธีของชวง กับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน กราฟจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด มีค่าลดลงตามอุณหภูมิลดลงแสดงดังรูปที่ 4.28 และสังเกตได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งการที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้มีการใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตติ มาคำนวณค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมืดสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปตรง หรือพลังงานกระตุ้นเพียงจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และค่าแฟกเตอร์อุดมคติเข้าใกล้ 1 แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานอิสระของพาหะมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อย เนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจะพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อย และค่าแฟกเตอร์อุดมคติมีค่ามาก และที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวงและวิธีของนอร์ด พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.29 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงนี้ มีสาเหตุมาจากการที่ความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กักพาหะได้จับพาหะอิสระ เอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อ และการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลง เมื่ออุณหภูมิมิค่าลดลง จึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze - out - carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ $p^+ - n$ ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $\ln[J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

จากรูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ สามารถนำไปหาค่า E_{00} ได้จากความสัมพันธ์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4.70)$$

โดย E_{00} คือ ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.31 มีค่าเท่ากับ 0.324 อิเล็กตรอนโวลต์

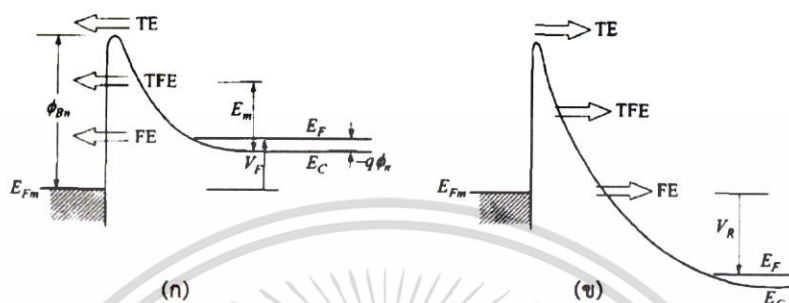
จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.30 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.71)

$$n \ln(J_s) = -E_a \left(\frac{1}{kT} \right) + n \ln(J_0) \quad (4.71)$$

ดังนั้น

$$\text{ความชัน } E_a = 1.92 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

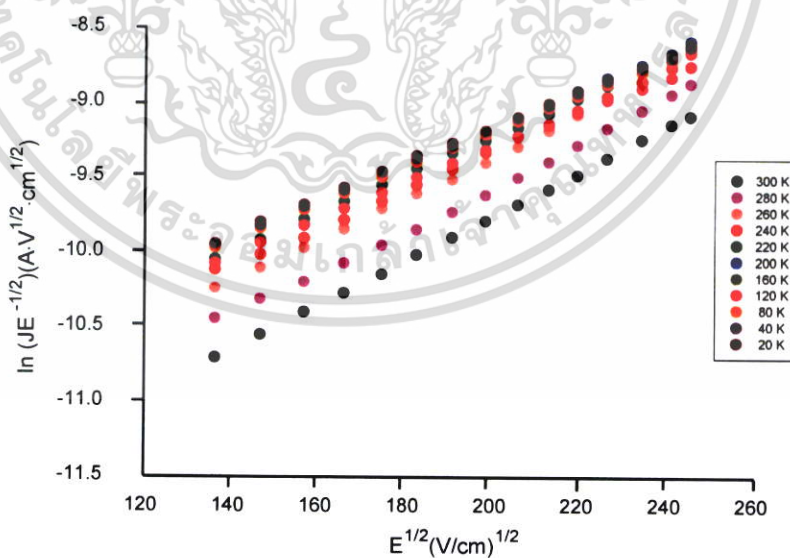
ซึ่งพลังงานกระตุ้นนี้คือกำแพงศักย์ของปรากฏการณ์ขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่ช่วยเสริมให้เกิดกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลโดยผ่านกับดักพาหะที่สถานะผิวเชื่อมต่อ (tunneling enhanced interface trap recombination) [45]



รูปที่ 4.31 แสดงแผนภาพกลไกเทอร์มออิเล็กทริก (TE) กลไกเทอร์มออิเล็กทริกฟิล์มอิมิสชัน (TFE) และกลไกฟิล์มอิมิสชัน (FE) ที่บริเวณรอยต่อขอตัดที่ภายใต้ไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ

กรณีไบแอสกลับทาง (reverse bias)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{-1/2})$ กับ $E^{1/2}$ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{-1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่ออิมิตชันของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

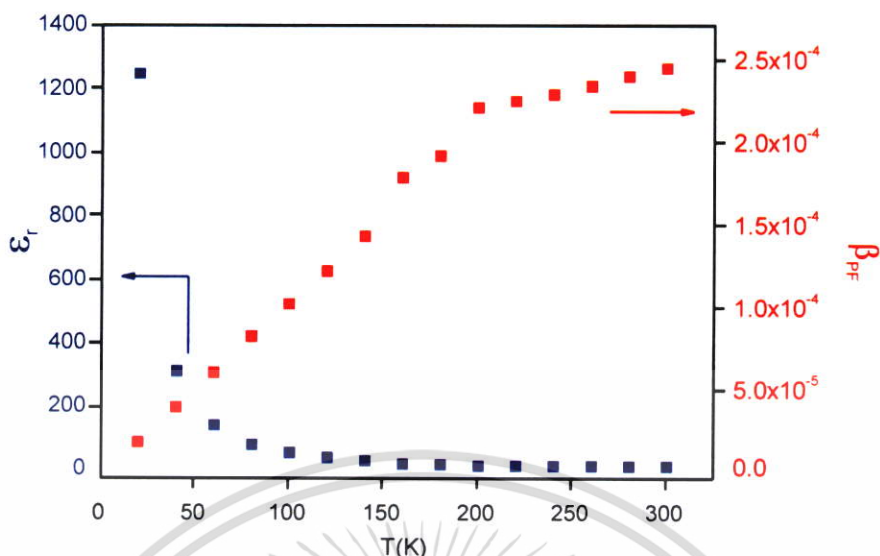
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสของพอลิ-แฟรงเคิลแบบปรับปรุงใหม่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ β_{PF} และ ϵ_r แสดงดังตารางที่ 4.15 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง β_{PF} และ ϵ_r กับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงค่า β_{PF} มีขนาดลดลงและ ϵ_r มีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณได้จากอุณหภูมิต้อง อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากที่อุณหภูมิต่ำ กระแสที่วัดได้อาจเกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากกักขัง (พิจารณาว่าบริเวณกักขังประพฤติตัวเป็นผู้ให้ (donor center)) หรืออาจเกิดจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากกักขัง ทำให้ตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหลุดออกมา ประพฤติตัวเป็นโฮล แต่อิเล็กตรอนและโฮลยังมีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างกันเป็นแรงคูลอมบ์ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อิเล็กตรอนไม่มีพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่ออกนอกกักขังไปได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่พาหะในอุณหภูมิต่ำเคลื่อนที่ได้ลดลง หรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะสามารถข้ามกำแพงศักย์ออกไปได้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพอลิ-แฟรงเคิล β_{PF} และค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ ϵ_r ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกพอลิ-แฟรงเคิลแบบปรับปรุงใหม่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

Temperature (K)	β_{PF} ($A \cdot V^{1/2} \cdot cm^{-1/2}$)	ϵ_r (Modified Poole-Frenkel)
300	2.49×10^{-4}	9.30
280	2.44×10^{-4}	9.70
260	2.38×10^{-4}	10.13
240	2.33×10^{-4}	10.56
220	2.29×10^{-4}	10.99
200	2.25×10^{-4}	11.41
180	1.96×10^{-4}	15.02
160	1.83×10^{-4}	17.19
140	1.47×10^{-4}	26.61
120	1.26×10^{-4}	36.17
100	1.06×10^{-4}	51.66
80	8.63×10^{-5}	77.27
60	6.41×10^{-5}	140.27
40	4.31×10^{-5}	310.08
20	2.15×10^{-5}	1248.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β_{PF} และ ϵ_r กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

4.6.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ พบว่าที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ ความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าเกือบคงที่ในช่วงความถี่ 10 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่เมื่อความถี่สูงกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ความจุไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ ข้อสังเกตที่ความถี่ต่ำกว่า 100 เฮิร์ตซ์ ค่าความจุไฟฟ้าที่แต่ละค่าแรงดันไบแอสมีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งบอกเป็นนัยว่า ค่าความจุของกับดักพาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ (C_{it}) แสดงผลออกมา จากวงจรสมมูล ในรูปที่ 2.41ก) ของบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่า C_{it} ต่อขนานอยู่กับ C_D และ รูปที่ 2.41ข) แสดงให้เห็นวงจรสมมูลของ C_{it} ที่ขนานอยู่กับ C_D สามารถลดรูปเหลือเป็นวงจรรูป $R_p C_p$ ($R_p C_p$ loop) ดังนั้นความจุไฟฟ้าของรูปที่ 4.34 คือค่า C_p ที่เปลี่ยนไปตามความถี่ สำหรับกับดักพาหะที่มี ระดับพลังงานค่าเดียว (single trap) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p กับ C_{it} ที่ความถี่ค่าต่างๆ จะแสดงดังสมการ (2.144) ของบทที่ 2 ดังนี้คือ [47,48]

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.72)$$

โดยที่ $C_{it} = qD_{it}$ และ $\omega \tau_{it} = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีกับดักพาหะที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuous trap) จะได้ว่า

$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \arctan(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}} \quad (4.73)$$

โดยที่ $C_{it} = qD_{it}$ และ $\omega\tau_{it} = 1.98$

สำหรับความนำไฟฟ้า (G) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของจอนเซอร์ (Joncher relation) คือ

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^S \quad (4.74)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่ เลขยกกำลัง S มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

แอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน (Y^*) คือส่วนกลับของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z^*) ดังสมการ

$$Y^* \equiv \frac{1}{Z^*} = G + j\omega C \quad (4.75)$$

ค่า D_{it} ของกับดักพาหะที่มีระดับพลังงานเดียว จะสัมพันธ์กับค่า C_p ของวงจรรูป $R_p C_p$ ดังนี้คือ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.76)$$

ส่วนค่า D_{it} ของกับดักพาหะที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuous trap)

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it}}{2\omega\tau_{it}} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2) \quad (4.77)$$

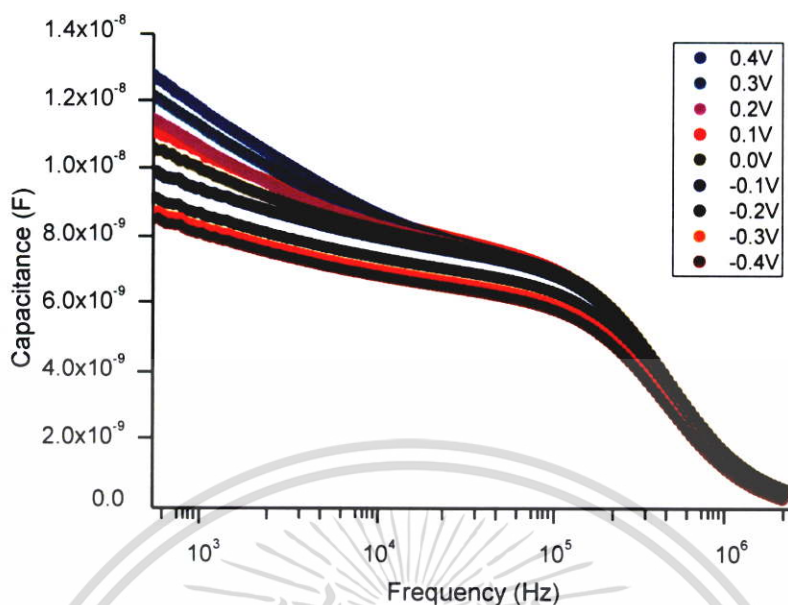
ส่วนอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z^*) ของวงจรรูป $R_p C_p$ คือ [49]

$$Z^* = z' - jZ''$$

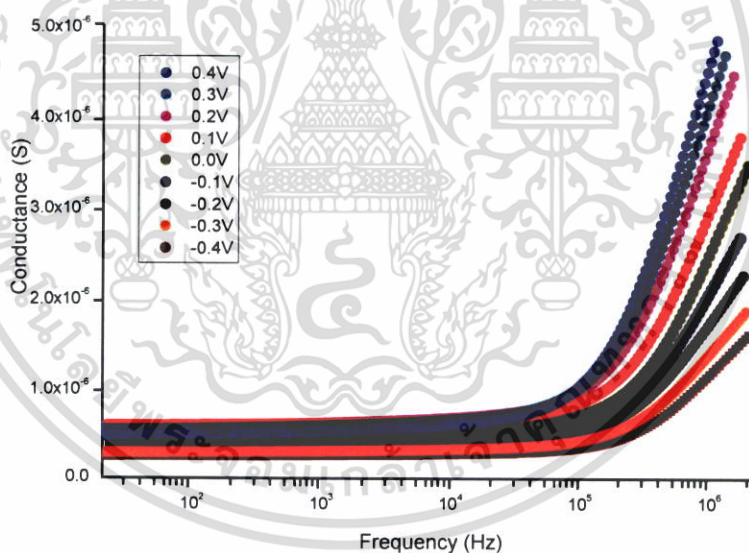
$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 \tau^2 C_p + 1}$$

$$Z'' = R_p \left(\frac{\omega\tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} \right)$$

เมื่อ $\tau = R_p C_p$

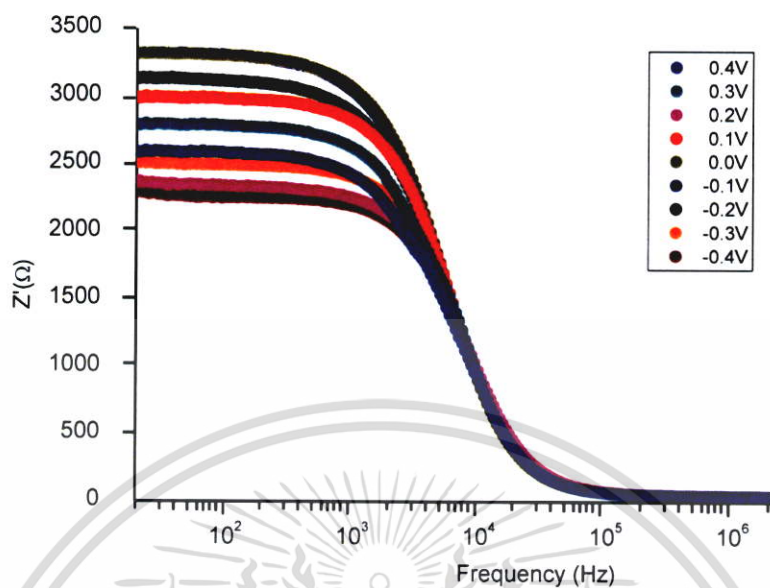


รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

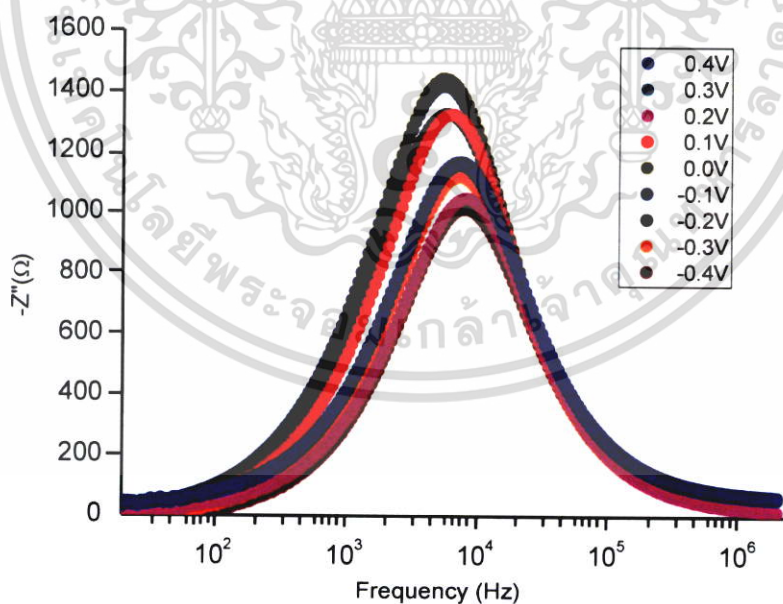


รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

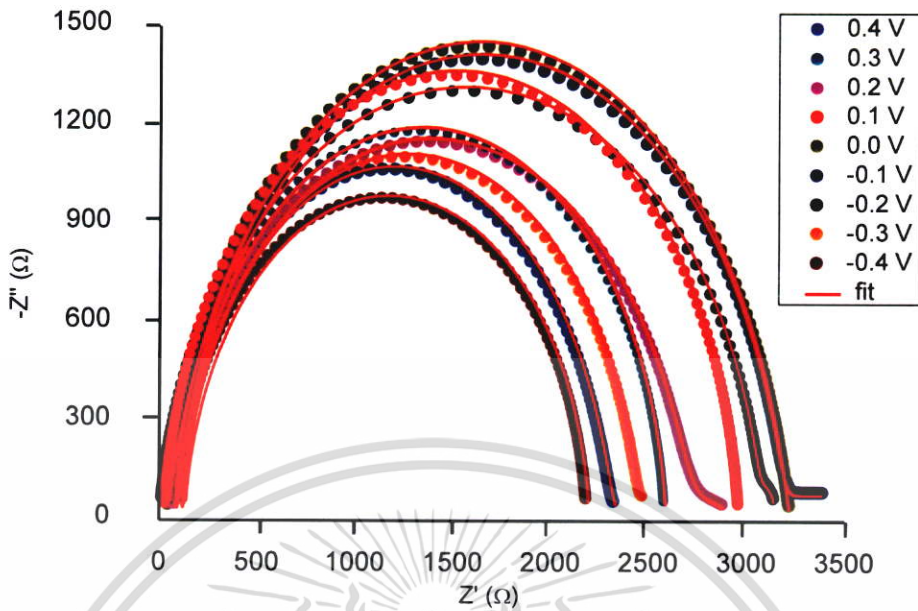


รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS



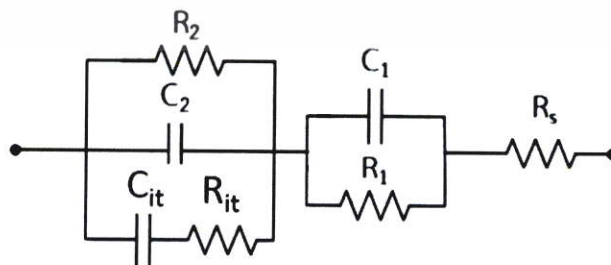
รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



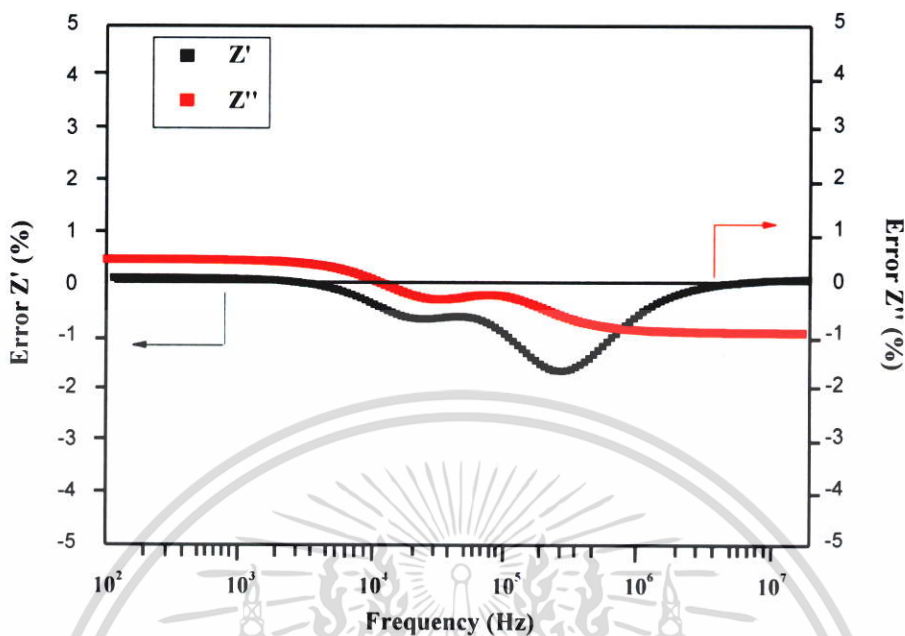
รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

โดยปกติกราฟความสัมพันธ์ $Z'-Z''$ ของรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) มักจะปรากฏเป็นกราฟรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกัน ทั้งขณะทำการไบแอสหรือไม่ได้ไบแอสให้กับไดโอดที่ได้ประจุสูงขึ้น กราฟรูปครึ่งวงกลมจะแสดงให้เห็นพีคที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่สูง ซึ่งพีคที่ความถี่ต่ำจะสัมพันธ์อยู่กับสถานะผิวเชื่อมต่อของรอยต่อพี-เอ็น ส่วนพีคที่ความถี่สูงจะสัมพันธ์อยู่กับบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อพี-เอ็น แต่ในสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ไม่ปรากฏกราฟคล้ายรูปครึ่งวงกลมสองพีค แสดงว่ากับดักพาหะมีอิทธิพลต่อการจับอิเล็กตรอนอิสระอย่างมาก ซึ่งวงจรสมมูลสำหรับการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.39 [46]



รูปที่ 4.39 แสดงวงจรสมมูลของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่วัดได้กับค่าทางทฤษฎีของไดโอดชนิดรอยต่อวิริพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่แรงดันไบแอส 0.2 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

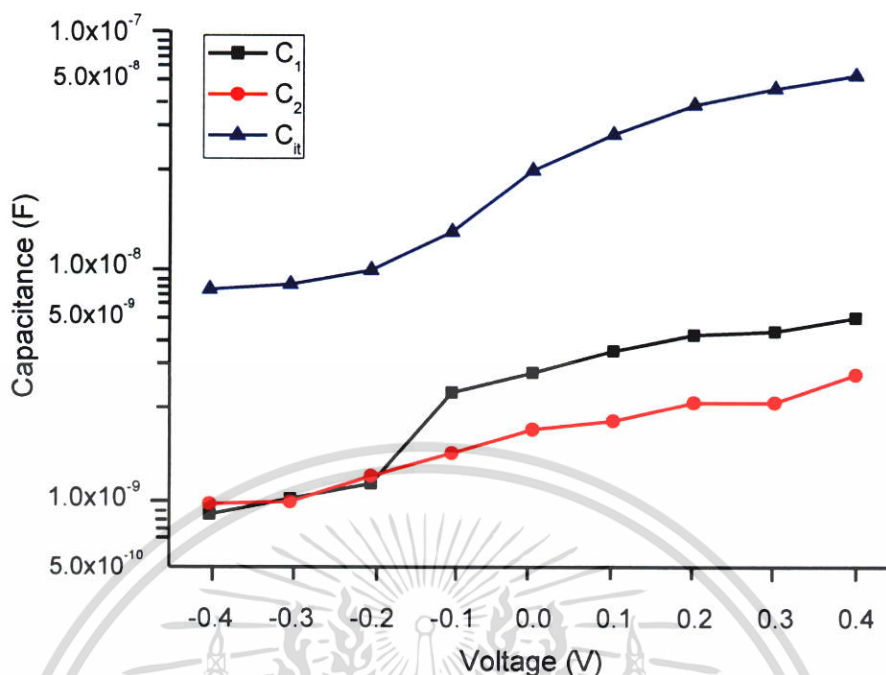
ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

Bias Voltage (V)	R_s (Ω)	C_1 (F)	C_2 (F)	C_{it} (F)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	R_{it} (Ω)	$\tau_1 = R_1 C_1$ (s)	$\tau_2 = R_2 C_2$ (s)	$\tau_{it} = R_{it} C_{it}$ (s)	$D_{it} = \frac{C_{it}}{qA}$ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)
-0.4	33.84	8.43×10^{-10}	9.23×10^{-10}	7.81×10^{-9}	2.45×10^2	1.93×10^3	3.56×10^3	1.92×10^{-7}	1.78×10^{-6}	2.58×10^{-5}	6.91×10^{11}
-0.3	32.53	9.82×10^{-10}	9.54×10^{-10}	8.23×10^{-9}	1.96×10^2	2.11×10^3	3.14×10^3	2.07×10^{-7}	3.08×10^{-5}	2.67×10^{-5}	7.28×10^{11}
-0.2	31.78	1.14×10^{-9}	1.23×10^{-9}	9.45×10^{-9}	1.87×10^2	2.50×10^3	2.83×10^3	2.13×10^{-7}	3.35×10^{-6}	2.78×10^{-5}	8.36×10^{11}
-0.1	30.54	2.81×10^{-9}	1.54×10^{-9}	1.38×10^{-8}	1.67×10^2	2.87×10^3	2.65×10^3	4.68×10^{-7}	4.42×10^{-6}	3.66×10^{-5}	1.22×10^{12}
0	29.49	3.42×10^{-9}	1.95×10^{-9}	2.53×10^{-8}	1.28×10^2	2.61×10^3	2.48×10^3	4.44×10^{-7}	5.09×10^{-6}	6.27×10^{-5}	2.24×10^{12}
0.1	29.01	4.25×10^{-9}	2.12×10^{-9}	3.61×10^{-8}	9.34×10^1	2.54×10^3	1.45×10^3	4.38×10^{-7}	5.01×10^{-6}	5.43×10^{-5}	3.19×10^{12}
0.2	27.79	4.98×10^{-9}	2.45×10^{-9}	4.83×10^{-8}	8.92×10^1	2.24×10^3	9.43×10^2	3.92×10^{-7}	4.49×10^{-6}	5.23×10^{-5}	4.27×10^{12}
0.3	27.38	5.14×10^{-9}	2.93×10^{-9}	5.78×10^{-8}	5.67×10^1	1.84×10^3	8.95×10^2	2.91×10^{-7}	3.39×10^{-6}	5.17×10^{-5}	5.11×10^{12}
0.4	25.41	5.89×10^{-9}	3.34×10^{-9}	6.45×10^{-8}	4.28×10^1	1.79×10^3	8.42×10^2	2.52×10^{-7}	2.98×10^{-6}	4.55×10^{-5}	5.70×10^{12}

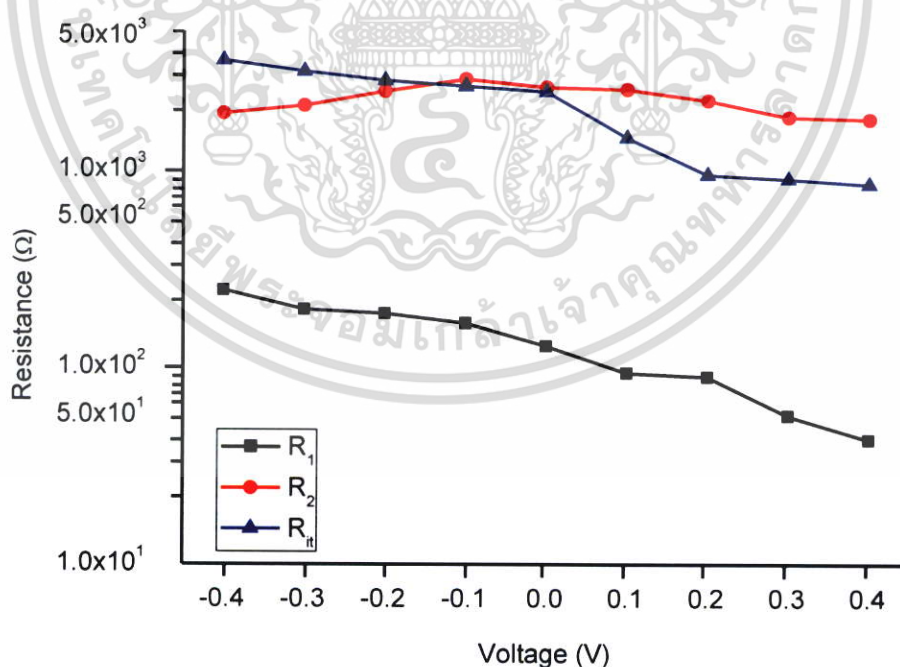
จากรูปที่ 4.41 ที่แรงดันไบแอสค่าใดๆ พบว่า ความจุไฟฟ้าของกัปดักพาหะ (C_{it}) มีค่ามากกว่าความจุไฟฟ้าของพาหะของรอยต่อ ZnO/SnS (ในที่นี้จะขอเรียกว่าความจุไฟฟ้า C_1) และ ความจุไฟฟ้าของรอยต่อ ZnO/SnS ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะของ รอยต่อ CdS/ZnO (ในที่นี้จะขอเรียกว่าความจุไฟฟ้า C_2) เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจาก -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ทั้งความจุไฟฟ้า C_1 และ ความจุไฟฟ้า C_2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความจุไฟฟ้าของบริเวณ พร่องพาหะสามารถอธิบายได้ด้วย ความสัมพันธ์ $C = \epsilon_s A / W_D$ เมื่อ W_D คือความกว้างของบริเวณ พร่องพาหะภายใต้แรงดันไบแอสตรงแล้ว W_D จะมีค่าลดลงจึงส่งผลให้ความจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 มีค่า เพิ่มขึ้น สำหรับภายใต้แรงดันไบแอสกลับทางแล้ว W_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 มีค่า ลดลง แต่สำหรับความจุไฟฟ้าของกัปดักพาหะ (C_{it}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่ เพิ่มขึ้น แสดงว่ากัปดักพาหะสามารถจับพาหะอิสระได้เพิ่มขึ้น

สำหรับ R_1 และ R_2 คือความต้านทานชั้นที่ ต่อขนานกับความจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 ตามลำดับ ส่วน R_{it} คือ ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับความจุไฟฟ้า C_{it} เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจาก -0.4 ถึง 0.4 ทั้งค่า R_1 และ R_{it} มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วน R_2 จะมีค่าสูงสุดที่แรงดันไบแอสประมาณ -0.1 โวลต์ และ R_2 จะมีค่าลดลง เมื่อแรงดันไบแอสตรงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพาหะอิสระเพิ่มขึ้นจาก กระบวนการฉีดพาหะอิสระ (injection current) ข้ามรอยต่อ C_2 สำหรับภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับ ทางที่เพิ่มขึ้น จะมีกระแสรั่ว (leakage current) เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการสร้างพาหะอิสระ (generation process) ส่งผลให้ความต้านทาน R_2 ลดลง

τ_1 , τ_2 และ τ_{it} คือค่าคงตัวของเวลา (time constant) ของพาหะที่สอดคล้องกับความจุ ไฟฟ้า C_1 , C_2 และ C_{it} พบว่า τ_1 , τ_2 และ τ_{it} มีค่าสูงสุดอยู่ที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์ ภายใต้แรงดัน ไบแอสกลับทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งกระบวนการสร้างพาหะอิสระ (generation process) จะเด่น ทั้ง τ_1 , τ_2 และ τ_{it} มีแนวโน้มลดลง ในทำนองเดียวกันเมื่อแรงดันไบแอสตรงที่เพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับกระบวนการ รวมตัวของพาหะอิสระ (recombination process) ทั้ง τ_1 , τ_2 และ τ_{it} จะหมายถึงช่วงชีวิต (lifetime) ของอิเล็กตรอนอิสระของกระบวนการอัดประจุ/ คายประจุ (charge /discharge process) ที่สัมพันธ์กับรอยต่อ ZnO/SnS, CdS/ZnO และกัปดักพาหะที่สถานะผิวเชื่อมต่อ (interface trap) ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ในเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ CdS/Cu₂ZnSnS₄ [46] และความหนาแน่นของกัปดักพาหะ (D_{it}) มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นจาก 6.91×10^{11} เป็น 5.71×10^{12} ต่อตารางเซนติเมตรต่ออิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อแรงดันไบแอส เพิ่มขึ้นจาก -0.4 เป็น 0.4 โวลต์ แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะมีแนวโน้มลดลงจากระดับ ตื้น (shallow traps) ไปสู่ระดับลึก (deep traps)

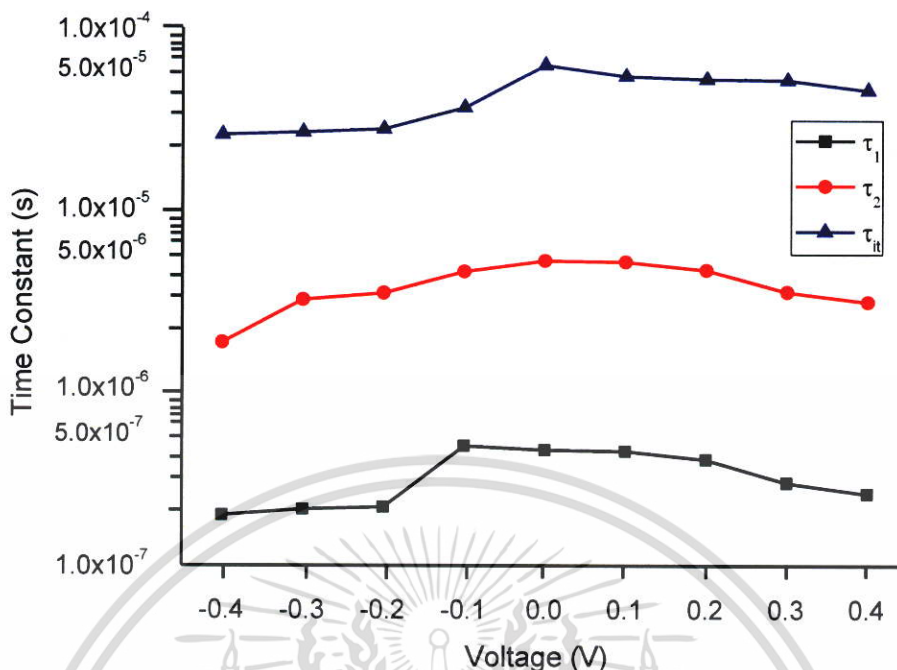


รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ C_1 และ C_2 และค่าความจุของกัณฑ์พาหะ (C_{ft}) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

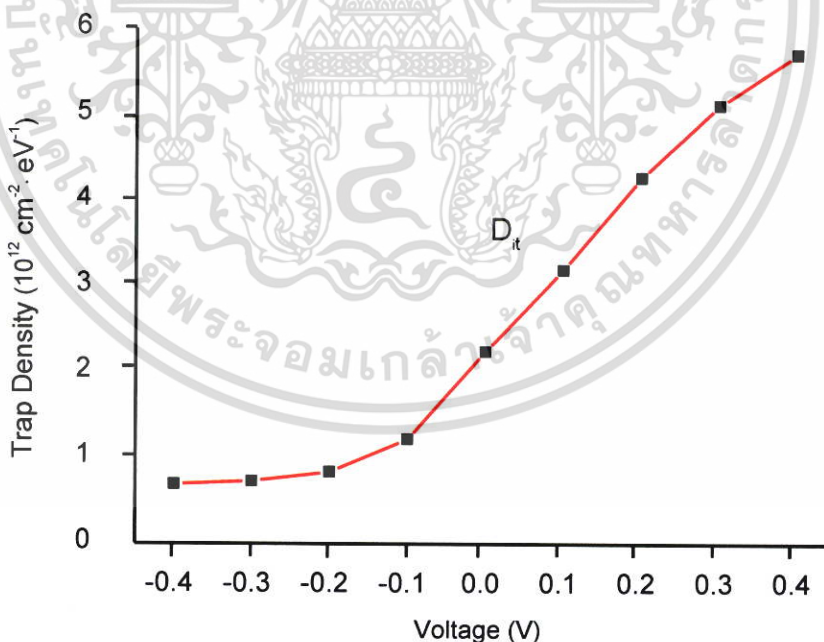


รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้น R_1 และ R_2 และค่าความต้านทานชั้นของกัณฑ์พาหะ (R_{ft}) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา τ_1 และ τ_2 และค่าคงตัวของเวลาของกับดักพาหะ (τ_{it}) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่อวีวีพี CdS/ZnO/SnS

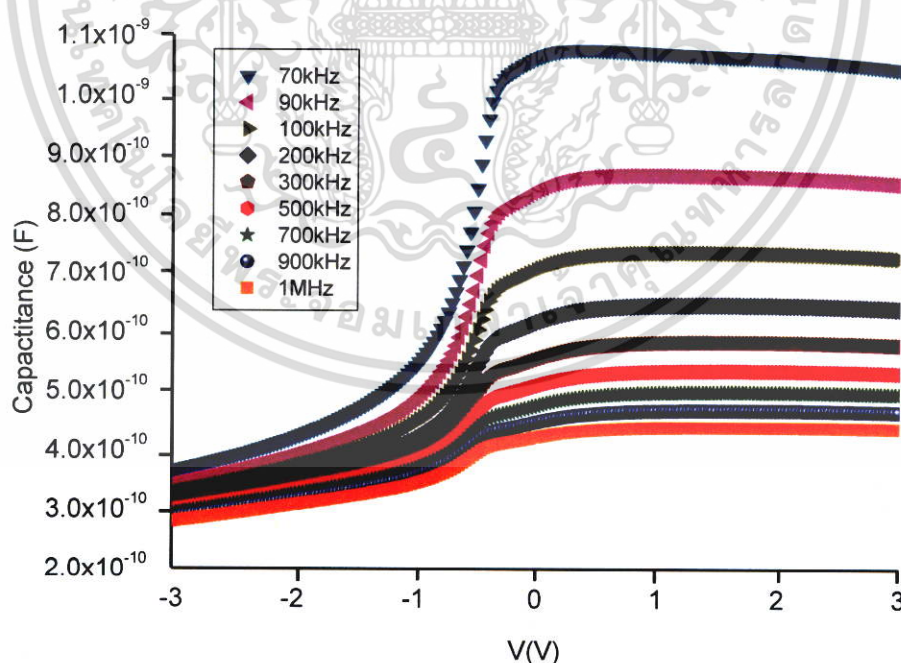


รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ (D_{it}) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.4 ถึง 0.4 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดของชนิดรอยต่อวีวีพี CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

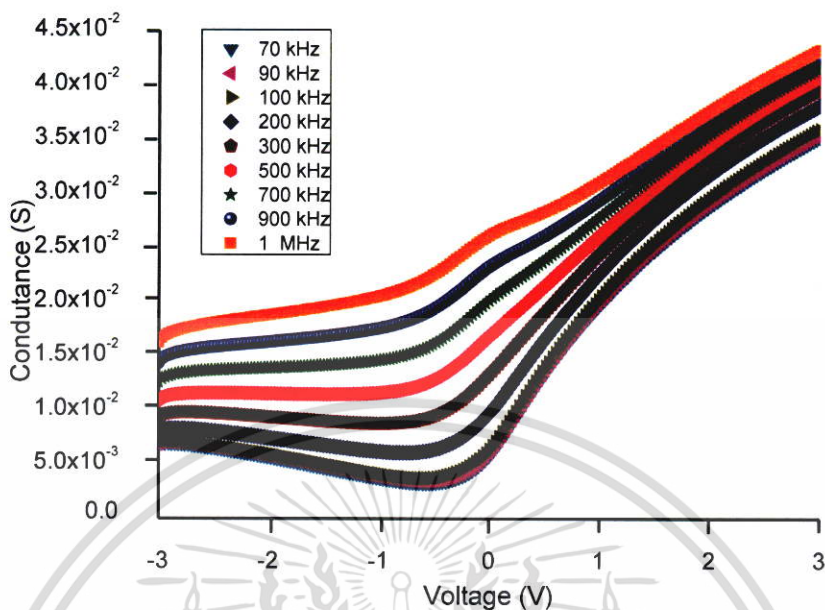
4.6.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องในช่วงความถี่ 70 ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดชนิดรอยต่อ วิวิธพันธุ์ CdS/ZnO/SnS

ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยใช้แรงดัน -3 ถึง 3 โวลต์ ในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.44 แสดงว่า รอยต่อวิวิธพันธุ์ประพาดตัวกลายเป็นรอยต่อ MIS โดยที่ชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ประพาดตัวเป็นชั้นอินทริ นสิค (intrinsic layer) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสถานะผิวเชื่อมต่อปรากฏอยู่ สถานะผิวเชื่อมต่อนี้สามารถจับ และปล่อยอิเล็กตรอนได้ภายใต้สนามไฟฟ้าสลับ เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะก่อให้เกิดเงื่อนไข ขุมนุ้พพาหะ ส่วนกรณีภายใต้สถานะไบแอสกลับทางจะก่อให้เกิดเงื่อนไขพร่องพาหะ และพบว่าที่ แรงดันไบแอสย้อนมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้าง ของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสกลับทางมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสกลับทาง ให้มากขึ้นแล้ว ความจุไฟฟ้าจะมีค่าเกือบคงที่ แสดงรอยต่อ MIS อยู่ในสภาวะกลับกลาย (inversion condition) ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบแอสกลับทางที่มี ค่าเพิ่มขึ้น [17,48]

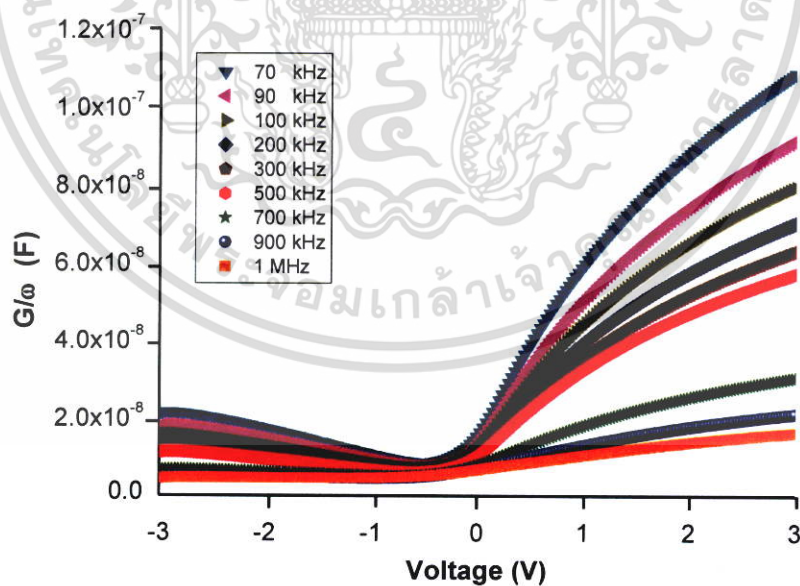


รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS /ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

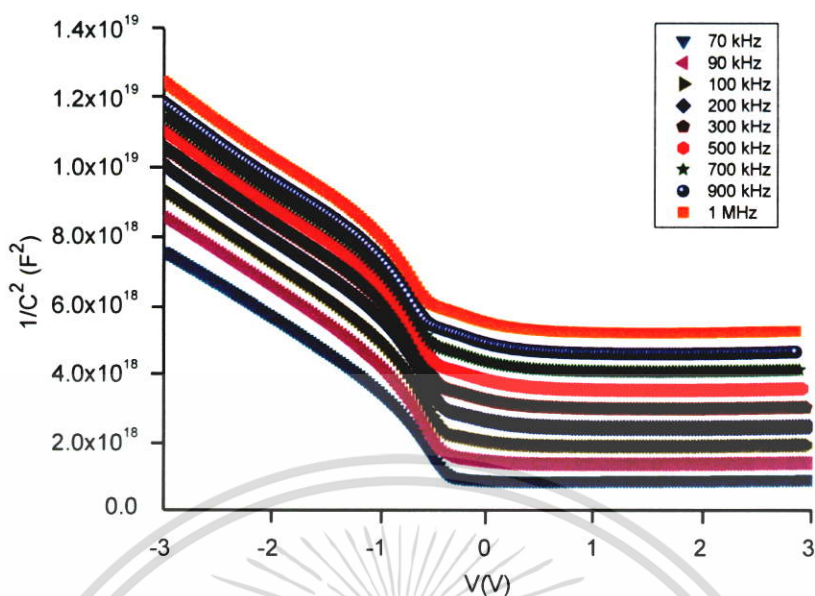


รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS

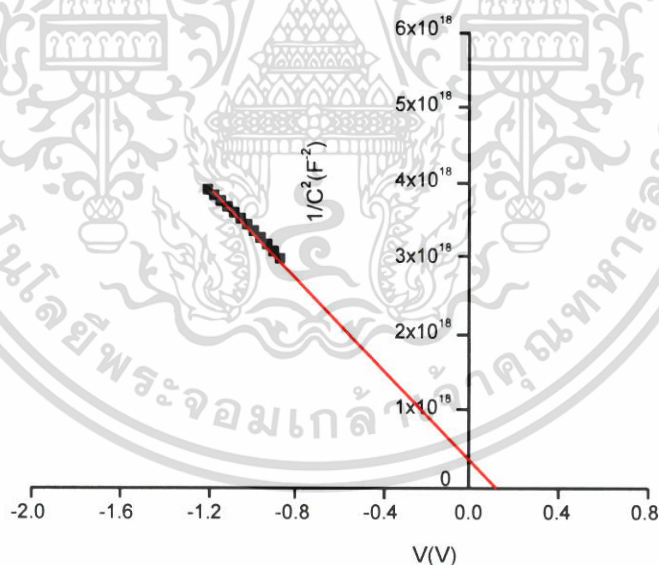


รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS

จากรูปที่ 4.48 เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นลักษณะกราฟเชิงเส้น แล้วลากเส้นตรงลงมาตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมของรอยต่อ (V_i) จากรูปมีค่า 0.11 โวลต์ และค่าความชันสามารถนำมาใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) จากความสัมพันธ์ของสมการ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_S q N_D A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.80)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า, ϵ_S คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำ CdS จะมีค่า $\epsilon_S = \epsilon_r \epsilon_o$ โดยที่ ϵ_r คือค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.38 และ ϵ_o คือ permittivity ของสภาวะสุญญากาศ เท่ากับ 8.85×10^{-14} ฟารัดต่อเซนติเมตร และจากความสัมพันธ์ในสมการที่ได้ทำการเลือกส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสย้อนกลับ -1.2 ถึง -0.8 โวลต์ จากนั้นทำการลากเส้นตรงลงมาตัดกับแกนนอน ซึ่งเป็นแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า จะได้ค่า V_i ที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ดังนี้ คือ

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.81)$$

ส่วนค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) สามารถคำนวณได้จากค่าความชันจากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของสมการที่ คือ

$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q \epsilon_S N_D A^2} \quad (4.82)$$

$$N_D = \frac{2}{q \epsilon_S A^2 (\text{ความชัน})} \quad (4.83)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.68 ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์จะได้ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ มีค่าเท่ากับ 4.97×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

กำแพงศักย์ คือ

$$\Phi_B (C - V) = V_{bi} + E_F - \Delta \Phi_B \quad (4.84)$$

ระดับพลังงานเฟอร์มิ คือ

$$E_C - E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.85)$$

ความหนาแน่นของสถานะยังผล คือ

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_c^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $m_e^*(\text{CdS}) = 0.16m_0$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของขอตตักี่ คือ

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\epsilon_s\pi} \right] \quad (4.87)$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อขอตตักี่ คือ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (4.88)$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ คือ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_D}} \quad (4.89)$$

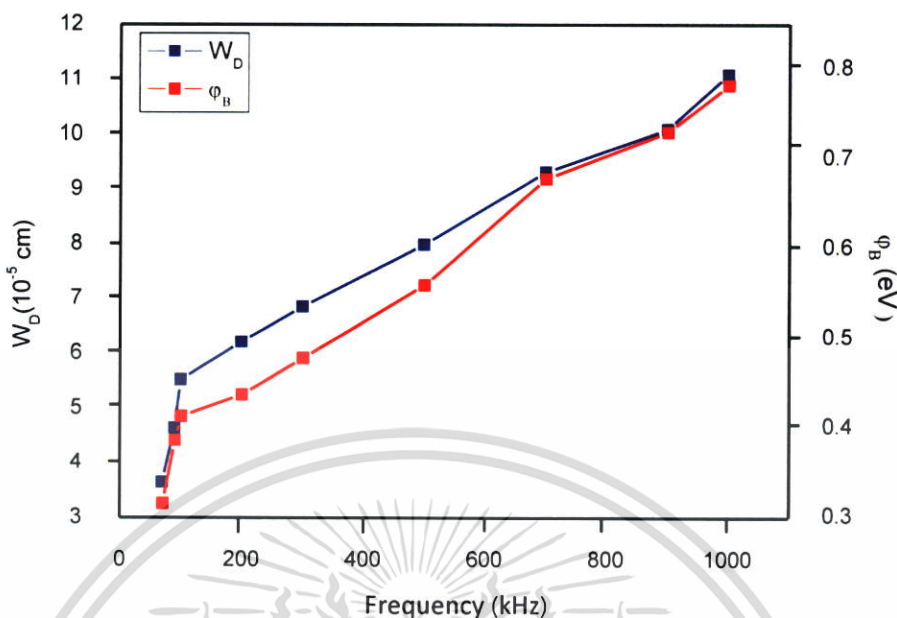
ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง คือ

$$\psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\epsilon_s} \quad (4.90)$$

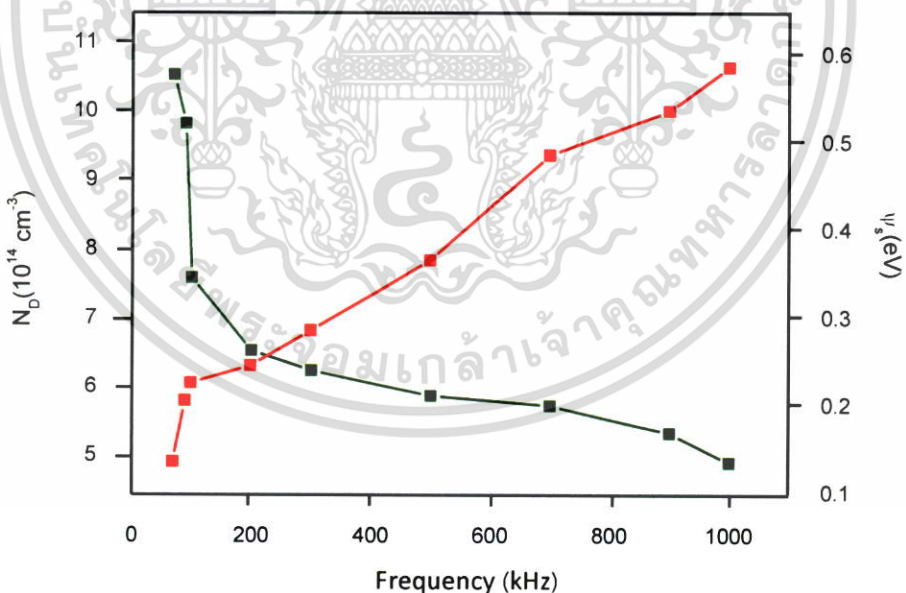
ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS

Frequency (kHz)	V_i (V)	N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	$\Phi_B(C - V)$ (eV)	W_D (cm)	ψ_s (eV)
70	0.11	1.06×10^{15}	0.186	1.02×10^{-2}	0.315	2.85×10^{-5}	0.136
90	0.18	9.89×10^{14}	0.191	1.13×10^{-2}	0.386	4.65×10^{-5}	0.206
100	0.20	7.66×10^{14}	0.197	1.09×10^{-2}	0.413	5.53×10^{-5}	0.226
200	0.22	6.60×10^{14}	0.201	1.07×10^{-2}	0.437	6.22×10^{-5}	0.246
300	0.26	6.31×10^{14}	0.203	1.11×10^{-2}	0.478	6.86×10^{-5}	0.286
500	0.34	5.94×10^{14}	0.204	1.16×10^{-2}	0.559	7.99×10^{-5}	0.366
700	0.46	5.80×10^{14}	0.205	1.24×10^{-2}	0.678	9.32×10^{-5}	0.486
900	0.51	5.40×10^{14}	0.207	1.25×10^{-2}	0.730	1.01×10^{-5}	0.536
1000	0.56	4.97×10^{14}	0.209	1.26×10^{-2}	0.782	1.11×10^{-5}	0.586

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W_D กับ ϕ_B กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS



รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_D กับ ψ_s กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS

จากรูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/ZnO/SnS แสดงพฤติกรรมใกล้เคียงความเป็นรอยต่อ MIS โดยประมาณว่าชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ประพฤติตัวเป็นชั้นอินทรินสิกของรอยต่อ MIS เมื่อทำการไบแอสกลับทางจะเกิดเงื่อนไขพร่องพาหะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(depletion condition) ที่รอยต่อ MIS แต่เมื่อทำการไบแอสตรงจะเกิดเงื่อนไขขุมพราะที่รอยต่อ MIS รวมทั้ง R_s มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า และค่าความนำไฟฟ้าที่รอยต่อ MIS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะขุมพราะ ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขเพื่อขจัดผลของ R_s ที่มีผลต่อความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า โดยที่ R_s มีค่าขึ้นกับความถี่ ดังสมการที่ 4.91

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.91)$$

ค่าความจุของชั้นบาง ๆ ของชั้นอินทรินสิกในที่นี่คือชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ที่ได้จากการแก้ไขด้วยด้วยผลของ R_s แล้วเป็นดังนี้ คือ [48]

$$C_{ox} = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.92)$$

ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าที่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องแล้วจะเป็น C_{ADJ} และ G_{ADJ} ดังความสัมพันธ์

$$C_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.93)$$

$$G_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.94)$$

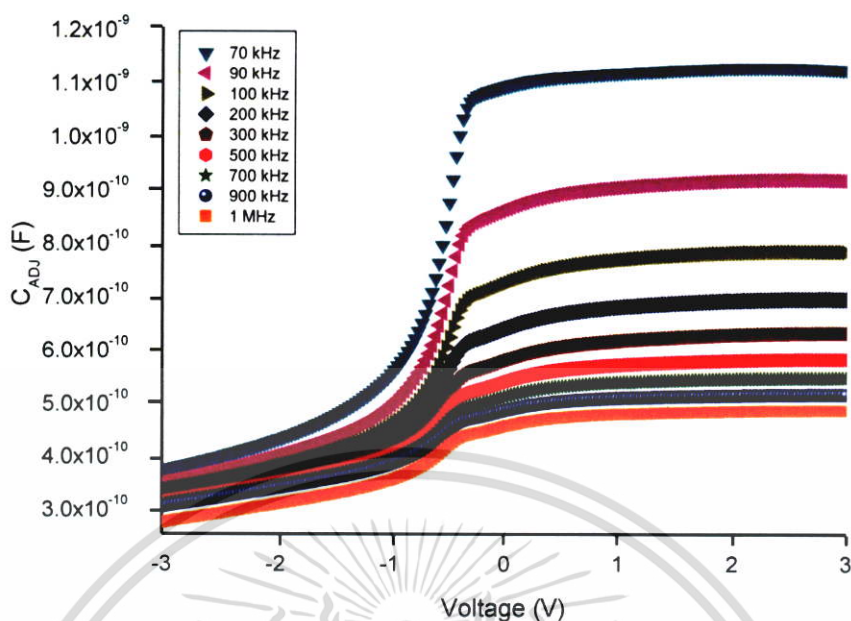
เมื่อ

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (4.95)$$

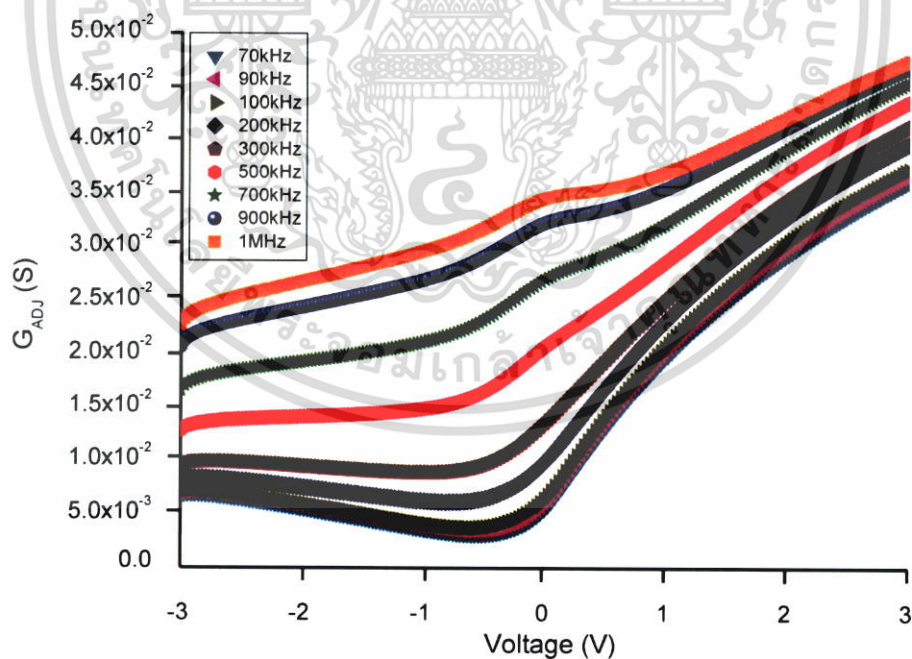
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า จะแสดงดังรูปที่ 4.52 และ 4.53 ภายใต้เงื่อนไขขุมพราะที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ ความหนาแน่นของกับดักพราะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\left(\frac{G_{max}}{\omega} \right)}{\left(\left(\frac{G_{max}}{\omega} \right)^2 \left(\frac{1}{C_{ox}^2} \right) + \left(1 - \left(\frac{C_m}{C_{ox}} \right) \right)^2 \right)} \right] \quad (4.96)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

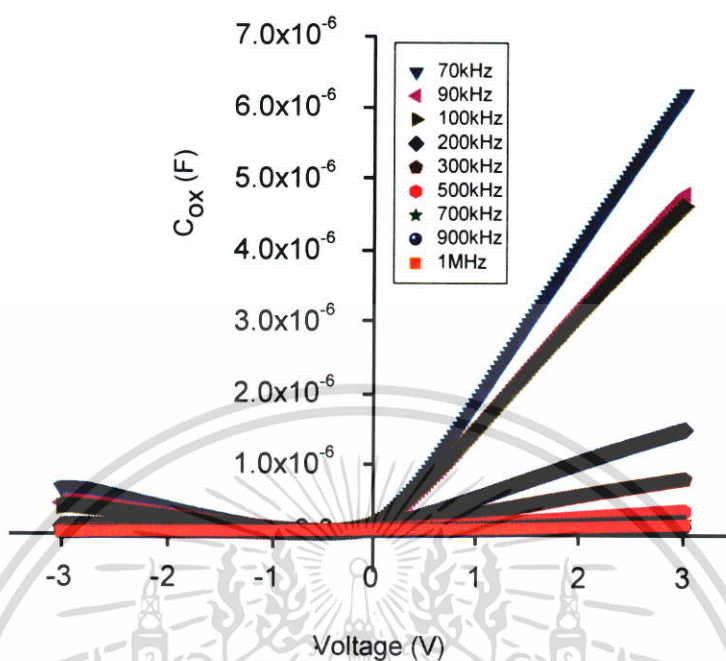


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS /ZnO/SnS

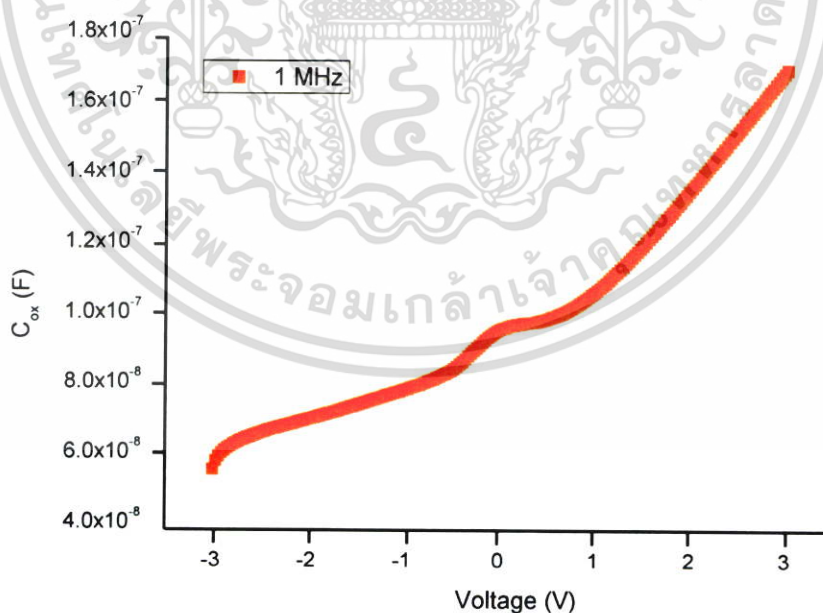


รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS /ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ox} กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ox} กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

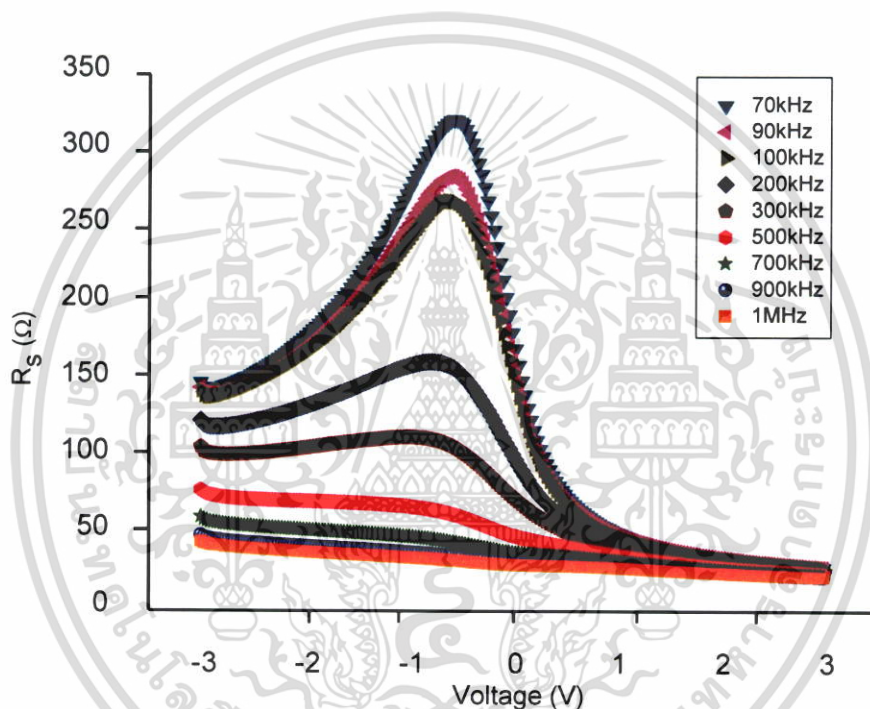
ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์โวลต์ ค่าความหนาของชั้น ZnO สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_s A}{d}$$

$$d = \frac{\epsilon_s A}{C_{\text{ox}}}$$

$$= \frac{(8.15)(8.85 \times 10^{-14})(0.07)}{9.9 \times 10^{-8}}$$

$$= 5.10 \times 10^{-7} \text{ cm} = 5.10 \text{ nm}$$

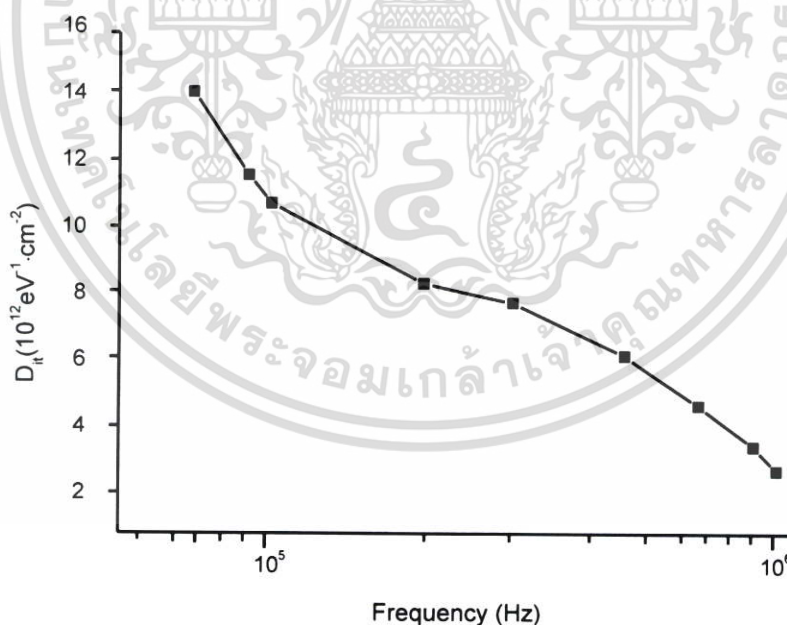


รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด G_{\max}/ω ที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด C_m ความจุบริเวณชั้นออกไซด์ C_{ox} และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดชนิดรอยต่ออวิริพันธ์ CdS /ZnO/SnS

Frequency (kHz)	G_{\max}/ω (V = 3V) (nF)	C_m (nF)	C_{ox} (nF)	D_{it} ($\times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)
70	108.44	1.04	178.03	14.25
90	91.70	0.85	144.23	11.76
100	79.69	0.72	142.02	10.91
200	70.22	0.64	100.64	8.51
300	63.27	0.57	95.58	7.92
500	57.66	0.53	94.45	6.35
700	30.12	0.49	86.19	4.84
900	21.59	0.47	78.97	3.63
1000	16.54	0.44	96.61	2.89



รูปที่ 4.57 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง D_{it} กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 70 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิริพันธ์ CdS /ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.8 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อการเรงตันไปแอสไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ ที่อุณหภูมิในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

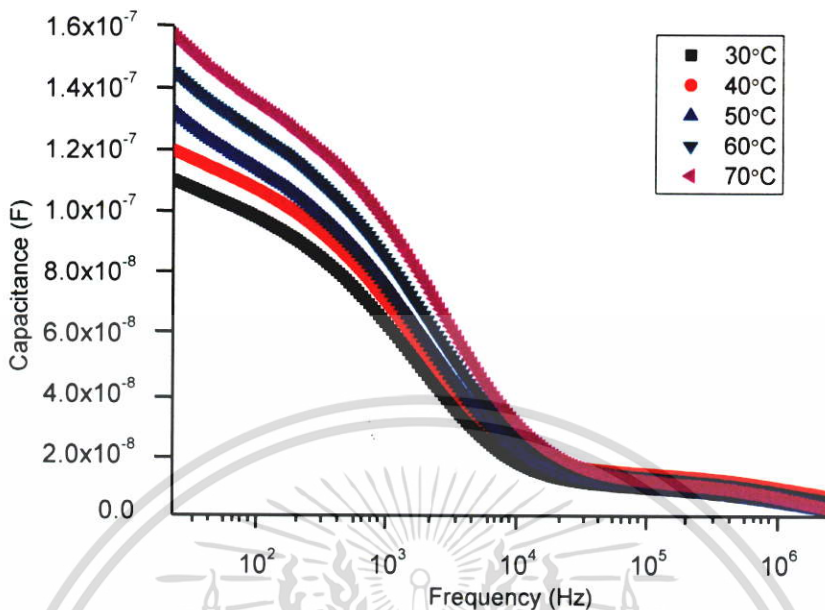
ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นดังรูปที่ 4.57 ซึ่งกรณีของความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน ความจุของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/ZnO/SnS ที่วัดได้คือ C_p จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์

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

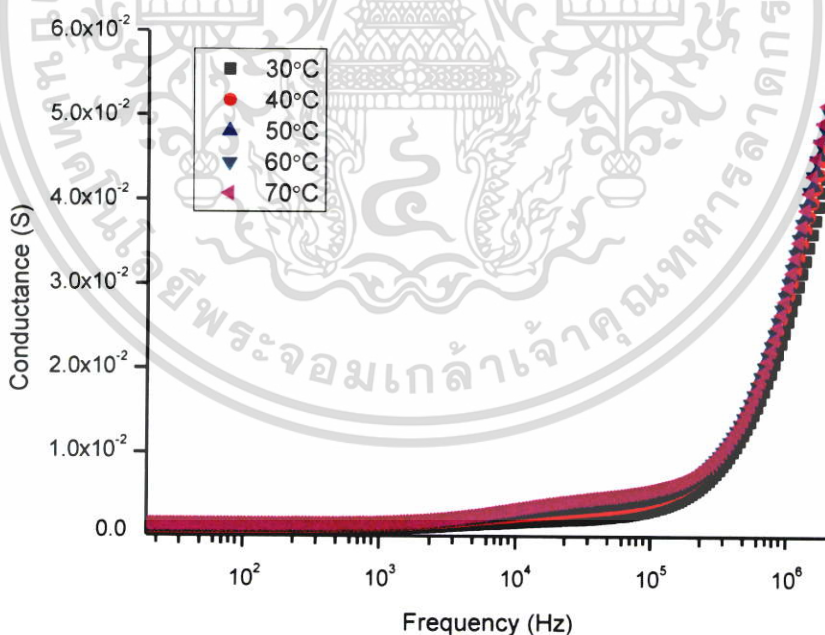
เมื่อ C_D คือความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน C_{it} คือความจุไฟฟ้าของกับดักประจุ รูปที่ 4.64 แสดงถึงความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของจอนเซอร์ (Joncher relation) คือ

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

เมื่อ A คือค่าคงที่ เลยกยกกำลัง s จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศาเซลเซียสความนำไฟฟ้า (G) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ความถี่ต่ำกว่า 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ความนำไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับความถี่ แต่สำหรับที่ความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าที่ความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากกับดักพาหะได้

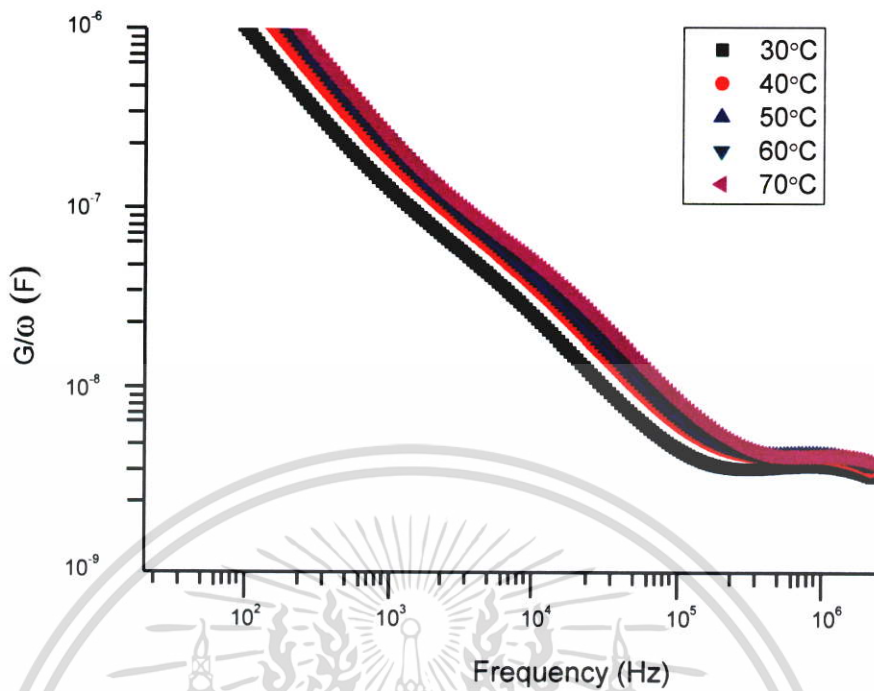


รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS

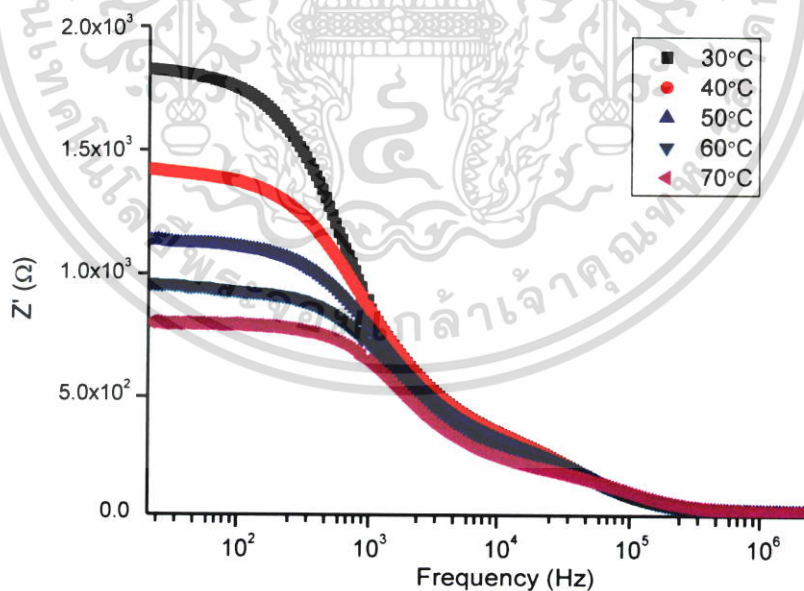


รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

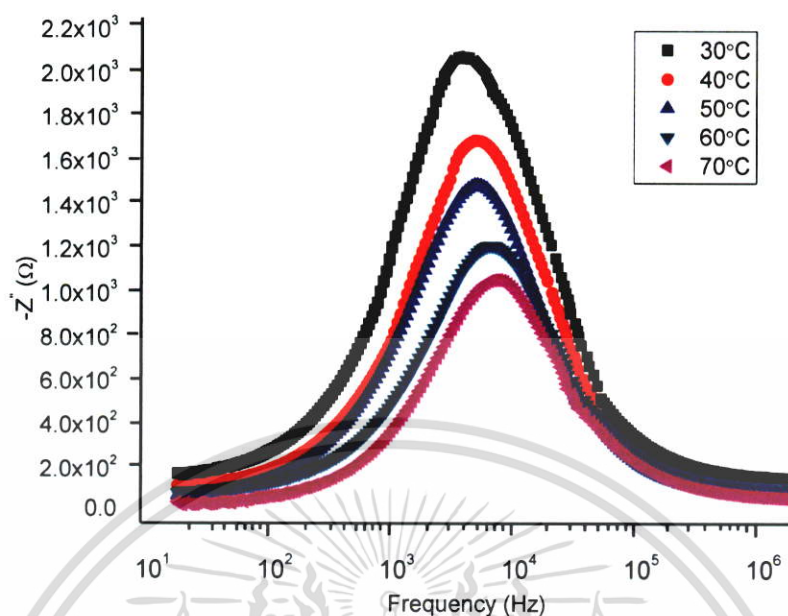


รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

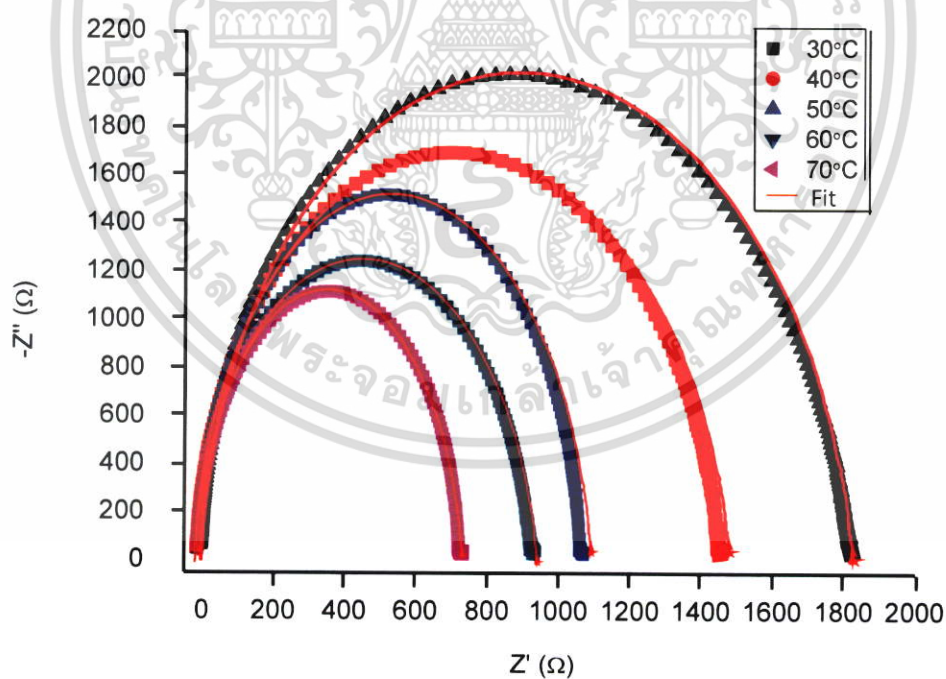


รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS

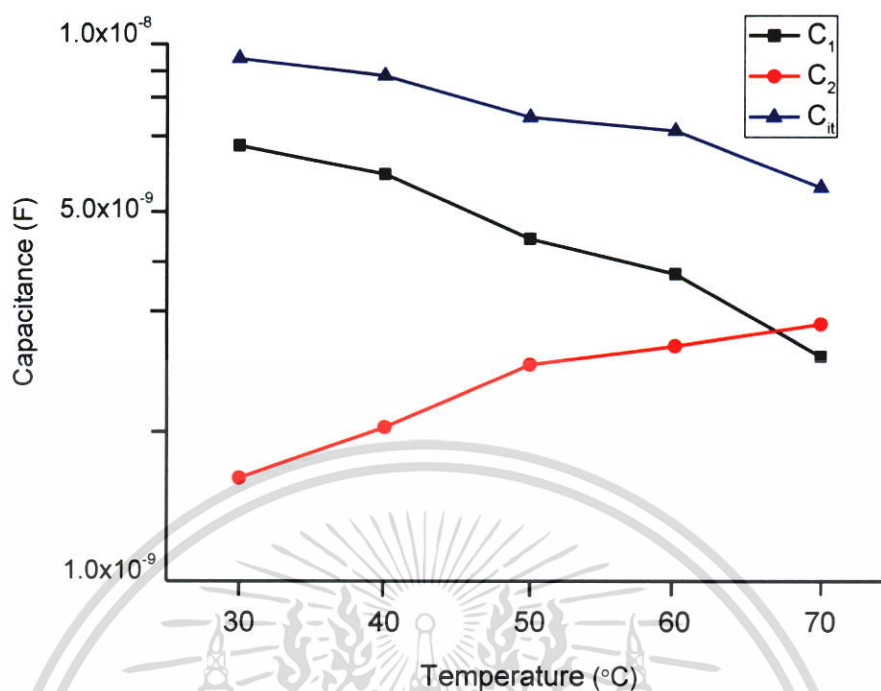


รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS

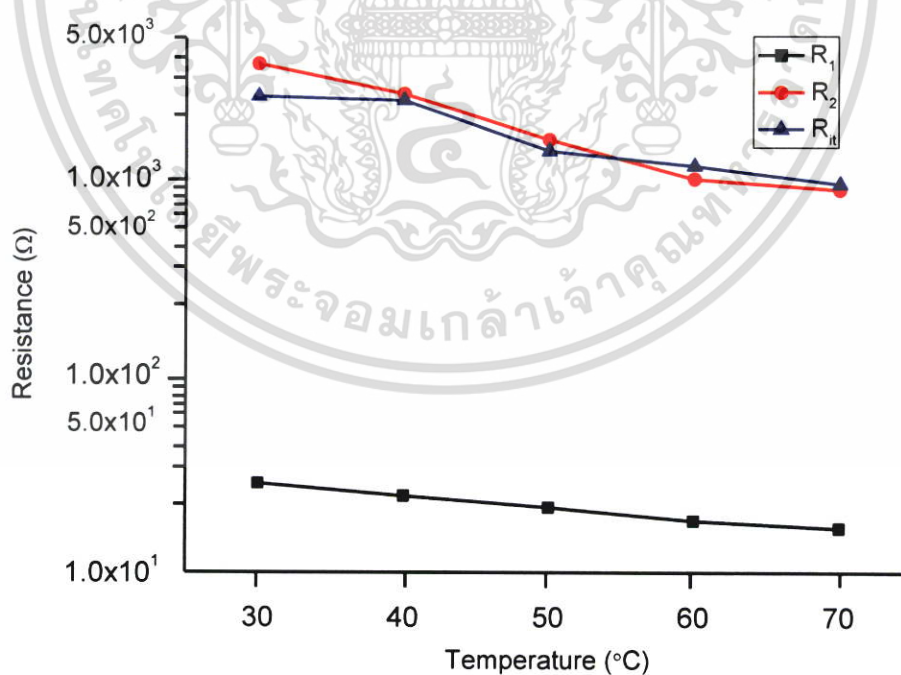
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส

Temperature (°C)	R_s (Ω)	C_1 (F)	C_2 (F)	C_{it} (F)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	R_{it} (Ω)	$\tau_1 = R_1 C_1$ (s)	$\tau_2 = R_2 C_2$ (s)	$\tau_{it} = R_{it} C_{it}$ (s)	$D_{it} = \frac{C_{it}}{qA}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{eV}^{-1}$)
30	35.42	6.48×10^{-9}	1.56×10^{-9}	9.41×10^{-9}	2.82×10^1	3.71×10^3	2.55×10^3	1.83×10^{-6}	5.79×10^{-6}	2.40×10^{-5}	8.32×10^{12}
40	30.73	5.43×10^{-9}	1.94×10^{-9}	8.73×10^{-9}	2.44×10^1	2.63×10^3	2.43×10^3	4.40×10^{-6}	5.10×10^{-6}	2.12×10^{-5}	7.72×10^{12}
50	29.54	4.53×10^{-9}	2.54×10^{-9}	7.32×10^{-9}	2.13×10^1	1.54×10^3	1.35×10^3	9.27×10^{-6}	3.91×10^{-6}	9.88×10^{-5}	6.47×10^{12}
60	27.87	3.74×10^{-9}	2.75×10^{-9}	6.89×10^{-9}	1.82×10^1	9.78×10^3	1.14×10^3	6.81×10^{-6}	2.69×10^{-6}	7.85×10^{-6}	6.09×10^{12}
70	25.45	2.63×10^{-9}	3.02×10^{-9}	5.41×10^{-9}	1.67×10^1	8.62×10^3	9.21×10^2	4.39×10^{-6}	2.60×10^{-6}	4.98×10^{-6}	4.78×10^{12}

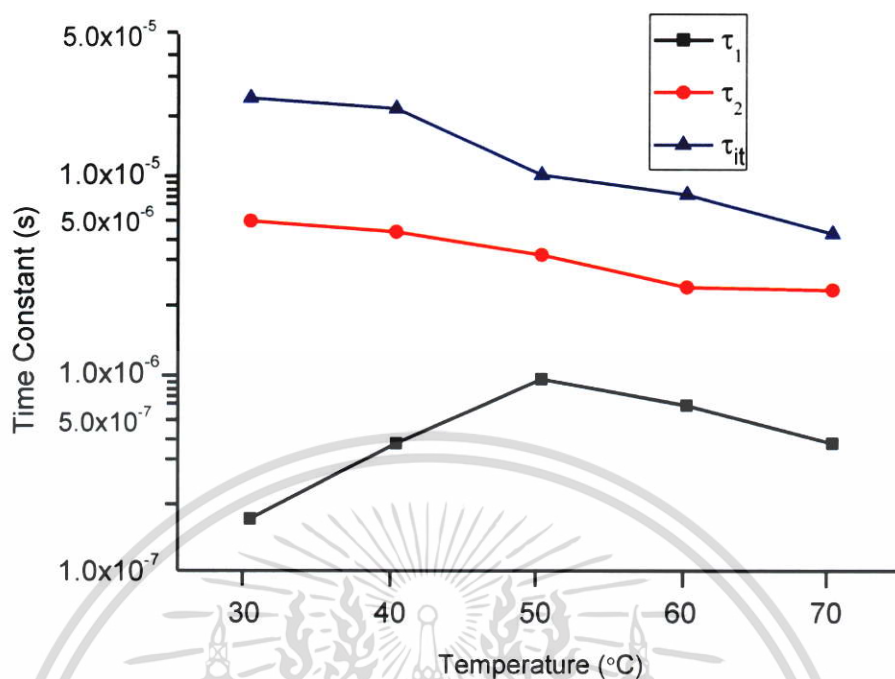


รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ C_1 และ C_2 และค่าความจุของกัปดักพาหะ (C_{it}) ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้น R_1 และ R_2 และค่าความต้านทานชั้นของกัปดักพาหะ (R_{it}) ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS /ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

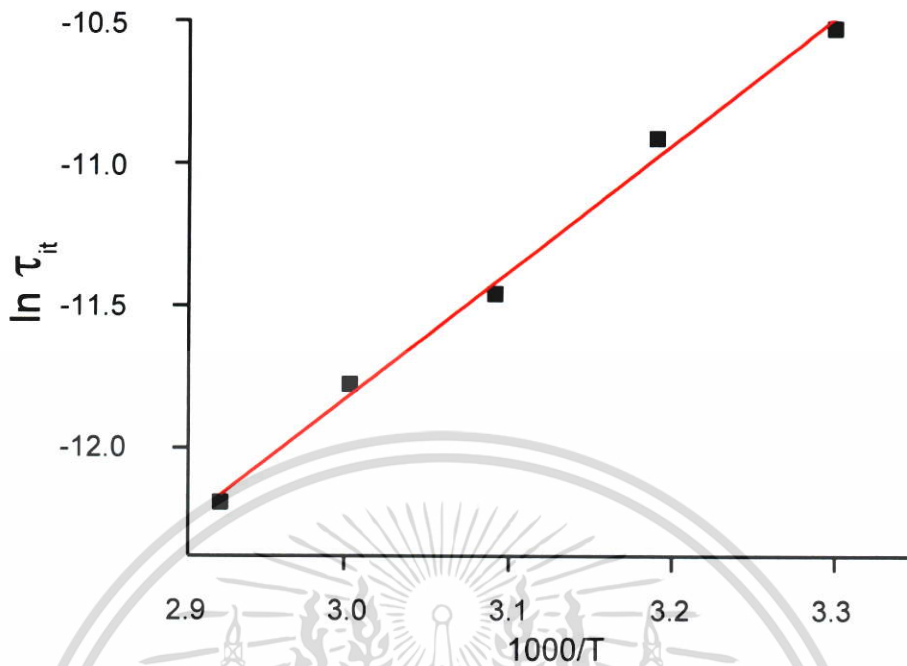


รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา τ_1 และ τ_2 และค่าคงตัวของเวลาของกับดักพาหะ (τ_{it}) ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส

Temperature		$\left(\frac{1000}{T}\right)$	τ_{it}	$\ln \tau_{it}$
(°C)	K			
30	303	3.30	2.40×10^{-5}	-10.64
40	313	3.19	2.21×10^{-5}	-10.76
50	323	3.09	9.88×10^{-5}	-11.52
60	333	3.00	7.85×10^{-5}	-11.76
70	343	2.92	4.98×10^{-5}	-12.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของเวลา $\ln \tau_{it}$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวีริสพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส

จากสมการที่ 2.154 ในบทที่ 2 คือ

$$\tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_C)^{-1} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

กำหนดให้ $\tau_0 = (\sigma_T v_{th} N_C)^{-1}$ ดังนั้น

$$\tau_{it} = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

$$\ln \tau_{it} = \frac{\Delta E}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \tau_0$$

$$\text{slope} = \frac{\Delta E}{1000k}$$

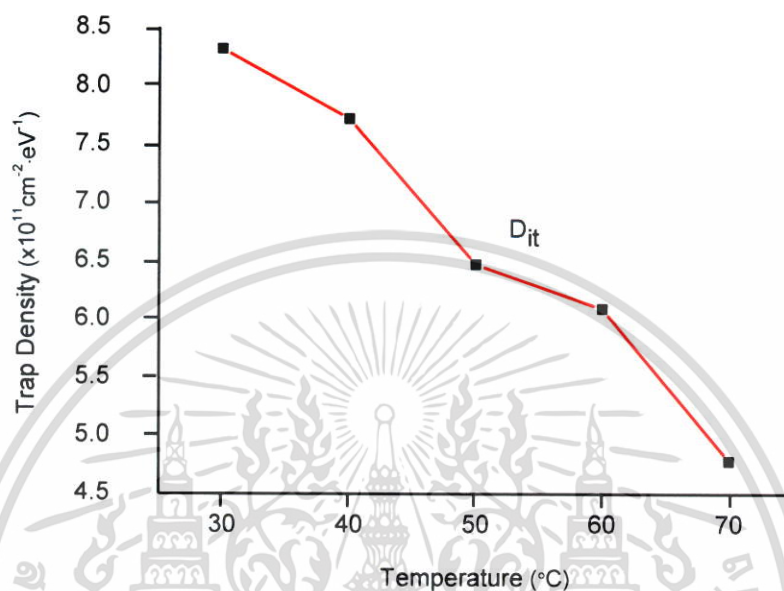
เมื่อ ΔE คือ พลังงานกระตุ้น

$$\Delta E = \frac{1000k(\text{slope})}{q}$$

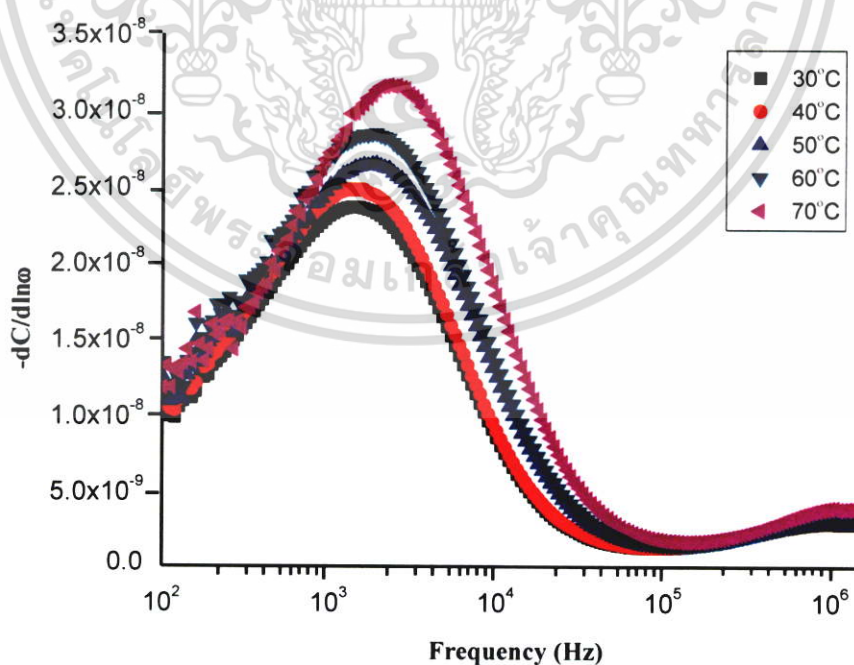
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta E = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(4.44)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$\Delta E = 0.38 \text{ eV}$$



รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ (D_{it}) ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln\omega$ กับความถี่ ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการปล่อยโฮลออกจากกับดักพาหะ $= (e_p)$ ตามแบบจำลองของช็อคเลย์-ฮอลล์-รี (SHR model) จะแสดงดังสมการ [50,51]

$$\begin{aligned} e_p &= v_{th} \sigma_p N_V \exp(-E_T / kT) \\ &= \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_T}{kT}\right) \end{aligned} \quad (4.97)$$

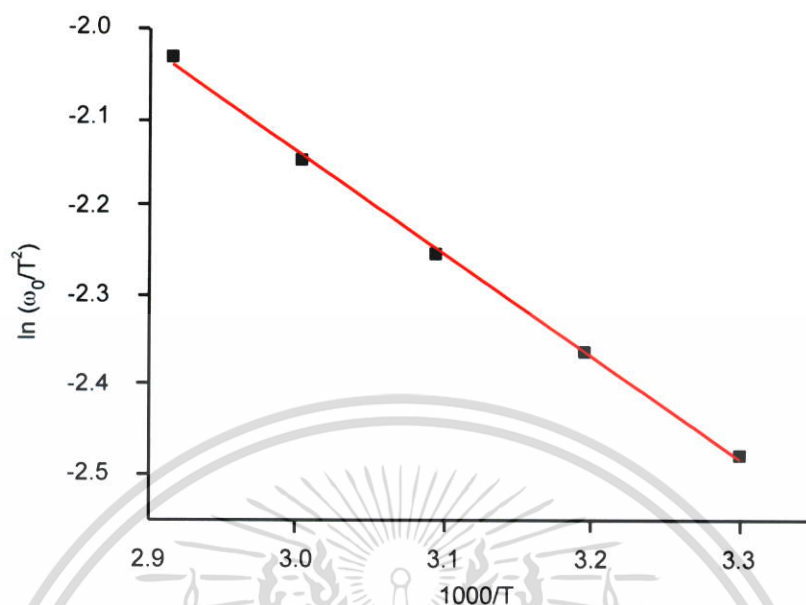
เมื่อ v_{th} คือ ความเร็วเนื่องจากพลังงานความร้อน (thermal velocity) E_T คือ ระดับพลังงานของกับดักพาหะเทียบกับแถบวาเลนซ์ ส่วน N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของแถบวาเลนซ์ และ σ_p พื้นที่ภาคตัดขวางของกับดักพาหะในการจับโฮล จากทฤษฎีพบว่า v_{th} แปรตรงกับ $T^{1/2}$ และ N_V แปรตรงกับ $T^{3/2}$ ส่วน ξ_0 คือ ความถี่ที่ทำให้พาหะหลุดออกจากกับดักพาหะ (attempt-to-escape frequency) สำหรับกับดักพาหะจำเพาะ (specific trap state) จะนิยามให้ $\omega_0 = e_p$ ดังนั้น สมการที่ (4.97) จะกลายเป็น

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.98)$$

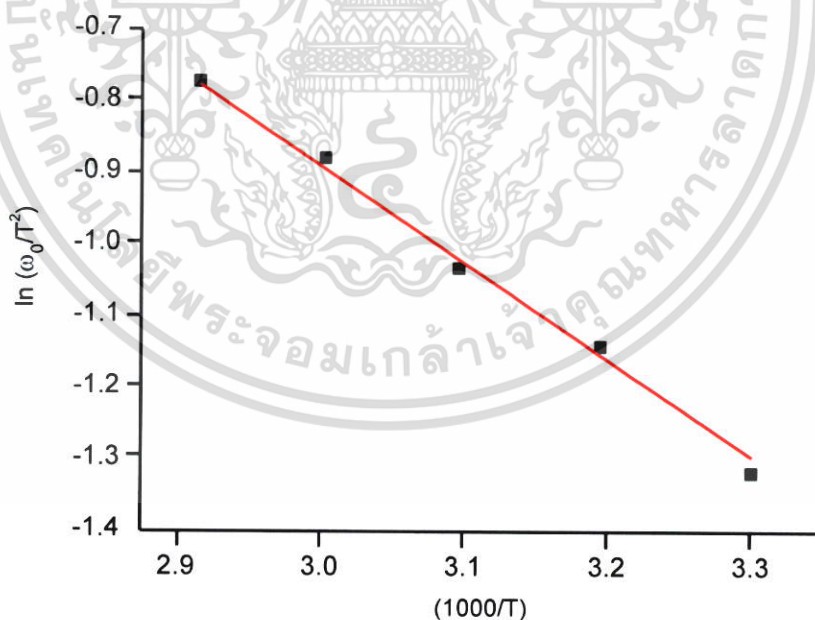
และหาค่า σ_T ได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_V} \quad (4.99)$$

สำหรับ ω_0 มีชื่อเรียกว่าความถี่เฉพาะ (characteristic frequency) โดยที่กับดักพาหะจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับที่มีความถี่ต่ำกว่า ω_0 แต่ถ้า $\omega > \omega_0$ กับดักพาหะจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ดังกล่าว [51]



รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวีวีรพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่ได้จากการพลความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln \omega$ กับความถี่

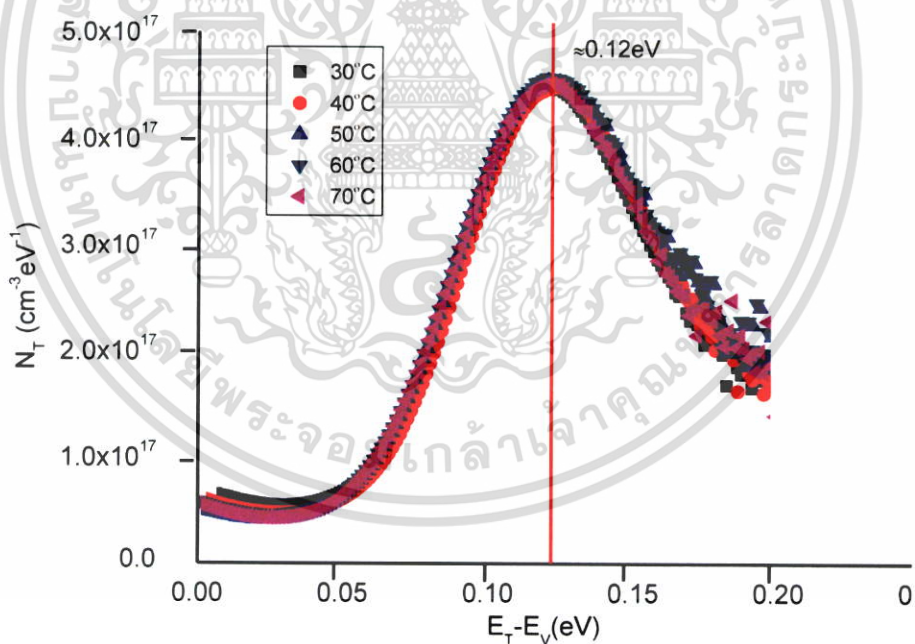


รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดชนิดรอยต่อวีวีรพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่ได้จากการพลความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'-Z''$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

Method	Temperature (°C)	f_0 (Hz)	ω_0 (S ⁻¹)	E_T (eV)	ξ_0 (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_T (cm ²)
$\frac{-dC}{d \ln \omega}$	30	1.23×10^3	0.77×10^4	0.10	3.27	9.30×10^{-26}
	40	1.36×10^3	0.86×10^4			
	50	1.66×10^3	1.04×10^4			
	60	1.90×10^3	1.20×10^4			
	70	2.46×10^3	1.54×10^4			
$Z'-Z''$	30	3.91×10^3	2.46×10^4	0.12	23.71	4.24×10^{-25}
	40	5.26×10^3	3.30×10^4			
	50	5.63×10^3	3.54×10^4			
	60	7.33×10^3	4.16×10^4			
	70	8.66×10^3	5.44×10^4			



รูปที่ 4.72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_T กับพลังงาน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส ของ ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.72 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในเนื้อสารบริเวณพร่องพาหะ ที่ระดับพลังงานค่าต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของ [50]

$$E_{\omega} = E_T - E_V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{2\xi_0 T^2}{\omega} \right) \quad (4.100)$$

โดยที่

$$N_T = \frac{-\phi_B}{\frac{kT}{q} W_D A} \left(\frac{dC}{d \ln \omega} \right) \quad (4.101)$$

และ

$$W_D = \left[\frac{2\varepsilon_s}{qN_D} (\phi_B - V) \right]^{1/2} \quad (4.102)$$

เมื่อพิจารณาว่าเป็นรอยต่อ p-n และกำหนดให้ $\phi = 0.78$ eV, $\varepsilon_r = 9.38$, $N_D = 4.97 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

ที่ $T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ว่า $T = 303\text{K}$

$$\begin{aligned} W_D &= \left[\frac{2\varepsilon_s}{qN_D} (\phi_B - V) \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{2(9.38)(8.85 \times 10^{-14})(0.78)}{(1.6 \times 10^{-19})(4.97 \times 10^{14})} \right]^{1/2} \\ &= 1.11 \times 10^{-4} \text{ cm} \end{aligned}$$

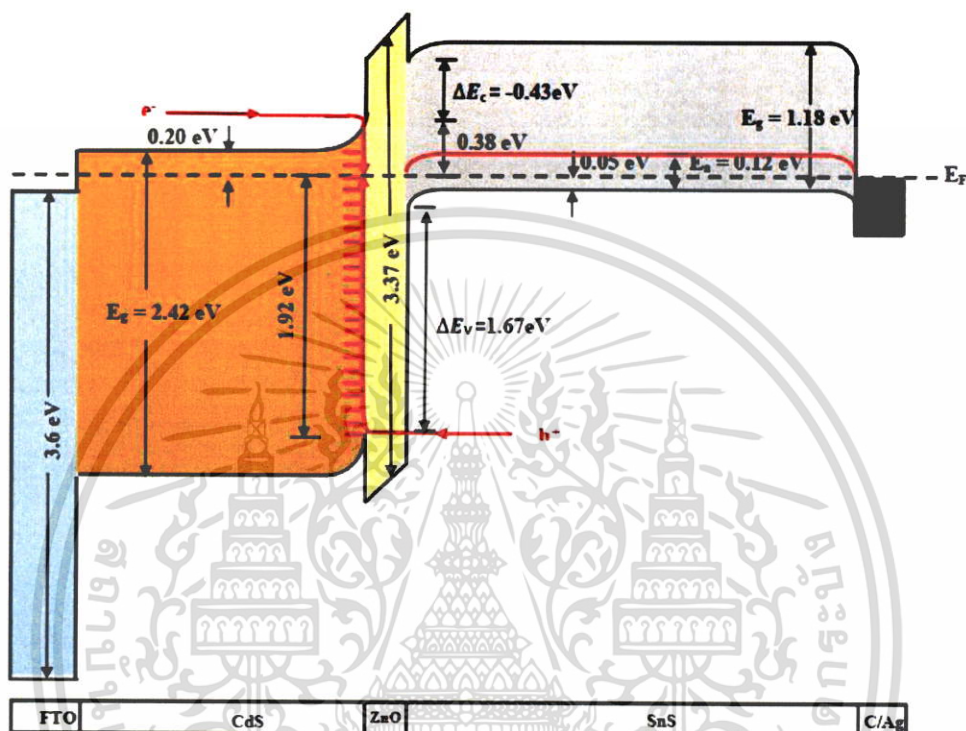
จากการทดลอง $\frac{-dC}{d \ln \omega} \approx 2.30 \times 10^{-8} \text{ F}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} N_T &= \frac{-\phi_B}{\frac{kT}{q} W_D A} \left(\frac{-dC}{d \ln \omega} \right) = \frac{\phi_B}{\frac{qkT}{q} W_D A} \left(\frac{dC}{d \ln \omega} \right) \\ &= \frac{(0.78)(2.30 \times 10^{-8})}{(1.38 \times 10^{-23})(303)(1.11 \times 10^{-4})(0.07)} \\ &= 5.52 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1} \end{aligned}$$

จากการวัดแคปาซิแตนซ์สเปกโตรสโคปี ที่อุณหภูมิห้อง 30-70 องศาเซลเซียส พบว่าระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดเดี่ยว (single trap) มีค่าประมาณ 0.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเกิดจากระดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานผู้รับ (accepter level) ของฟิล์มบาง SnS ชนิด V_{Sn}^{2-} [52] และค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะมีค่าประมาณ 5.52×10^{17} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับความหนาแน่นของโฮล (5.92×10^{17} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่วัดโดยปรากฏการณ์ของฮอลล์



รูปที่ 4.73 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่สภาวะสมดุลความร้อนและไม่มีการไบแอส

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS โดยอาศัยแบบจำลองการการเจาะอุโมงทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะอิสระโดยผ่านกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อ (tunneling enhanced interface trap recombination model) สำหรับชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ในแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธ์ของเราจะทำหน้าที่ยับยั้งการแพร่ของอะตอมโลหะ Cd จากชั้นฟิล์มบาง CdS ไปยังชั้นฟิล์มบาง SnS หรือยับยั้งการแพร่อะตอม Sn เข้าไปยังชั้นฟิล์มบาง CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบที่ความดัน 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ ซึ่งในขณะที่ทำการระเหิดสารเคมีจะให้อุณหภูมิแก่ สารตั้งต้นเท่ากับ 645-668 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 530-593 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาทีและ 5 นาที

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้มและมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีพิคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 31.999 องศา ตรงกับระนาบผลึก (400) สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลพิคของระนาบ (400) เลื่อนไปทางมุม 2θ ที่เล็กลงและความเข้มของพิคมีแนวโน้มลดลงด้วย และในกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnSe พิคของระนาบ (400) จะปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 30.990 องศา ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ประพฤติตัวเป็นสารละลายของแข็งที่สมบูรณ์ (completed solid solution) ตลอดช่วงของค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ Se โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับกฎของเวการ์ต (Vegard's law) เนื่องจากรัศมีของ Se^{2-} ($r=1.98 \text{ \AA}$) มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของ S^{2-} ($r=1.84 \text{ \AA}$)

การศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ แสดงขอบของเกรนอย่างคมชัด เกรนมีลักษณะเป็นแผ่นแบนๆ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งความหนามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความยาวจะแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ $x = 0.6$ แต่เมื่อ $x = 0.8$ ลักษณะของเกรนจะมีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัส และขนาดของเกรนจะโตมากขึ้นอีกเมื่อ $x = 1.0$ ข้อสังเกตคือเมื่อ $x = 1.0$ เกรนรูปร่างเป็นแผ่นแบนๆ โดยส่วนใหญ่จะขนานกับผิวหน้าของกระจกสไลด์ แต่เกรนบางส่วนจะเกาะกลุ่มกันเป็นคลัสเตอร์และจัดเรียงระนาบอยู่ในแนวตั้งเมื่อเทียบกับผิวกระจกสไลด์ อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (400) ของฟิล์มบางที่ $x = 1.0$ มีค่าต่ำสุด แสดงว่าคลัสเตอร์เหล่านี้มีอิทธิพลมากกว่าเกรนที่มีระนาบขนานกับผิวหน้าของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกสไลด์ เนื่องจากระนาบของคลัสเตอร์จะปลดทอนค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (400) ให้ลดลง ส่วนเกรนที่ขนานกับผิวหน้ากระจกสไลด์จะส่งเสริมให้ค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (400) มีค่าเพิ่มขึ้น

การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุ ด้วยเทคนิค XPS ของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ในระบบสุญญากาศ จากเทคนิค XPS พบธาตุ Sn คือ $\text{Sn}3d_{5/2}$ และ $\text{Sn}3d_{3/2}$ ที่พลังงาน 485.1-485.4 และ 493.2-494.1 eV ธาตุ Se คือพบ $\text{Se}3d_{5/2}$ และ $\text{Se}3d_{3/2}$ ที่พลังงาน 53.0-53.3 และ 53.8-54.2 eV และธาตุ S คือพบ $\text{S}2p_{5/2}$ และ $\text{S}2p_{3/2}$ ที่ระดับพลังงาน 53.0-53.3 และ 53.8-54.2 eV

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ สามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct band gap) โดยมีค่าลดลงจาก 1.18 เป็น 0.95 อิเล็กตรอนโวลต์ อีกทั้งยังพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnSe มีค่าช่องว่างแถบเป็นแบบเฉียง (indirect band gap) อีกด้วย จำนวน 2 ค่าคือ 0.80 และ 0.92 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเตรียมวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามักอยู่ในช่วง 10^{-1} - 10^{-2} โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามักต่ำสุดเท่ากับ 1.2×10^{-2} โอห์ม-เซนติเมตร ที่ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (X) เท่ากับ 1.0

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มที่แปรผกผันกัน โดยที่ค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสภาพคล่องของพาหะมีแนวโน้มลดลงและชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เป็นชนิดพี (p-type) ทั้งหมดซึ่งมีสาเหตุมาจากแวนแคนซีของอะตอม Sn

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พบว่าแรงดันขีดเริ่ม (turn on voltage) ที่ประมาณ 0.4 โวลต์จากการหาความหนาแน่นของพาหะอิสระจะประมาณได้วารอยต่ออวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/ZnO/SnS เป็นแบบรอยต่อ p^+-n โดยมีชั้นบัฟเฟอร์ ZnO ความหนาแน่นประมาณ 5 นาโนเมตร ปรากฏอยู่ การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ที่รอยต่อของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS/ZnO/SnS ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.10 โวลต์กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.10 ถึง 0.35 โวลต์ การนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.35 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจําในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล รวมไปถึงการคำนวณพารามิเตอร์ของไดโอดที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงของกำแพงศักย์ แพกเตอร์อูตมคติ และความต้านทานอนุกรม ที่อาศัยทฤษฎีเทอร์มอไดนามิกส์ วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์เมื่อใช้ความถี่ตั้งแต่ 70 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS จากการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V และจากจุดตัดแกน x สามารถนำไปหาค่าแรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อ (V_{bi}) ได้ และความชันนั้นสามารถนำมาหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ N_d พบว่าแรงดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า จะได้ว่าหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS ได้ บทบาทของชั้นบัฟเฟอร์ ZnO คือยับยั้งการแพร่ของอะตอม Sn เข้าไปยังชั้นฟิล์มบาง CdS หรือยับยั้งการแพร่ของอะตอม Cd เข้าไปยังชั้นฟิล์มบาง SnS

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพันธ์ CdS/ZnO/SnS ด้วยวิธีอาน้ำสารละลายเคมีและวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนี้ พบว่าสิ่งที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้ คือการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดี จำเป็นต้องควบคุมความสะอาด เลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม และควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ให้คงที่ตลอดการทดลอง จำเป็นต้องมีสมาธิอย่างต่อเนื่องในการทำงาน การเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ และการสรุปผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wu, X. 2004. "High-efficiency Polycrystalline CdTe Thin Film Solar Cell." *Sol. Energy*. 47 : 803-814.
- [2] Kawano, Y. Chantana, D.Y. and Minemoto, T. 2015. "Impact of Growth Temperature on the Properties of SnS Film Prepared by Thermal Evaporation and It's Photovoltaic Performance." *J. Appl. Phys.* 15 : 897-901.
- [3] Bushra A.H. and Ikhlas, H.S. 2014. "Structural and Optical Properties of SnS Thin Films." *J. Nano. Adv. Mat.* 2 : 43-49.
- [4] Indahi, J. Keller, J. Donzel-Gergand, O. Szaniawski, P. Edoff, M. and Torndahi, T. 2016. "Deposition Temperature Induced Conduction Band Changes in Zinc Tin Oxide Buffer Layers for Cu(In,Ga)Se, Solar Cell." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 144 : 684-690.
- [5] Bletskan, D.I. 2005. "Phase Equilibrium in Binary Systems A^{IV} B^{VI}." *Ovonic Reseach*, 5 : 53-60.
- [6] Banai, R.E. Horn, M.W. and Brownson, J.R.S. 2016. "A Review of Tin(II) Monosulfide and It's Potential As a Photovoltaic Absorber." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 150 : 112-129.
- [7] Minnam Reddy, V.R. Lindwall, G. Pejjai, B. Gedi, and S. Kotte, T. 2018. "α-SnSe Thin Film Solar Cells Produced by Selenization of Magnetron Sputtered Tin Precursors." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 176 : 251-258.
- [8] Miyawaki, T. and Ichimura, M. 2007. "Fabrication of ZnS Thin Films by an Improved Photochemical Deposition Method and Application to ZnS/SnS Heterojunction Cells." *Mater. Lett.* 61 : 4683-4686.
- [9] Ghosh, B. Madhumita, D. Pushan, B and Subrata, D. 2009. "Frbrication of the SnS/ZnO Heterojuction for PV Applications Using Electrodeposited ZnO Films." *Semicond. Sci. Tech.* 24 : 025024-025031.
- [10] Ichimura, M. and Takagi, H. 2008. "Electrodeposited ZnO/SnS Heterostructure for Solar Cell Application." *J. Appl. Phys.* 47 : 7845-7847.
- [11] Subramanian, B. Sanjeeviraja, C. and Jayachandran, M. 2003. "Material Properties of Electrodeposited SnS_{0.5}Se_{0.5} Films and Characterization of Photoelectromical Solar Cell." *Mater. Res. Bull.* 38 : 899-908.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Ray, S.C. Karanjai, M.K. and DasGupta, D. 1999. "Structure and Photoconductive Properties of Dipdeposited SnS and SnS₂ Thin Films and Their Conversion to Tin Dioxide by Annealing in Air." *J. Thin Solid Films.* 350 : 72-78.
- [13] Hegde, S.S. Kunjomana, A.G. Ramesh, K. Chandrasekharan, K.A. and Prashantha, M. 2011. "Properties and Characterization of SnS Thin Films Solar Cell Application." *Int. J. Soft. Comput. Eng.* 1 : 38-45.
- [14] Hegde, S.S. Kunjomana, A.G. Ramesh, K. Chandrasekharan, K.A. and Prashantha, M. 2011. "Properties and Characterization of SnS Thin Films Solar Cell Application." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells. Eng.* 1 : 38-45.
- [15] Hartman, K. Johnson, J.L. Bertoni, M.I. Recht, D. Aziz, M.J. Scarpulla, M.A. and Buonassisi, T. 2011. "SnS Thin Films by RF Sputtering at Room Temperature." *J. Thin Solid Films.* 519 : 7421-7424.
- [16] Bashkurov, S.A. Gremenok, V.F. and Iranov, V.A. 2011. "Physical Properties of SnS Thin Films Fabricated by Hot Wall Deposition." *J. Semiconductors.* 45 : 749-752.
- [17] Sze, S.M. 1981. **Semiconductor Devices Physics and Technology.** 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- [18] Kittel, C. 2005. **Introduction to Solid State Physics.** 8th ed. United State of America: John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [19] ฐิตินัย แก้วแดง. 2531. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [20] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [21] ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. **เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.** ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. **เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์.** ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [22] ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. "การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [23] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาชั้นไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [24] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ชั้นไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [25] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษา สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [26] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีอิเล็กโทรลิซิสสเปคโตรอิเล็กโทรลิซิสเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [27] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [28] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [29] เมธิตรา ร่วมสุข. 2555. “สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. **เคมีคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [31] Arulanantham, A.M.S. Valanarasu, S. and Kathalingam, A. 2018. “An Investigation on SnS Layers for Solar Cell Fabrication with CdS, SnS₂ and ZnO Window Layers Prepared by Nebulizer Spray Method.” *Mater. Sci.* 124 : 776-788.
- [32] Khan, M.D. Aamir, M. Murtaza, G. Malik, M.A. and Revaprasadu, N. 2018. “Structural Investigations of SnS_{1-x}Se_x Solid Solution Synthesized from Chalcogeno-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- carboxylate of Organo-tin by the Colloidal and Solvent-less Routes.” *J. Dalton Transactions*. 47 : 10025-10034.
- [33] Asfandiyar. Wei, T.R. Li, Z. San, F.H. Pan, Y. Wu, C.F. and Li, F.H. 2018. “Thermoelectric SnS and SnS-SnSe Solid Solution Prepared by Mechanical Alloying and Spark Plasma Sintering: Anisotropic Thermoelectric Properties.” *J. Scientific*. 7 : 432622-432637.
- [34] Han, Y.M. Zhao, J. Zhao, M. Jiang, X.X. Leng, H.Q. and Lai, L.F. 2015. “Thermoelectric Performance of SnS and SnS-SnSe Solid Solution.” *J. Mater. Chem. A*. 3 : 4555-4559.
- [35] Albers, W. Haas, C. Ober, H. Schodder, G.R. and Wasscher, J.D. 1962. “Preparation and Properties of Mixed Crystals.” *J. Phys. Chem. Solid*. 23 : 215-220.
- [36] Li, S. Yumei, Wang, Y. Chen, C. Li, Xue, W. Wang, X. and Zongwei, Q. 2018. “Heavy Doping by Bromine to Improve the Thermoelectric Properties of n-type Polycrystalline SnSe.” *J. Adv. Sci*. 23 : 1800598 -1800604.
- [37] Yan, C. Liu, F. Song, N. Boon K, N. Stride, J.A. Tadich, A. and Hao, X. 2014. “Band Alignments of Different Buffer Layer (CdS, Zn(O,S), and In_2S_3) on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.” *Appl. Phys. Lett.* 104 : 173901.
- [38] Jadhav, H. Suryawanshi, S. More, M.A. and Sinha, S. 2017. “Pulsed Deposition of Tin Oxide Thin Films for Field Emission Studies.” *Appl. Surf. Sci.* 419 : 764-769.
- [39] Khagendra, P.B. Hyekyoung, C. Sohee, J. and Randy, J.E. 2014. “Determination of Heterojunction Band Offsets Between CdS Bulk and PbS Quantum Dots Using Photoelectron Spectroscopy.” *Appl. Phys. Lett.* 105 : 131604.
- [40] Lisco, F. Kaminski, P.M. Abbas, A. Bass, K. Bowers, J.W. Claudio, G. Losurdo, M. and Walls, J.M. 2015. “The Structural Properties of CdS Deposition by Chemical Bath Deposition and Pulsed Direct Current Magnetron Sputtering.” *Thin Solid Films*. 582 : 323-327.
- [41] Ramya, K. and Ramakrishna Reddy, K.T. 2018. “Investigation on the Parameters Limiting the Performance of CdS/SnS Solar Cell.” *Ins J Eenergy Res*. 42 : 1914-1920.
- [42] Whittles, T.J. Burton, L.A. Skelton, J.M. Walsh, A. Veal T.D. and Dhanak, V.R. 2016. “Band Alignments, Valence Bands, and Core Levels in the Tin Sulfides SnS SnS₂ and Sn₂S₃: Experiment and Theory.” *Chem. Mater.* 28 : 3718-3726.

- [43] El-Samanoudy, M.M. 2013. "Modified Pool-Frenkel Mechanisms in $\text{Ge}_{25}\text{Bi}_x\text{Sb}_{15-x}\text{S}_{60}$ Thin Films." *Appl. Surf. Sci.* 207 : 456-464.
- [44] 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.
- [45] Jasenek, A. and Rau, U. 2002. "Defect Generation in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Heterojunction Solar Cells by High-Energy Wlwttron and Photon Irradiation." *J. Appl. Phys.* 90, 650-658.
- [46] Gupta, G.K. Gary, A. and Dixit, A. 2018. "Electrical Impedance Spectroscopy Analysis of Sol-Gel Derived Spin Coated $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Solar Cell." *J. Appl. Phys.* 123, 013101-1 - 013101-10.
- [47] Schroder, D.K. 1990. **Semiconductor Material and Device Characterization.** John Wiley 2 Sons, Inc. New York.
- [48] Nicollian, E.H. and Brews, J.R. 1991. **MOS (Metal oxide Semiconductor) Physics and Technology.** John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [49] Barsoukov, E. and Macdonald, J.R. 2005. **Impedance Spectroscopy : Theory, Experiment and Applications.** John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [50] Walter, T. Herberholz, R. Müller, C. and Shock, H.W. 1996. "Determination of Defect Distributions from Admittance Measurements and Application to $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Based Heterojunctions." *J. Appl. Phys.* 80: 4411-4420.
- [51] Wang, S. Kaienburg, P. Klingebiel, B., Schillings, D. and Kirchartz, T. 2018. "Understanding Thermal Admittance Spectroscopy in Low Mobility Semiconductors." *J. Appl. Chem C.* 122: 9795-9803.
- [52] Spalatu, N. Hiie, J. Kaupmees, R. Volbujeva, O. Krustok, J. Acik, I.O. and Krunks, M. 2019. "Posdeposition Processing of SnS Thin Films and Solar Cells: Prospective Strategy to Obtain Large, Sintered, and Doped SnS Grains by Recrystallization in the Presence of Metal Halide Flux." *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 11: 17539-17554.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ SnS

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.73-1859

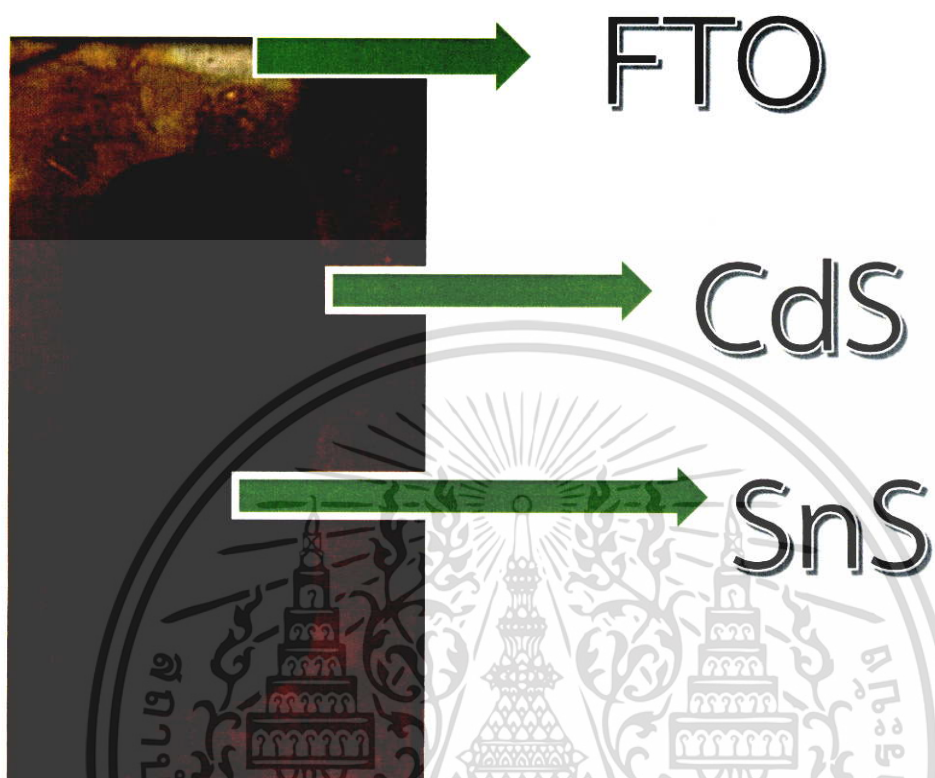
Pattern : 73-1859		Radiation : λ 54060		Quality : Calculated							
SnS		2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
		15.841	<1	2	0	0	84.664	8	2	2	3
		22.001	32	1	0	1	84.935	5	0	0	3
Emp. Sulfide		26.013	56	2	0	1	85.352	3	0	1	2
		27.479	71	2	1	0	85.352	3	1	3	2
		30.477	53	0	1	1	87.406	2	3	2	3
		31.533	100	0	1	1	87.986	<1	2	3	2
		31.655	53	3	0	1	88.300	1	3	2	1
		31.855	58	4	0	1	88.526	3	5	3	1
		34.527	<1	2	0	0	89.230	<1	6	1	3
		38.301	1	4	0	1					
		39.059	42	3	1	1					
		39.354	6	4	1	0					
		41.695	2	0	0	2					
		42.506	19	0	0	2					
		44.771	30	4	1	1					
		44.869	17	2	0	2					
		45.522	25	0	2	0					
		45.628	23	5	0	1					
		48.520	24	2	2	0					
		48.520	24	1	1	2					
		48.605	22	3	0	2					
		50.563	1	2	1	2					
		51.111	6	1	2	1					
		51.357	18	5	1	1					
		53.178	15	2	2	1					
		53.496	9	6	0	1					
		53.496	9	4	0	2					
		54.097	10	3	1	2					
		54.313	12	6	1	0					
		56.505	2	3	2	1					
		56.721	20	4	2	0					
		58.671	1	6	1	1					
		58.671	1	4	1	2					
		59.380	4	5	0	2					
		60.962	<1	4	2	1					
		61.871	<1	7	0	1					
		63.428	1	0	2	2					
		64.034	9	1	2	2					
		64.247	14	5	1	2					
		65.129	3	1	0	3					
		65.835	<1	2	2	2					
		66.115	1	6	0	2					
		66.425	5	5	2	1					
		66.634	7	7	1	1					
		66.839	7	8	0	0					
		66.899	7	2	0	3					
		68.784	8	3	2	2					
		68.972	5	6	2	0					
		69.192	5	0	1	3					
		69.841	2	1	1	3					
		69.841	2	3	0	3					
		70.790	<1	6	1	2					
		70.790	<1	8	0	1					
		71.487	2	8	1	0					
		71.487	2	2	1	3					
		72.812	5	6	2	1					
		72.812	5	4	2	2					
		73.235	3	2	3	0					
		73.652	4	7	0	2					
		73.849	2	4	0	3					
		74.349	2	3	1	3					
		74.746	3	0	3	1					
		75.310	8	8	1	1					
		75.310	8	1	3	1					
		76.990	<1	2	3	1					
		77.880	3	5	2	1					
		78.075	3	7	1	2					
		78.269	6	4	1	3					
		78.889	1	5	0	3					
		79.768	3	3	3	1					
		79.950	2	4	3	0					
		80.350	2	9	0	1					
		82.006	<1	8	0	2					
		83.038	2	1	2	3					
		83.231	1	5	1	3					
		83.616	3	4	3	1					
		83.942	2	6	2	2					
		84.664	8	8	2	0					

ICSD COLLECTION CODE : 024376	Mol. weight : 150.75
TEMPERATURE FACTOR : ATF	Volume [Å ³] : 132.72
REMARKS FROM ICSD : PCT	Dx : 5.496
	Z : 4
	I/Corr : 4.54

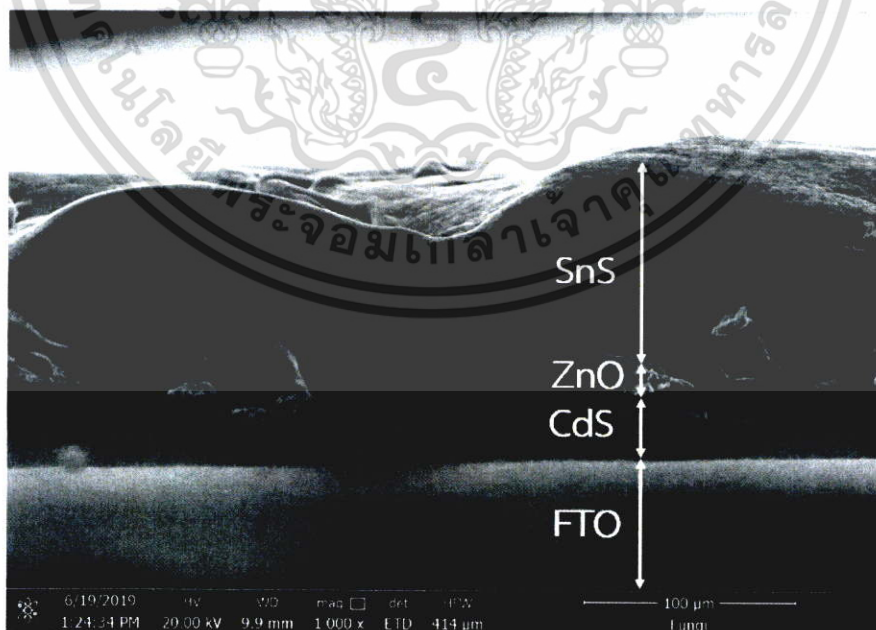
Radiation : CuKα1	Filter : Not specified
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของไดโอดชนิดรอยต่ออิวรีพันธ์ CdS/ZnO/SnS



แสดงภาพถ่าย SEM แบบภาพตัดขวางของไดโอดชนิดรอยต่ออิวรีพันธ์ CdS /ZnO/ SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว ปาริชาติ คำหมอน
วัน เดือน ปีเกิด	17 ตุลาคม 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 105 หมู่ที่ - ต.กกกุง อ.เมืองสรวง จ.ร้อยเอ็ด 45220
การศึกษา	ปี พ.ศ. 2556 จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวัดอินทาราม ปี พ.ศ. 2557 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2561 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานวิชาการ	-Structural and Physical Properties of $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ Solid Solution Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method - Preparation and Characterization of n-CdS/p-SnS Heterojunction Thin Film Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้