

โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง
ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$
ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด

CRYSTAL STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES
OF $Cd_{1-x}Zn_xSe$ THIN FILMS PREPARED
BY CLOSED SPACE SUBLIMATION METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-030-018

โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง
ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$
ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด

CRYSTAL STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES
OF $Cd_{1-x}Zn_xSe$ THIN FILMS PREPARED
BY CLOSED SPACE SUBLIMATION METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-030-018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CRYSTAL STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES
OF $Cd_{1-x}Zn_xSe$ THIN FILMS PREPARED
BY CLOSED SPACE SUBLIMATION METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT 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
2016

KMITL-2016-SC-M-030-018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด”
“CRYSTAL STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $Cd_{1-x}Zn_xSe$ THIN FILMS PREPARED BY CLOSED SPACE SUBLIMATION METHOD”

ชื่อนักศึกษา นายณพนธ์ เดชะคำภู
รหัสประจำตัว 57605090
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.วิจิต ศิริโชติ ประธานกรรมการ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษเกียรติ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 6 กรกฎาคม เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณ ชั้น 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 8 เดือน กค. พ.ศ. 59

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
ชื่อนักศึกษา	นาย นพณัฐ เดชะคำภู
รหัสประจำตัว	57605090
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น และ อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับเท่ากับ 650 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ที่ฟิล์มบางของอัลลอยของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น และ อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับเท่ากับ 780 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและมีระนาบที่โดดเด่นคือ (002) แต่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและมีระนาบที่โดดเด่นคือ (111) และฟิล์มบางของอัลลอยของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) มีโครงสร้างผลึกแบบผสมทั้งเฮกซะโกนัลและคิวบิก ทำการศึกษาบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางจากภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ ทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS จากการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 ถึง 900 นาโนเมตร พบว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) มีการเพิ่มขึ้นจาก 1.68 เป็น 2.63 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.0 เป็น 1.0 ตามลำดับ ได้ทำการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ชั้นแบบสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O โดยการเคลือบฟิล์มบาง Cu₂O ด้วยวิธีอีพอกซีที่พีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงและฟิล์มบาง CdSe โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเคลือบลงบนกระจก FTO ตามลำดับ ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง I-V, C-V และ G/ω-V โดยอาศัยแบบจำลองของการปรากฏสถานะผิวเชื่อมต่อที่รอยต่อขอตักที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง รวมทั้งได้นำเสนอแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำกระแสผ่านรอยต่อ

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โครงสร้างผลึกแบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดก๊อปปี้ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	CRYSTAL STRUCTURE, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Cd _{1-x} Zn _x Se THIN FILMS PREPARED BY CLOSED SPACE SUBLIMATION METHOD
Student Name	Mr. Noppanut Daichakomphu
Student ID	57605090
Degree	Master of Science
Department	Physics
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

Abstract

Cd_{1-x}Zn_xSe thin films within composition $0 \leq x \leq 1$ were deposited on glass substrate by close spaced sublimation method (CSS) using mixed powders of pure CdSe and ZnSe compounds as the precursor. For CdSe thin films growth condition, source temperature and glass substrate temperature were 650 and 550 °C, respectively. In all solid solution films and ZnSe thin films, source temperature and glass substrate temperature were fixed at 780 and 680 °C, respectively. XRD reveals that CdSe films exhibited the hexagonal wurtzite structure with the preferred orientation of (002) plane. In contrast, ZnSe thin films were formed in cubic zincblende structure with the preferred orientation of (111) plane. However, for the solid solution composition ($0.2 \leq x \leq 0.8$), the cubic and hexagonal phases were found to coexist in the system and the films become less preferentially oriented. SEM and EDS were used to study the surface morphology and elemental compositions of the samples. The transmission spectra of the films were studied using a double beam spectrophotometer in the wavelength range at 300-900 nm. The energy gap value of Cd_{1-x}Zn_xSe thin films increases from 1.68 to 2.62 eV as Zn composition (x) increases from 0 to 1. The prototype of n-CdSe/p-Cu₂O heterojunction was fabricated by depositing Cu₂O thin films using reactive dc magnetron sputtering and CdSe thin films using thermal evaporation on FTO substrate successively. A detailed analysis of $I-V$, $C-V$ and $G/\omega-V$ was studied, assuming the model in which interface states are located at schottky back contact. Also a band diagram of n-CdSe/p-Cu₂O heterojunction was proposed to explain the transport mechanism.

Keywords : Cd_{1-x}Zn_xSe thin films, Close Spaced Sublimation Method, Mixed-phases structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ์ ที่คอยอบรมสอนวิชาความรู้ต่างๆ และ ค่อยช่วยเหลือในทุกๆด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นักศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำงานเสมอ

สุดท้ายขอกราบขอบคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ตั้งแต่ การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นาย นพณัฐ เดชะคำภู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	7
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	7
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	10
2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	12
2.1.4 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซีสไนด์	12
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	13
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	15
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	15
2.4.2 การส่งผ่านแสง	18
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	20
2.4.5 พูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	22
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	26
2.6 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	26
2.7 สภาพนำไฟฟ้า	27
2.7.1 การนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก	28
2.7.2 การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง	29
2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	38
2.8.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาลง	45
2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	46
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้าง	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	51
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	51
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	51
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	51
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu ₂ O	52
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu ₂ O	52
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	52
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	52
3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง	52
3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	53
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	53
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	53
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	53
3.2.3 การเตรียมผงผลึกของสารตั้งต้น $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	54
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	56
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	58
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	58
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	58
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	58
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	58
3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu ₂ O	58
3.4.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu ₂ O	58
3.4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	60
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	67
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	67
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	68
4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	72
4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่บริเวณชั้นผิวหน้าของฟิล์มบาง Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	73
4.5 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชันของฟิล์มบาง Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	75
4.6 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	79
4.7 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	82
4.8 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	86
4.8.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0.0 ≤ x ≤ 0.6) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	87
4.8.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0.0 ≤ x ≤ 0.6) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	90
4.9 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9.1 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	96
4.9.2 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	101
4.10 ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O	104
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	143
เอกสารอ้างอิง	145
ภาคผนวก	150
ภาคผนวก.ก	151
ภาคผนวก ข	152
ภาคผนวก.ค	153
ประวัติผู้เขียน	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อจากข้างอึ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	8
ตารางที่ 2.2	แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
ตารางที่ 2.3	แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	11
ตารางที่ 2.4	แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	24
ตารางที่ 3.1	ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆของ CdSe และ ZnSe แลอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	53
ตารางที่ 4.1	แสดงระนาบ มุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ค่าคงที่โครงผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	59
ตารางที่ 4.2	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	72
ตารางที่ 4.3	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	76
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	79
ตารางที่ 4.5	แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	82
ตารางที่ 4.6	แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	85
ตารางที่ 4.7	แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ทำการวัดที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล	95
ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	96
ตารางที่ 4.10 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	100
ตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n-CdSe/p-Cu_2O$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	108
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n-CdSe/p-Cu_2O$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	112
ตารางที่ 4.13 แสดงค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรม ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n-CdSe/p-Cu_2O$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	120
ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n-CdSe/p-Cu_2O$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	126
ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n-CdSe/p-Cu_2O$ ที่	

เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

134

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	135
ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	139
ตารางที่ 4.18 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	141

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	11
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกซิงค์เซลีนไนด์	12
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบเวิร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมเซลีนไนด์	13
รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	14
รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ	16
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)	17
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)	18
รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง	18
รูปที่ 2.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน	20
รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	22
รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone	23
รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์	23
รูปที่ 2.15 แสดงภาพการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	26
รูปที่ 2.16 แสดงการไหลของกระแสในฉนวนที่มีความยาวเท่ากับ L	29
รูปที่ 2.17 แสดงกราฟการนำไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ	31
รูปที่ 2.18 แสดงกับดักพาหะที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า	34
รูปที่ 2.19 แสดงกับดักพาหะที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	35
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการกระจายของค่า $P(E)$	36
รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_F$ กับ $1/T$ ของการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง	37
รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง m กับ $1000/T$ ของการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง	37
รูปที่ 2.23 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{c1}) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{v1}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดที่บและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อท้ายอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงกับเวลาเชิงแสง	42
-------------	--	----

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	42
รูปที่ 2.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง	45
รูปที่ 2.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	46
รูปที่ 2.28	แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$	47
รูปที่ 2.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึกและขนาดของแกนกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$	48
รูปที่ 2.30	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$	48
รูปที่ 2.31	แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$	49
รูปที่ 2.32	แสดงการหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$	49
รูปที่ 2.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$	50
รูปที่ 3.1	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	57
รูปที่ 3.2	แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	57
รูปที่ 3.3	(ก) แสดงภาพ leak valve (ข) แสดงภาพคั่นบังคับ Shutter ที่อยู่ภายใน	60
รูปที่ 3.4	(ก) แสดงภาพตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย) (ข) แสดงภาพวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	61
รูปที่ 3.5	(ก) แสดงภาพ Butterfly valve ในตำแหน่ง open (ข) แสดงภาพ speedy valve	62
รูปที่ 3.6	(ก) แสดงภาพ Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ (ข) แสดงภาพ power supply	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7	(ก) แสดงภาพสวิตช์ของ power supply (ข) แสดงภาพปั๊ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	63
------------	---	----

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.8	แสดงภาพพลาสมาที่ติดในครั้งแรก	64
รูปที่ 3.9	(ก) แสดงภาพวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด (ข) แสดงภาพท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	64
รูปที่ 3.10	แสดงภาพการเริ่มเคลือบฟิล์ม	65
รูปที่ 4.1	ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	67
รูปที่ 4.2	แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	68
รูปที่ 4.3	แสดงการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	69
รูปที่ 4.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	70
รูปที่ 4.5	แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	72
รูปที่ 4.6	แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	73
รูปที่ 4.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเปอร์เซ็นต์ของธาตุ Cd, Zn และ Se กับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	74
รูปที่ 4.8	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	75
รูปที่ 4.9	สเปกตรัม XPS ในช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 สเปกตรัม XPS ในช่วง 1017-1053 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.2 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	76
รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 50-58 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	77
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	79
รูปที่ 4.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	80
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	81
รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	82
รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 530-590 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	83
รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 650-710 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	83
รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัม Raman ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	85
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	85

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	86
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	87
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x=0.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	90
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x=0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	91
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x=0.4$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	92
รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x=0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	93
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\theta$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	94
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln n_0$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	95
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโพลกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	97

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_p)$ กับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	97
รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	98
รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	101
รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	101
รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	102
รูปที่ 4.34 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	104
รูปที่ 4.35 แสดงพิกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง	105
รูปที่ 4.36 แสดงพิกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	106
รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่าย SEM แบบบนผิวหน้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	107
รูปที่ 4.38 แสดงภาพถ่าย SEM แบบภาพตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	107

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.39 แสดงสเปกตรัม EDS ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	108
รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe	109
รูปที่ 4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E _g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe	109
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O	110
รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E _g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O	110
รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	111
รูปที่ 4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E _g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	111
รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของกระจกสไลด์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	112
รูปที่ 4.47 แสดงแผนภาพการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	113
รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง	114

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง	114
รูปที่ 4.50 แสดงกราฟกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง	115
รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln(I) กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง	115
รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dlnI กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง	116
รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง	116
รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	117
รูปที่ 4.55 แสดงกราฟกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	117
รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln(I) กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	118

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	118
รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	119
รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	119
รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	121
รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ ความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	121
รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	122
รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	122
รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	123

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ ความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	123
รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ ความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	124
รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W_D และ Φ_B กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	126
รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_D และ ψ_s กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	127
รูปที่ 4.69 แสดงแรงดันตกคร่อมรอยต่อต่างๆของไดโอด	127
รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	128
รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_{ss} กับ $E_{ss} - E_V$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	129
รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	130
รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	131

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	131
รูปที่ 4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	131
รูปที่ 4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	132
รูปที่ 4.77 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	132
รูปที่ 4.78 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	134
รูปที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	136
รูปที่ 4.80 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	136
รูปที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	137

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	137
รูปที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	138
รูปที่ 4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	139
รูปที่ 4.85 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	139
รูปที่ 4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	140
รูปที่ 4.87 โครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	142

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้รับความนิยมน้อยอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง เซลล์แสงอาทิตย์ และ อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เลเซอร์ไดโอด และ ไดโอดเปล่งแสง (LED) เป็นต้น [1-3] เนื่องมาจากสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ครอบคลุมในย่านตามมองเห็น

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdSe) และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำซิงค์เซลีไนด์ (ZnSe) จัดเป็นสารกึ่งตัวนำในหมู่ II-VI และเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ นิยมนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.7 อิเล็กตรอนโวลต์ นิยมนำมาประดิษฐ์อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [4,5] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาโลหะผสมที่มีการนำเอาสารกึ่งตัวนำสองชนิดมารวมกัน ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องมาจากสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามองค์ประกอบของโลหะผสมนั้น โดยที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโลหะผสม $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เป็นที่ได้รับความสนใจ เพราะสามารถนำไปใช้งานได้ทั้งทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์และทางด้านอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [4-9] สมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น โครงสร้างผลึก สมบัติเชิงแสง และ สมบัติเชิงไฟฟ้า สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามองค์ประกอบที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ สมบัติทางฟิสิกส์สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ Zn

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ [6] การระเหยสารเคมีด้วยลำอิเล็กตรอน [7] การเคลือบด้วยไฟฟ้า [8] และการอบสารละลายเคมี [9] เป็นต้น โดยในที่นี้ได้เลือกใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เพราะเป็นวิธีที่ง่าย ราคาไม่แพง และได้ฟิล์มที่ค่อนข้างหนา แต่มีข้อเสียคือฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีโอกาสจะได้รับการเจือปนด้วยธาตุคาร์บอน (C) และจะควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับได้ยาก

เป็นที่ทราบกันดีว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้รับการพูดถึงเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น ทางด้านแสง ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เทอร์โมอิเล็กทริก เซลล์แสงอาทิตย์ ตัวเร่งปฏิกิริยา และ ตัวตรวจจับแก๊ส เป็นต้น [10-14] ตัวอย่างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แคดเมียมออกไซด์ (CdO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทินไดออกไซด์ (SnO_2) และ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) เป็นต้น

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ (Cu_2O) จัดเป็นสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ที่เป็นโลหะออกไซด์ ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีค่าประมาณ 1.2-2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ [14,15] และ กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมน้อย และมีราคาไม่สูงมาก [10] โดยที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O นิยมนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับแก๊ส [14,15] และ ชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ [12,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น สเปรย์ไพโรไลซิส [15] การอบสารละลายเคมี [17] และ วิธีการโซเจล [18] เป็นต้น แต่จากการศึกษาพบว่า สมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ส่วนหนึ่งขึ้นกับปริมาณอะตอมของธาตุออกซิเจน [19,20] ดังนั้น วิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ภายในระบบสุญญากาศ จึงน่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะระบบสปัตเตอร์ริงทั้งแบบดีซี (DC-Sputtering) และ แบบอาร์เอฟ (RF-Sputtering) [16,21] เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณอะตอมของธาตุออกซิเจนและสามารถควบคุมอัตราการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ได้

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ใช้เวลาในการระเหิดนาน 5 นาที โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยในขณะที่ทำการระเหิดได้มีการควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับให้มีความแตกต่างกันประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่าน UV เพื่อทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และ ใช้เทคนิค FTIR วัดค่าเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่านรังสีอินฟราเรดเพื่อตรวจสอบโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอม ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง และ ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงเพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$

นอกจากนี้ ได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe}/p\text{-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe นั้นถูกเตรียมด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ขณะที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O นั้นถูกเตรียมด้วยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยการถ่ายภาพภาคแบบภาพตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และ ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดทั้งที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
2. เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
4. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
5. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
6. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
7. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยวัดสเปกตรัมของเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่านรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิค FTIR และทำการตรวจสอบโหมดการสั่นของพันธะเคมีระหว่างอะตอม ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
8. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง
9. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อตรวจสอบการตอบสนองของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และ ทำการคำนวณค่าชีวิตของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
10. เพื่อศึกษาวิธีการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
11. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และ ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดทั้งที่อุณหภูมิห้อง และ ที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แล้วนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ตลอดจนศึกษาสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O โดยที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เตรียมด้วยวิธีการระเหยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยสารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ถูกเตรียมด้วยวิธีการรีแอคทีฟดีซีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยใช้เป้าเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

โดยที่ จะดำเนินการศึกษาวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ทำการศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
2. ทำการศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
3. ทำการศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
4. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
5. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
6. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
7. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
8. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
9. ทำการศึกษสมบัติการส่งผ่านแสงโดยการวัดสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
10. ทำการศึกษสมบัติทางแสงโดยวัดสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงในย่านรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิค FTIR และทำการตรวจสอบโหมดการสั่นของพันธะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
11. ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและทำการคำนวณค่าชีวิตของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
13. ทำการการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ถูกเตรียมด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O เตรียมด้วยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยใช้เป้าเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์
14. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เตรียมได้
15. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอะตอมของธาตุ Zn ที่เข้าแทนที่อะตอมของธาตุ Cd ในโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีต่อสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
3. ทำให้ทราบช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
4. ทำให้ทราบสมบัติทางไฟฟ้า และ สมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์
5. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
6. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
7. ทำให้ทราบวิธีการเคลือบฟิล์มบางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
8. ทำให้ทราบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำให้มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

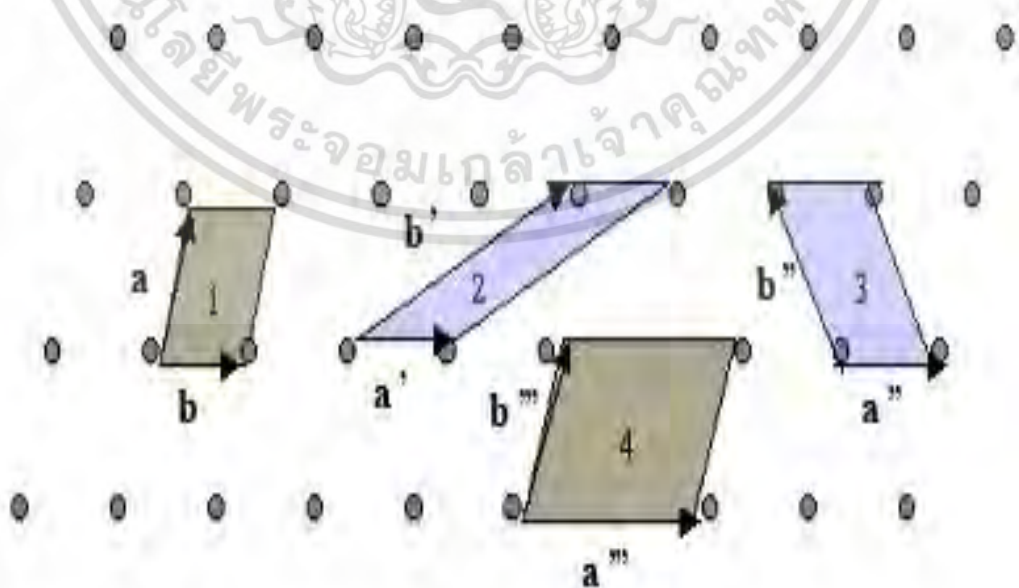
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผลึก

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline material) และวัสดุที่เป็อะมอร์ฟัส (amorphous material) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [22-34]

ผลึกเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึก หรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีความสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในระบบสอง ค่ามิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

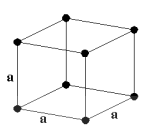
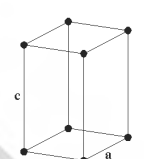
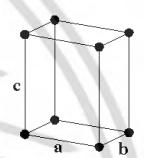
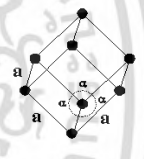
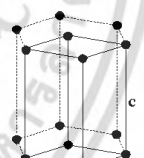
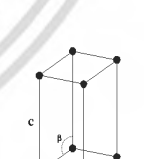
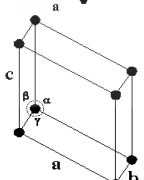
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ a , b และ c และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ ไตรคลินิก (triclinic) , โมโนคลินิก (monoclinic) , ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) , เตตระโกนัล (tetragonal) , คิวบิก (cubic) , รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก [26-35]

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

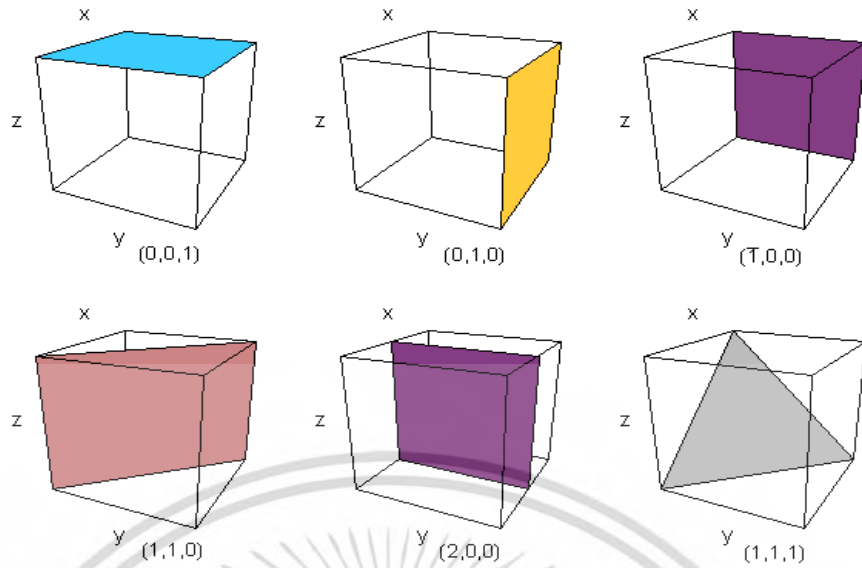
การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร $(h \ k \ l)$ ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์(∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็ได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก(h และ k) ดังนี้

$$l = -(h + k) \tag{2.1}$$

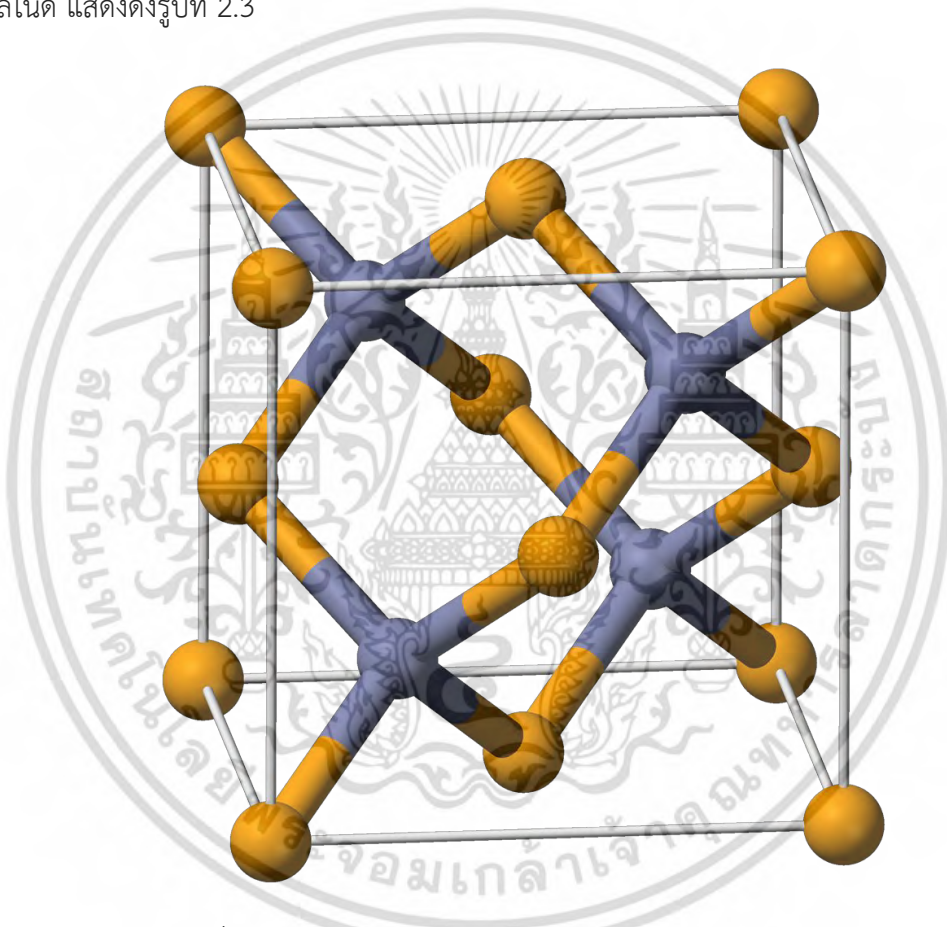
เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ($11\bar{2}$) ในระบบเฮกซะโกนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง $[hkl]$ จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง $[102]$ จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

ผลึกซิงค์เซลีไนด์ (ZnSe) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 5.668 อังสตรอม และมีค่าความหนา 5.270 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1525 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.82 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ผลึกซิงค์เซลีไนด์ แสดงดังรูปที่ 2.3

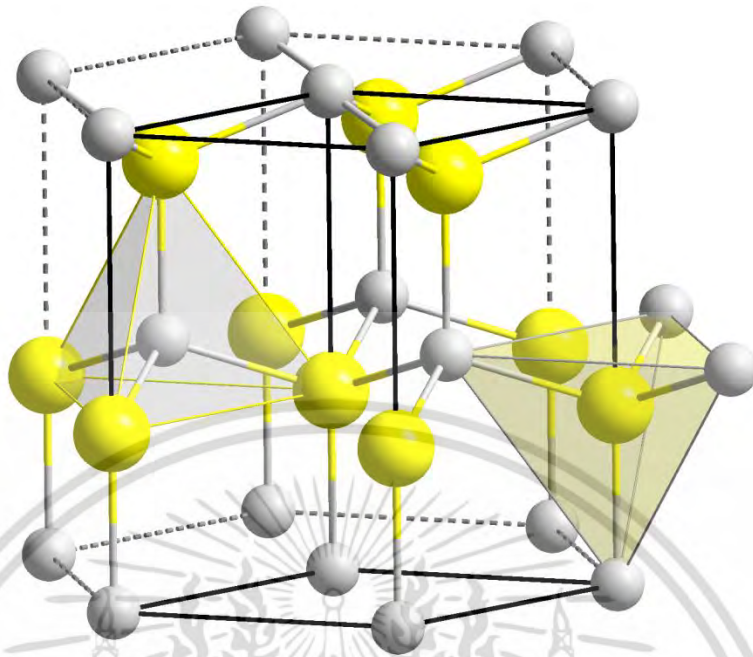


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกซิงค์เซลีไนด์

2.1.4 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเซลีไนด์

ผลึกแคดเมียมเซลีไนด์ (CdSe) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบเวียร์ทซ์ไชท์มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.082 อังสตรอม และมีค่าความหนา 5.816 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1268 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.74 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น ผลึกแคดเมียมเซลีไนด์แสดงดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ของผลึกแคตเมียมเซลล์ไนด์

2.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [22,25-39]

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าว จะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังกล่าว

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

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

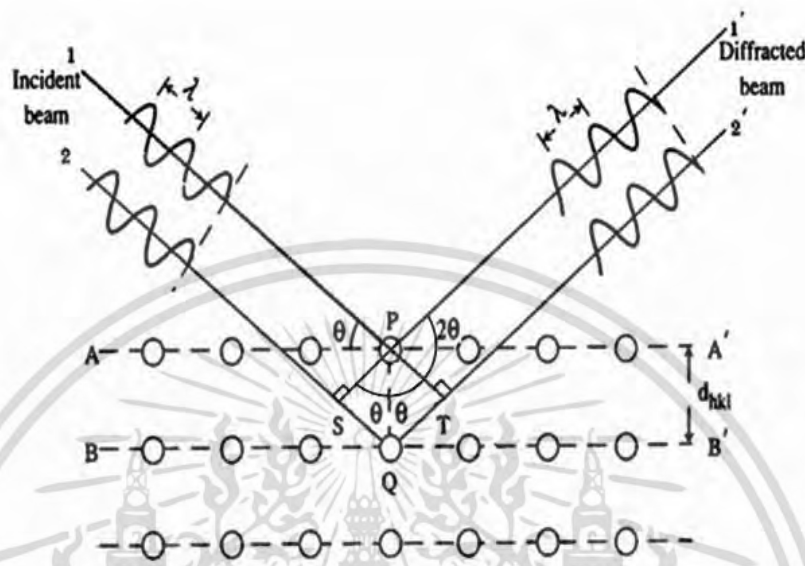
θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับระนาบที่ตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.5

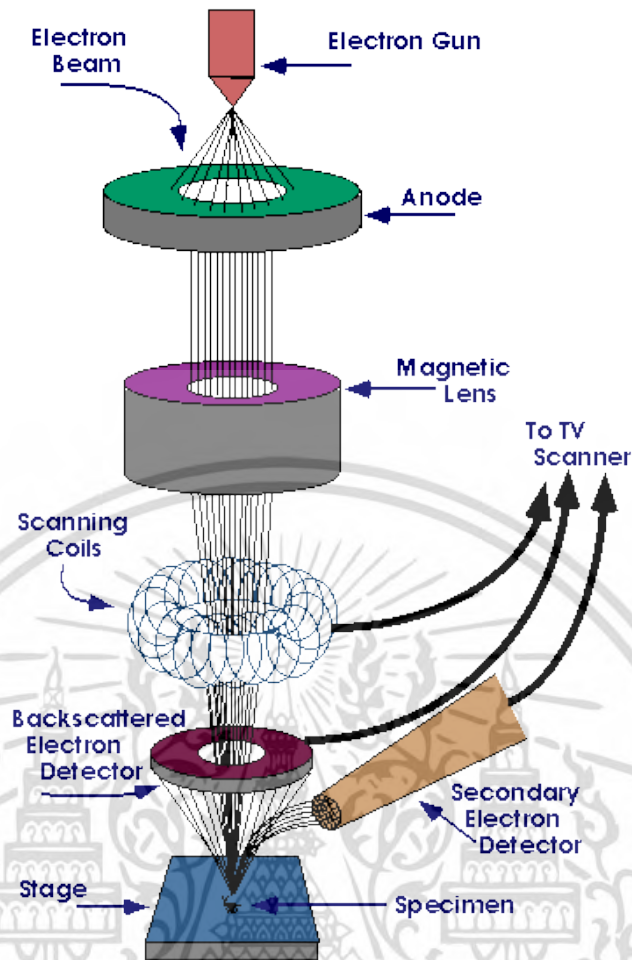


รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [22,25-39]

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์วิลเลียมแอทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.6 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

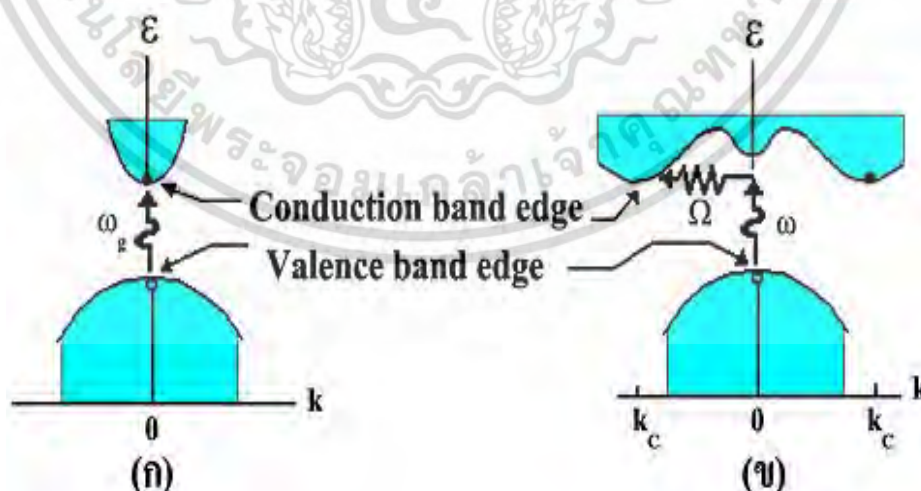
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืนการสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำการส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [22,25,27-39]

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อัน 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับ แถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งผ่านไวส์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.7(จ) และเรบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.7(ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีความเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานสิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข)

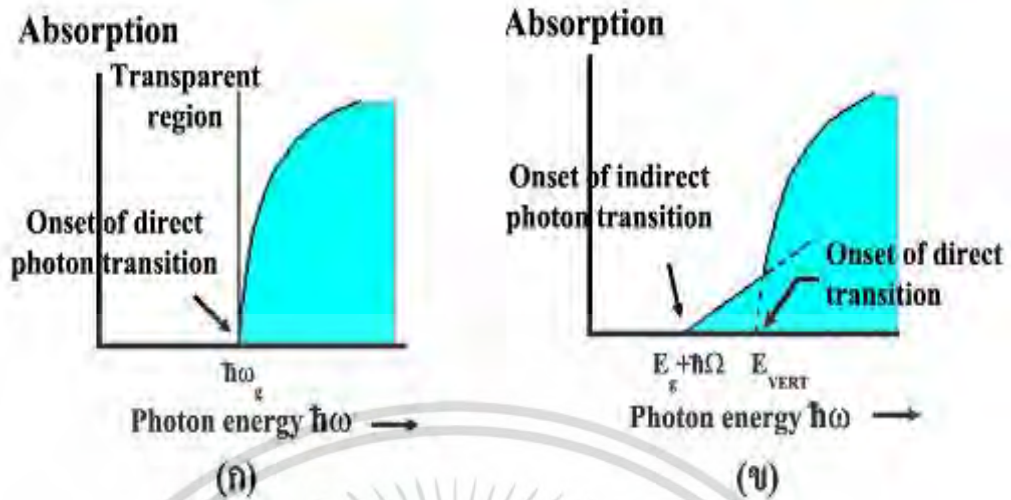


รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

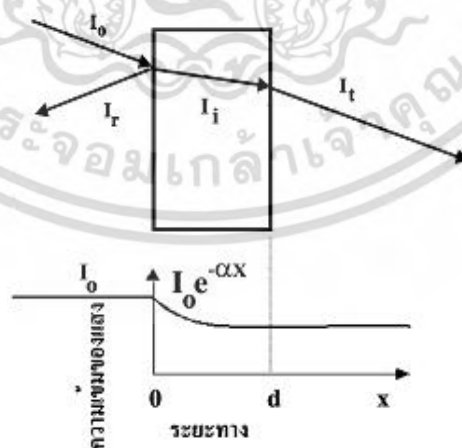
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.4.2 การส่งผ่านแสง [22,25,27-39]

การศึกษาวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R) I_0 \quad (2.4)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R) I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.5)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [1,4,6-18,19-25]

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.8)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_c = n - iK \quad (2.9)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง

K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [22,25,27-39]

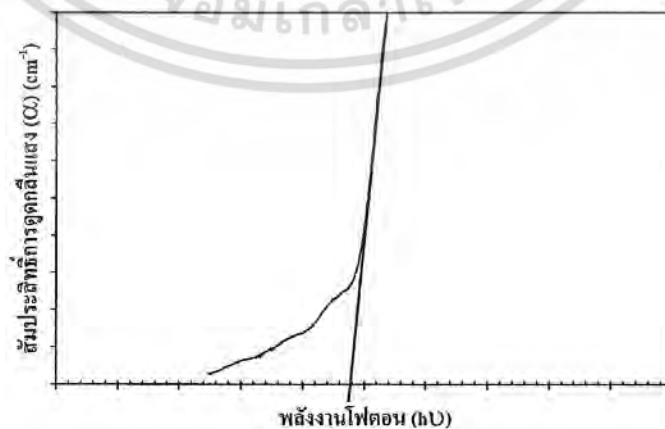
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอปลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.10 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีทีอิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.13)$$

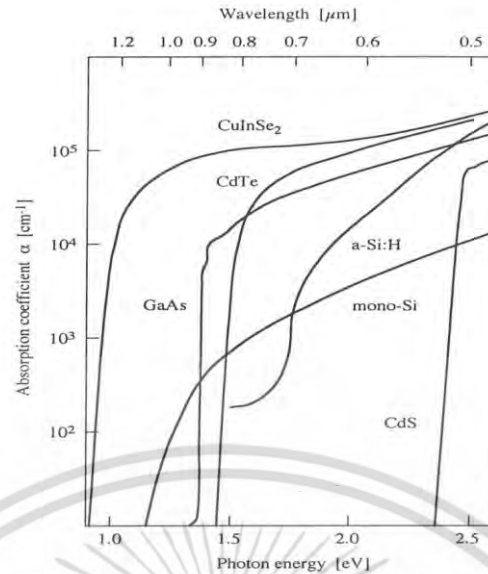
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงตัว



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.4.5 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [22,25,27-39]

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่มีประโยชน์ต่อนักเคมีอินทรีย์คือในย่านเลขคลื่น (k) 4000-650 ต่อเซนติเมตร ถ้าคิดเป็นความยาวคลื่น (λ) จะอยู่ในช่วง 2.5-15 ไมโครเมตร สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความยาวคลื่น และ เลขคลื่น คือ

$$\text{Wavelength} = \frac{10,000}{\text{Wave Number}(\text{cm}^{-1})} \quad (2.15)$$

สเปกตรัมอินฟราเรด เป็นการพล็อตระหว่างค่าความถี่ (เลขคลื่น, ต่อเซนติเมตร) หรือความยาวคลื่น (ไมโครเมตร) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) (รูปที่ 2.13) นิยามของสัมประสิทธิ์ การส่งผ่านแสง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านฟิล์มบางของสารตัวอย่างกับความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง กับ ค่าความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง คือ

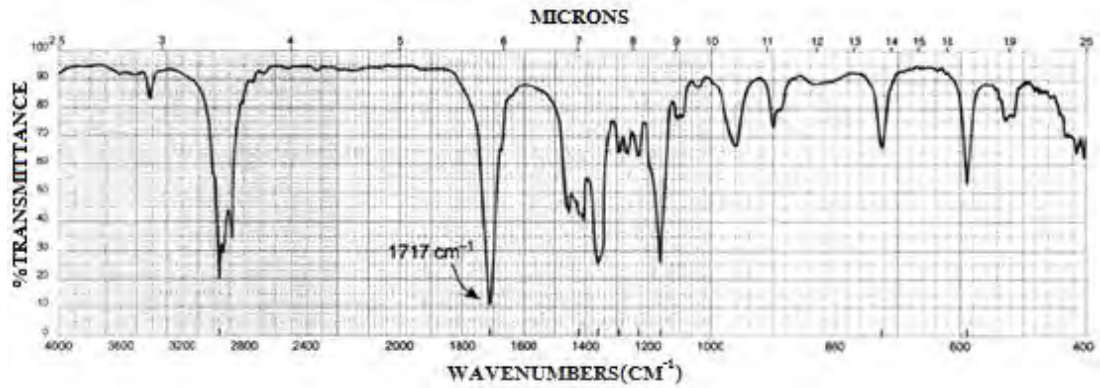
$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.16)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง

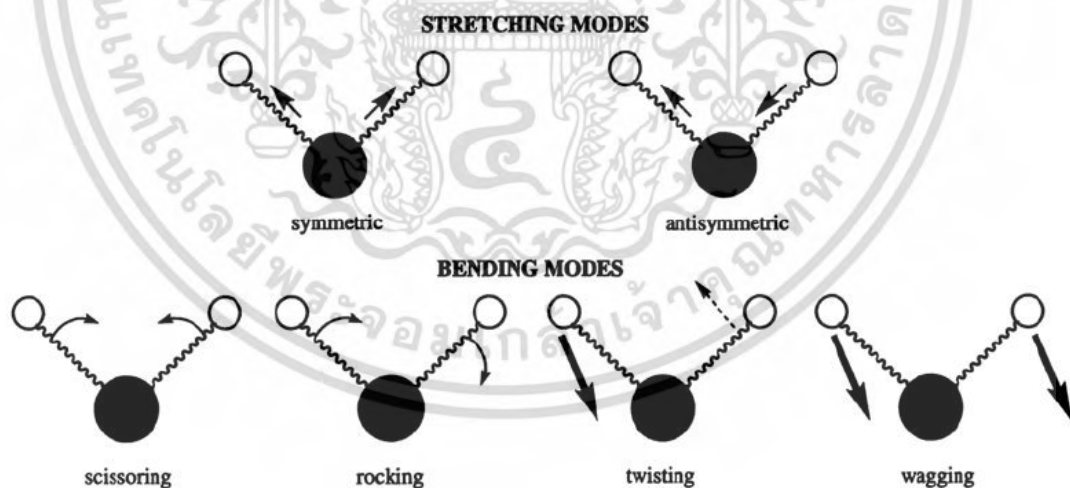
I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (quantized) กล่าวคือที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับค่าของความถี่ของการสั่นของพันธะนั้น นอกจากนี้ การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลมิได้ให้พีคใน สเปกตรัมอินฟราเรดเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electrical dipole moment) เท่านั้นที่จะมีพีคปรากฏใน สเปกตรัมอินฟราเรดตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะระหว่าง ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ C=C ใน RCH=CHR ไม่มีพีคใน สเปกตรัมอินฟราเรด ส่วนการสั่นของพันธะ C=O ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดพีคที่มีความเข้มสูงใน สเปกตรัมอินฟราเรด



รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป แแถบพลังงานที่เกิดใน สเปกตรัมอินฟราเรด เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแถบพลังงานที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบพื้นฐาน แถบพลังงานเหล่านี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้ง อาจมีแถบพลังงานเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้ เรียกว่า แถบพลังงานรวม (combination bands) ถ้าโอเวอร์โทน หรือ แถบพลังงานรวม เกิดใกล้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่น ๆ ได้โดยไม่ผิดเงื่อนไข

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานพื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแถบพลังงานพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ โอเวอร์โทน หรือแถบพลังงานรวม ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด เฟอร์มิ เรโซแนนซ์ (Fermi resonance) และพีคทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า เฟอร์มิดับเบิ้ล (Fermi doublet) รูปที่ 2.14 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH₂

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm ⁻¹ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm ⁻¹ (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm ⁻¹ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm ⁻¹ (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm ⁻¹ (w) 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm ⁻¹ อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลไคน์และเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH ₃ , CH ₂ และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C=N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลไคน์
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1650-1550 (w)	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1° เอมีน
1550-1510 (s)	N-H bending	2° เอมีน
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มข้นแน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH ₂ -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH ₂)
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R ₂ C=CH ₂)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R ₂ C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมൈด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

ย่อ : s = ความเข้มข้นสูง, vs = ความเข้มข้นสูงมาก, m = ความเข้มข้นปานกลาง, w = ความเข้มข้นต่ำ, vw = ความเข้มข้นต่ำมาก, sh แหวมคม, b = กว้าง, vb = กว้างมาก, OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง [22,25,27-39,43,45-50]

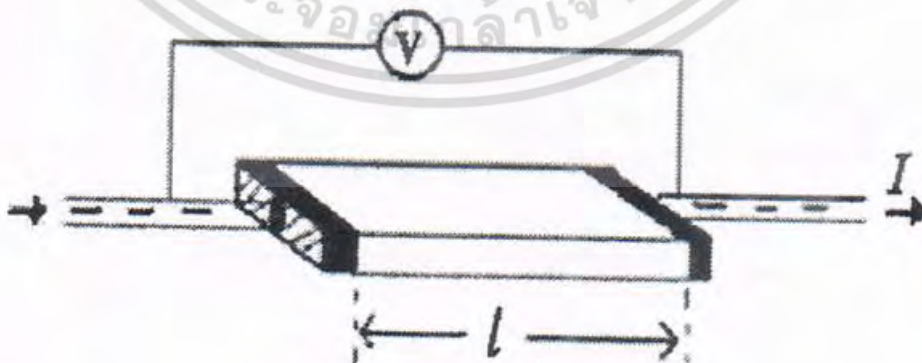
จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.6 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [22,25,27-39]

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่นแท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.15 แสดงภาพการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

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

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

2.7 สภาพนำไฟฟ้า [22,25,27-39,51-55]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity: σ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density: J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field: E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p) E \quad (2.19)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.20)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad \text{และ} \quad E = \frac{V}{l}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

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

หรือ

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.22)$$

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.7.1 การนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก

การนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำแบบฟิล์มบาง สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของโอห์ม (Ohm law) โดยที่จะเขียนอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแส คือ

$$J = n_0 q \mu \frac{V}{l} \quad (2.23)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นกระแส
 q คือ ประจุไฟฟ้า
 n_0 คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
 V คือ ความต่างศักย์
 l คือ ความหนาของฟิล์มบาง

โดยที่สามารถหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_0) ได้จากความสัมพันธ์

$$n_0 = N_C \exp \left[\frac{-E_F}{kT} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ N_C คือ ความหนาแน่นของสถานะยังผลในแถบนำ (Effective density of states in conduction band)

E_F คือ ระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างระดับเฟอร์มิกับขอบของแถบนำ

k คือ ค่าคงที่ของโบลส์มาน

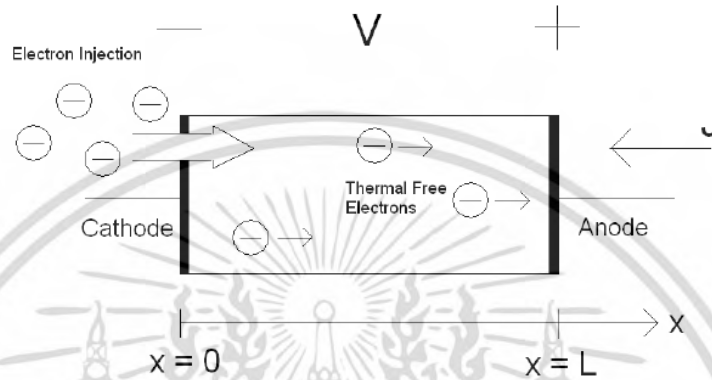
T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (Space-Charge-Limited Current)

-การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างในฉนวนและกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney)

เมื่อทำการพิจารณาการนำไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฉนวนอย่างแท้จริง (perfect insulator) โดยที่ฉนวนมีลักษณะเป็นแท่งตรงยาว มีความยาวตั้งแต่ 0 ถึง L และพื้นที่ด้านตัดขวางของทั้งสองด้านสัมผัสอยู่กับขั้วไฟฟ้า (Ohmic Contact) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการไหลของกระแสในฉนวนที่มีความยาวเท่ากับ L

จากรูปที่ 1 ความต่างศักย์เท่ากับ V ทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแท่งฉนวน โดยความยาวของแท่งฉนวน (L) ยาวมาก เมื่อเทียบกับความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (depletion layers) หรือชั้นโอห์มมิก (Ohmic layers) ที่ขั้วสัมผัส ในที่นี้จะพิจารณาแค่เฉพาะการฉีดอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำหรือโฮลเข้าสู่แถบวาเลนซ์อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ เพราะปรากฏการณ์ทั้งสองไม่ได้เกี่ยวเนื่องกัน แต่ในที่นี้จะพิจารณาการฉีดอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำ การพิจารณาการฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในฉนวนจะเหมือนกับการฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วคาโทดเข้าสู่ระบบสุญญากาศ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่ทำให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล เพราะเราจะถือว่าไม่มีโฮลอยู่ในระบบ จะได้ความหนาแน่นกระแส ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวน คือ

$$J = qn(x)\mu\varepsilon(x) \quad (2.25)$$

โดยที่ความต่างศักย์ ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวนหาได้จากสมการปัวซงง (Poisson) คือ

$$\left(\frac{\varepsilon}{q}\right)\left(\frac{d\varepsilon}{dx}\right) = n(x) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) จะได้

$$\varepsilon(x)\left(\frac{d\varepsilon}{dx}\right) = \frac{J}{\varepsilon\mu} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้ อธิบายสมการที่ (2.27) จะได้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon(x) = \left(\frac{2J}{\varepsilon\mu} \right)^{1/2} x^{1/2} \quad (2.28)$$

ดังนั้น ความต่างศักย์ ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวน คือ

$$V(x) = \int_0^L \varepsilon(x) dx \quad (2.29)$$

หรือเท่ากับ

$$V(x) = \left(\frac{8J}{9\varepsilon\mu} \right)^{1/2} L^{3/2} \quad (2.30)$$

ดังนั้น จะได้ความหนาแน่นกระแส เท่ากับ

$$J = \frac{9}{8} \varepsilon\mu \left(\frac{V^2}{L^3} \right) \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (3.31) มีชื่อเรียกว่ากฎของมอดต์-เกอร์นีย์ และอาจจะสรุปได้ว่าการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างในฉนวนมีค่าแปรผันกับความต่างศักย์ยกกำลังสอง (V^2) โดยจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของฉนวนด้วย

-การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างในสารกึ่งตัวนำสมบูร์น

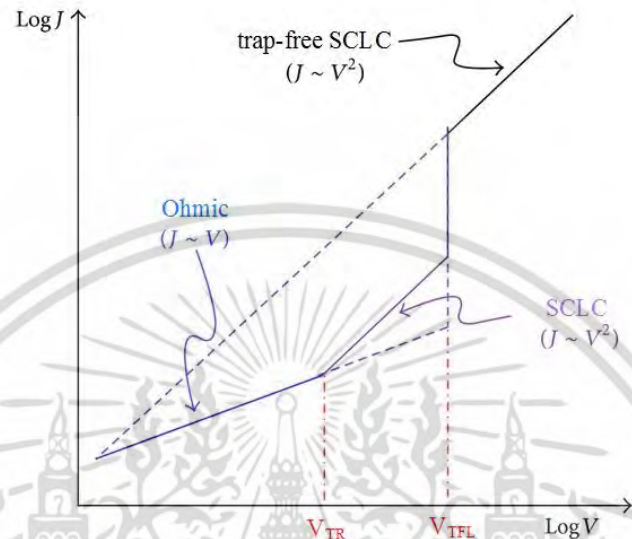
ถ้าหากจะพิจารณาสารกึ่งตัวนำสมบูร์น (perfect semiconductor) จะต้องทำการสมมุติเงื่อนไข คือ ภายในสารกึ่งตัวนำต้องมีความหนาแน่นของพาหะที่เกิดจากความร้อน (n_0) โดยที่จะพิจารณาเป็นอิเล็กตรอนในแถบนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์อย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ไม่มีกับดักพาหะและไม่เกิดปรากฏการณ์รวมตัวของพาหะ

เมื่อพิจารณาความต่างศักย์ในช่วงที่แรงดันต่ำๆ การนำไฟฟ้าจะเป็นแบบโอห์มมิก โดยที่ความหนาแน่นกระแสจะเท่ากับ

$$J = \left(\frac{n_0 q \mu}{L} \right) V \quad (2.32)$$

ที่ความต่างศักย์ในช่วงที่แรงดันสูงขึ้น การนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง โดยที่ความหนาแน่นของกระแสจะแปรผันกับความต่างศักย์ยกกำลังสอง (V^2) กล่าวคือ การนำไฟฟ้าเปลี่ยนจากกฎของโอห์มไปเป็นกฎของมอดต์-เกอร์นีย์

ความหนาแน่นกระแสจากสมการที่ (2.25) และ (2.31) จะมีค่าเท่ากันที่ความต่างศักย์ค่าหนึ่ง โดยที่ความต่างศักย์ที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากันเรียกว่าความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 1 (Transition Voltage) (V_{TR}) กล่าวคือ เป็นความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเป็นรอยต่อของการนำกระแสจากกฎของโอห์มเปลี่ยนไปเป็นกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟการนำไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ

จากสมการที่ (2.31) และ (2.32) สามารถหาค่าความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 1 ได้จาก

$$\frac{9}{8} \left(\frac{\epsilon \mu}{L^3} \right) V_{TR}^2 = \left(\frac{n_0 q \mu}{L} \right) V_{TR} \quad (2.33)$$

จะได้

$$V_{TR} = \frac{8}{9} \left(\frac{n_0 q L^2}{\epsilon} \right) \quad (2.34)$$

-ผลกระทบของกักตักพาหะต่อการนำไฟฟ้า

กักตักพาหะ (Trap) ในสารกึ่งตัวนำและฉนวนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการรวมตัว (Recombination) และชนิดที่ไม่มีการรวมตัว (Non-Recombination) โดยชนิดที่ไม่เกิดการรวมตัวจะพบในฉนวนเท่านั้น เพราะในฉนวนจะมีพาหะเพียงชนิดเดียวเท่านั้น

ในการพิจารณาจะสมมติเงื่อนไขให้มีแต่อิเล็กตรอนในแถบนำเท่านั้น โดยที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ (ความหนาแน่นของพาหะที่เกิดจากความร้อน) หาได้จากความสัมพันธ์

$$n_0 = N_C \exp \left[- \left(\frac{E_C - E_{Fn}}{kT} \right) \right] \quad (2.35)$$

เมื่อ E_{Fn} คือ ค่าพลังงานเฟอร์มิสำหรับเงื่อนไขที่ไม่สมดุล (non-equilibrium) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพิธีการเท่านั้น เมื่อคุณผู้เห็นได้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความหนาแน่นของกักตักพาหะที่ถูกครอบครองในแต่ละระดับพลังงาน คือ

$$n_1 = \frac{N_t}{\left[1 + \exp\left(\frac{E_t - E_{Fn}}{kT}\right) \right]} \quad (2.36)$$

เมื่อ E_t คือ ระดับพลังงานของกักตักพาหะ

N_t คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะในระดับพลังงาน E_t

เมื่อระดับพลังงาน E_{Fn} ต่ำกว่าระดับพลังงาน E_t มากกว่า $3kT$ จะทำให้กักตักพาหะที่อยู่ในระดับพลังงาน E_t จะถือว่าเป็นกักตักพาหะแบบตื้น (shallow trap) โดยที่ความหนาแน่นของกักตักที่จะเข้าครอบครองในแต่ละระดับพลังงานสามารถเขียนใหม่ได้ คือ

$$n_1 = N_t \exp\left[-\left(\frac{E_t - E_{Fn}}{kT}\right)\right] \quad (2.37)$$

จากสมการที่ (2.42) และ (2.44) สามารถที่จะนิยามค่า θ คือ

$$\theta = \left(\frac{n_0}{n_0 + n_1}\right) = \left[\frac{N_c}{N_c + N_t \exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right)}\right] \quad (2.38)$$

เมื่อค่า θ ของกักตักพาหะแบบตื้นที่อุณหภูมิใดๆ จะขึ้นอยู่กับส่วนหลักๆคือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะและความลึกของระดับพลังงาน ($E_c - E_t$) เมื่อ N_t มีค่ามากกว่า N_c จะทำให้ θ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อระดับพลังงาน E_t อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงาน E_c หรือ N_t มีค่ามาก หรือจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 แบบ โดยที่สมการที่ (2.38) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\theta = \frac{N_c}{N_t} \exp\left[\frac{-(E_c - E_t)}{kT}\right] = \frac{N_c}{N_t} \exp\left[\frac{E_t - E_c}{kT}\right] \quad (2.39)$$

กล่าวคือ ที่ค่า θ มีค่าน้อยกว่าหนึ่งมากๆนั้น อิเล็กตรอนที่ฉีดเกือบทั้งหมดจะเข้าสู่กักตักพาหะและมีแค่ส่วนหนึ่งที่เข้าสู่แถบนำและยังแสดงผลเหมือนกักตักพาหะ

ในที่นี้ ค่าความหนาแน่นของกระแสแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง กรณีที่มีกักตักพาหะจะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการกักตักพาหะ โดยจะนิยาม θ ว่าเศษส่วนน้อยของพาหะที่ถูกฉีดที่มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอเหมาะสำหรับแถบนำ ส่วน L คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำที่มีผลมาจากกักตักพาหะ คือ

$$J = \left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{\epsilon\mu\theta}{L^3}\right) V^2 \quad (2.40)$$

และความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{TR} = \frac{8}{9} \left(\frac{n_0 q L^2}{\epsilon\theta}\right) \quad (2.41)$$

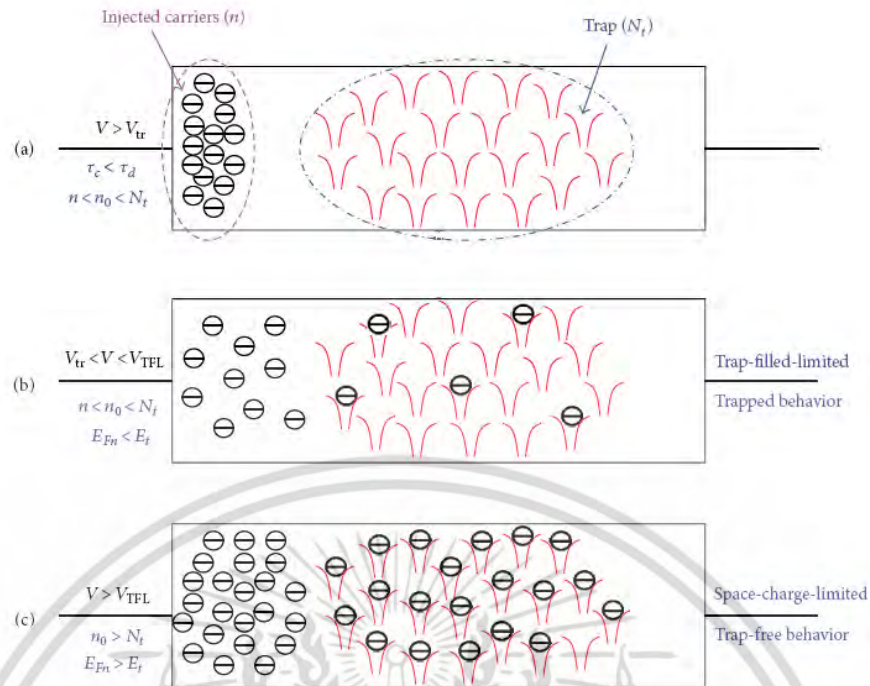
จากที่ได้กล่าวมา สามารถสรุปเกี่ยวกับผลของกักตักพาหะต่อการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ตามรูปที่ 2.18

จากสมการที่ (2.36) เมื่อระดับพลังงาน E_{Fn} อยู่เหนือกว่าระดับพลังงาน E_i มากกว่า $3kT$ จะได้ว่า

$$n_i \cong N_i \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) จะแสดงถึงกักตักพาหะทุกตัวอยู่ในสภาพเต็ม โดยกักตักพาหะในที่นี่จะเปรียบเสมือนกับกักตักพาหะลึกลับจะส่งผลให้ค่า θ สำหรับกรณีนี้ มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่งและจะถือว่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ N_i มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า N_c ซึ่งกักตักพาหะลึกลับเหล่านี้ จะไม่ส่งต่อการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำ

การแบ่งระหว่างกักตักพาหะแบบเต็มและกักตักพาหะลึกลับจะไม่มีควมแน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กักระดับการฉีดพาหะ เมื่อระดับการฉีดพาหะสูงขึ้น ระดับพลังงาน E_{Fn} อยู่เหนือกว่าระดับพลังงาน E_i มากกว่า $3kT$ กักตักพาหะทุกตัวจะจับพาหะไว้นจนเต็มและจะเปลี่ยนจากกักตักพาหะแบบเต็มไปเป็นกักตักพาหะลึกลับอธิบายง่าย ๆ ได้ตามรูปที่ 2.18



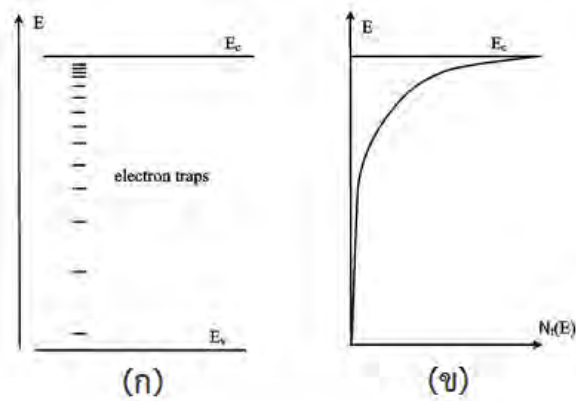
รูปที่ 2.18 แสดงกับดักพาหะที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.18 การนำไฟฟ้าในช่วงแรกจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม อธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.18a แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้มากขึ้นแต่น้อยกว่า V_{TR} จะเป็นการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่ได้รับการดัดแปลงมากจากกฎของมอดต์-เกอร์นีย์ ตามสมการที่ (2.41) เป็นไปตามรูปที่ 2.18b โดยในช่วงนี้จะมีพาหะเพียงเล็กน้อยเท่าที่เข้าสู่แถบนำ ส่วนที่เหลือจะเข้าไปอยู่ในกับดักพาหะ และเมื่อที่ความต่างศักย์มากกว่า V_{TEF} จะทำให้กับดักพาหะเต็ม การนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎมอดต์-เกอร์นีย์ ตามสมการที่ (2.31) แสดงได้ดังรูปที่ 2.18c

การประมาณค่าความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 หรือ V_{TEF} ที่เป็นความต่างศักย์ในการเติมกับดักพาหะให้เต็ม สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของพาหะที่ต้องการในการเติมกับดักพาหะให้เต็มต่อหนึ่งหน่วยและค่าความจุต่อหนึ่งหน่วย คือ

$$V_{TFL} = \frac{qN_t L^2}{2\epsilon} \quad (2.43)$$

เมื่อกับดักพาหะถูกเติมให้เต็ม ลักษณะของการนำไฟฟ้าจะการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.19 แสดงกับดักพาหะที่กระจายตัวอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ
 ก. การกระจายตัวของกับดักพาหะในช่องว่างแถบพลังงาน
 ข. ความหนาแน่นของกับดักพาหะที่เปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากที่กล่าวมาข้างต้น การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบอย่างง่ายคือ

$$J = kV^m \quad (2.44)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบลอการิทึมดังนี้

$$\ln J = m \ln V + \ln k \quad (2.45)$$

ซึ่ง m คือ ค่าความชันของกราฟและจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่ $m \geq 2$ จะหมายความว่ากับดักพาหะจะมีระดับพลังงานที่ต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังที่ได้แสดงยังรูปที่ 2.19 ซึ่งแลมเบิร์ตและมาร์ก (Lambert and Mark) ได้อธิบายให้อยู่ในรูปแบบความหนาแน่นของกระแส คือ

$$J = q\mu N_c \left(\frac{\varepsilon}{qP_0 kT_t} \right)^l \frac{V^{l+1}}{L^{2l+1}} \quad (2.46)$$

เมื่อ l คือ อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิเฉพาะของการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลของกับดักพาหะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการวัด

P_0 คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ขอบล่างสุดของแถบนำ

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

N_c คือ ความหนาแน่นสถานะยังผล (Effective density of states) ในแถบนำ

V คือ ความต่างศักย์

μ คือ สภาพคล่องพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $m = l + 1$ และ l จะสัมพันธ์อยู่กับ T_t คือ

$$l = m - 1 = \frac{T_t}{T} \quad (2.47)$$

โดยที่ T_t คือ ลักษณะเฉพาะของอุณหภูมิ (characteristic temperature) ของการแจกแจงกับดักพาหะแบบเอกซ์โพเนนเชียล และ T คือ อุณหภูมิในการทดลอง ในทางปฏิบัติพบว่าที่ T เพิ่มขึ้นแล้ว m , l และ T_t จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของกับดักประจุยังแสดงได้ถึงความสัมพันธ์

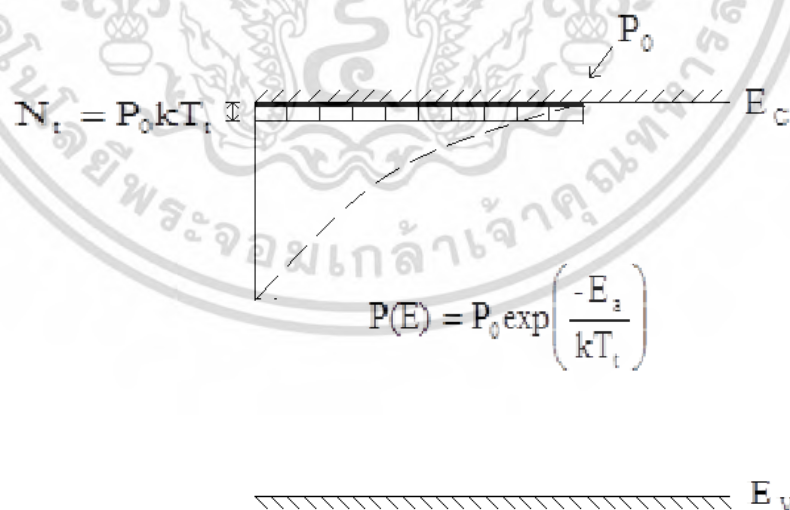
$$N_t = P_0 k T_t \quad (2.48)$$

เมื่อ P_0 คือ ความหนาแน่นของกับดักประจุต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน ที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์

ดังนั้น ความหนาแน่นของกับดักประจุต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่ระดับใดๆ ซึ่งอยู่ต่ำกว่าขอบล่างสุดของแถบนำ คือ $P(E)$ โดยที่

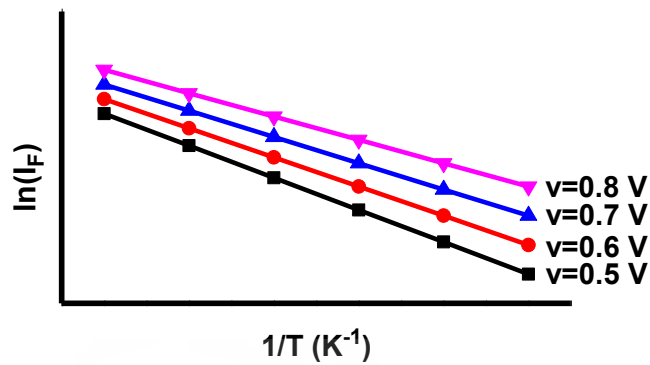
$$P(E) = P_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT_t}\right) \quad (2.49)$$

N_t จะมีหน่วยเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^{-3}) และ P_0 มีหน่วยเป็น ต่อจูลลูกบาศก์เซนติเมตร ($\text{J}^{-1} \text{cm}^{-3}$) ลักษณะเฉพาะการกระจายของ จะแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการกระจายของค่า $P(E)$

ในทางปฏิบัติ N_t สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_F$ กับ $1/T$ ที่แต่ละค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ในอาณาบริเวณที่เป็นกรนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจจะค้าง (SCLC) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_F$ กับ $1/T$ ของการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง

ความชันของกราฟของรูปที่ 2.21 คือ

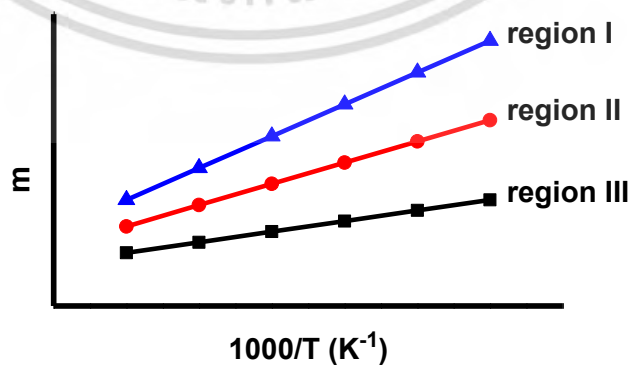
$$\frac{d(\ln I_F)}{d(1/T)} = T_1 \ln \left(\frac{\epsilon_s V}{eL^2 N_t} \right) \quad (2.50)$$

จากรูปที่ 2.21 จะได้ความชัน 4 ค่า ดังนั้น ก็จะได้ N_t จำนวน 4 ค่า

ดังนั้น ค่าเฉลี่ย N_t ได้จากการนำเอาค่า N_t ทั้ง 4 ค่ามารวมกัน แล้วหารด้วย 4 จากนั้นค่า จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_t = P_0 kT_1 \quad (2.51)$$

การนำเอาค่า m ของสมการที่ 2.44 มาเขียนกราฟจะได้เส้นตรง แล้ว m จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเป็นการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง



รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง m กับ $1000/T$ ของการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ $m = 1.5$ การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามรูปแบบกฎของไฮด์-แลงมัวร์ คือ

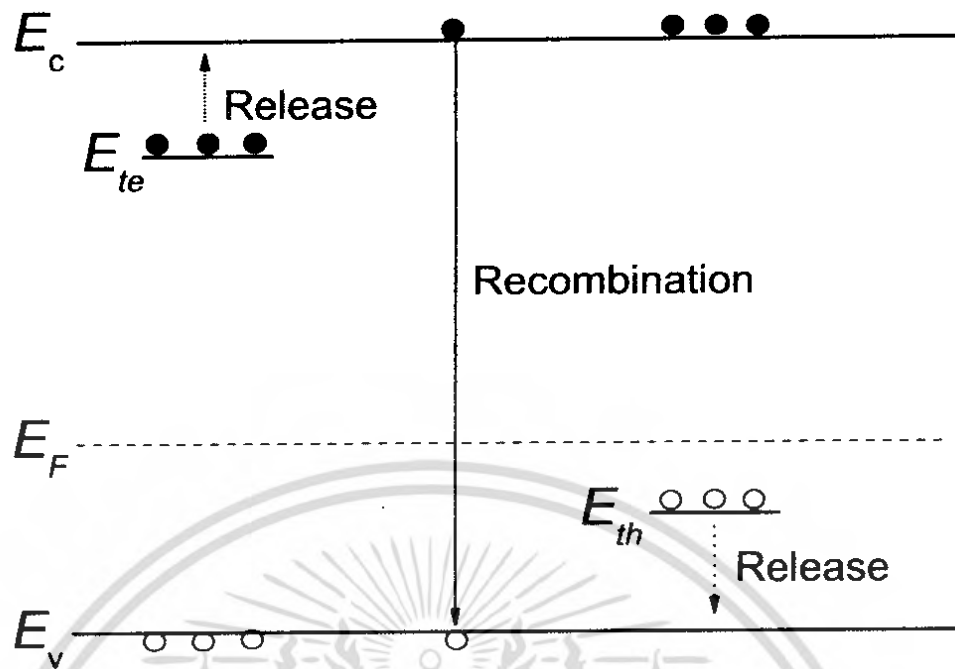
$$J = \frac{4\epsilon}{9L^2} \left(\frac{2q}{m^*} \right)^{\frac{1}{2}} V^{\frac{3}{2}} \quad (2.52)$$

เมื่อ m^* คือ มวลยังผลของพาหะ

การนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างตามกฎของไฮด์-แลงมัวร์ จะมีระดับพลังงานเป็นแบบระดับพลังงานเดี่ยว (single level) และที่ $m = 2$ จะเป็นการนำไฟฟ้าแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิดของมอดต์-เกอร์นีย์ ตามที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้

2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง [22,25,30,31,35,38,45-50,56-58]

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.23 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า การรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานสิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลาานกว่ากลไกการรวมตัว แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายิ่งนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.23 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชิ้นสารมีความกว้าง w ความหนา d และยาว l ให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า I จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.53)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\xi$ และ $\xi = V_a/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.54)$$

แทนสมการที่ (2.53) ลงใน (2.54) จะได้

$$I = enV_a \mu \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.55)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$n = N_u \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.56) ลงใน (2.55) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = eN_{ii} V_a \mu \left(\frac{wd}{l} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.57)$$

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.58)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{eV_a \mu} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.59)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.55) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) (nd) V_a \\ &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) \sigma_i V_a \end{aligned} \quad (2.60)$$

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.61)$$

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{eV_a \mu} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
- μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
- w คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- l คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- d คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
- τ_r คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
- N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาช่วยด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1,000k)}\left(\frac{1,000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ $\text{ความชัน} = \frac{E_t}{(1,000)k}$

ดังนั้น $E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q}$

$$= (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.64)$$

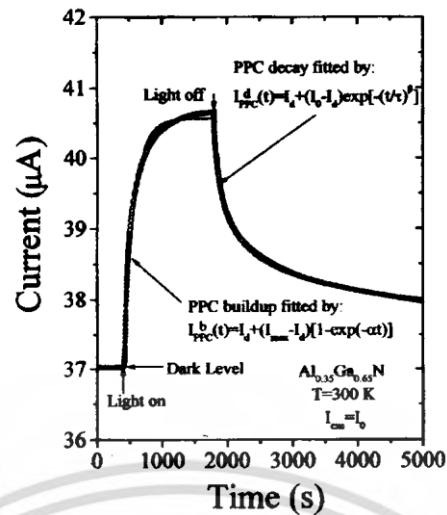
ในการศึกษาพลาสมาไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์

$$I_p = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.65)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$I_p = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

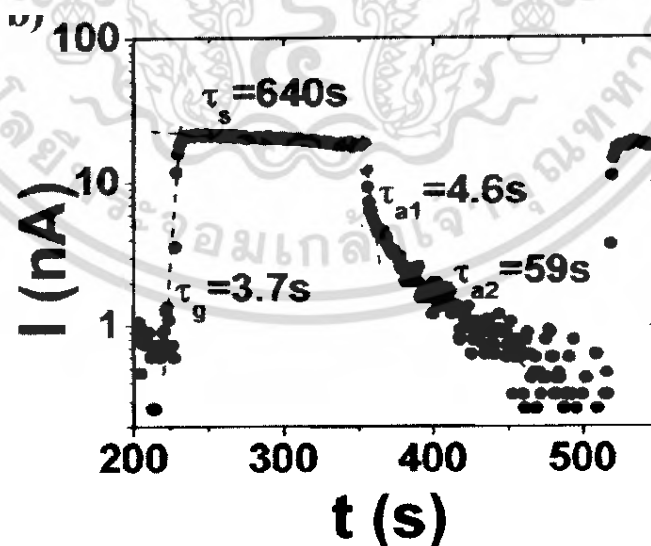


รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงกับเวลาเชิงแสง

จากสมการที่ (2.65) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_{o'} - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.67)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.24) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตชาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.61) และสมการที่ (2.65) ดังนี้ คือ]

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.68)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.66) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเตเรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.69)$$

จากสมการที่ (2.67) สามารถที่จะหาค่า σ_{t1} และ σ_{t2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.62) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{eV_a\mu} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.70)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{eV_a\mu} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.71)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{eV_a\mu} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.72)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{eV_a\mu} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.73)$$

สมการที่ (2.69) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \quad (2.74)$$

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่ $A_1 + A_2 = 1$ [38-40] ซึ่งค่า A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซีโพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.75)$$

ส่วนกรณีของชิ้นสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.57) และ (2.69) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.76)$$

จากสมการที่ (2.74) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{eV_a \mu_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.77)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{eV_a \mu} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.78)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับเราจะได้ว่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{eV_a \mu} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.79)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{eV_a \mu} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.80)$$

สมการที่ (2.76) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A''_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A''_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.81)$$

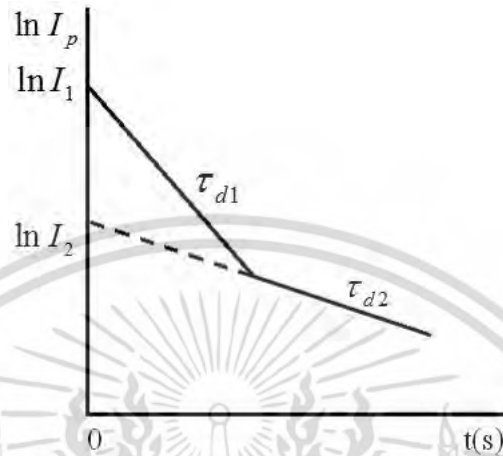
ซึ่ง A''_1 และ A''_2 สามารถหาได้จากการพิตรกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซีโพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A'''_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \right] + A'''_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.83)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะของฟิล์มบางได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{c1} = \frac{I_1}{eV_a \mu} \left(\frac{1}{w} \right) \quad (2.84)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$

ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.85)$$

เราสามารถหาค่า I_2 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_2$) และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{c2} = \frac{I_2}{eV_a \mu_a} \left(\frac{1}{w} \right) \quad (2.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

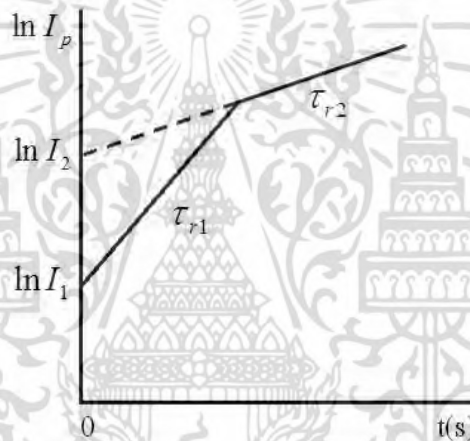
$$N_{t1} = \frac{I_1}{eV_a \mu} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.87)$$

และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{eV_a \mu} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.88)$$

2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัปดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.89)$$

$$\frac{I}{I_{\max}} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)$$

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)$$

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = -\frac{t}{\tau_r} \quad (2.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร
$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.87) จะประมาณได้ว่าเป็น

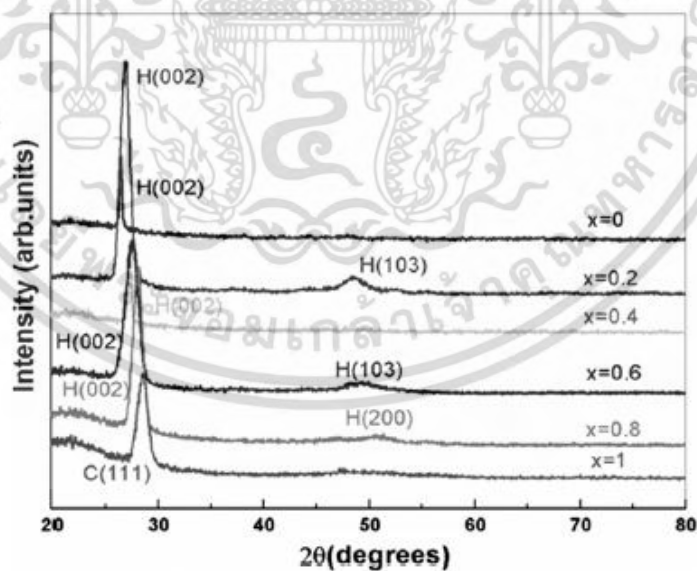
$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.91)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.88) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น

ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.82), (2.84), (2.85) และ (2.86) ได้เช่นเดียวกับกระแสขา
ลง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [59]

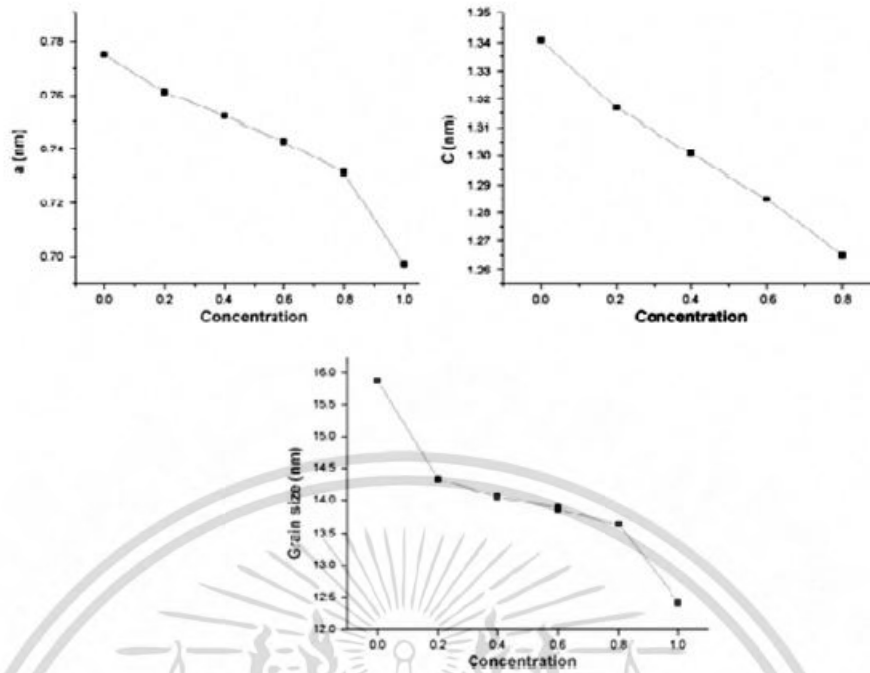
จากการค้นคว้างานวิจัยต่างๆ พบว่า Zakria และคณะ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ จากผลการศึกษา XRD พบว่ามีทั้งระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเป็นระนาบที่โดดเด่น ดังแสดงในรูปที่ 2.28



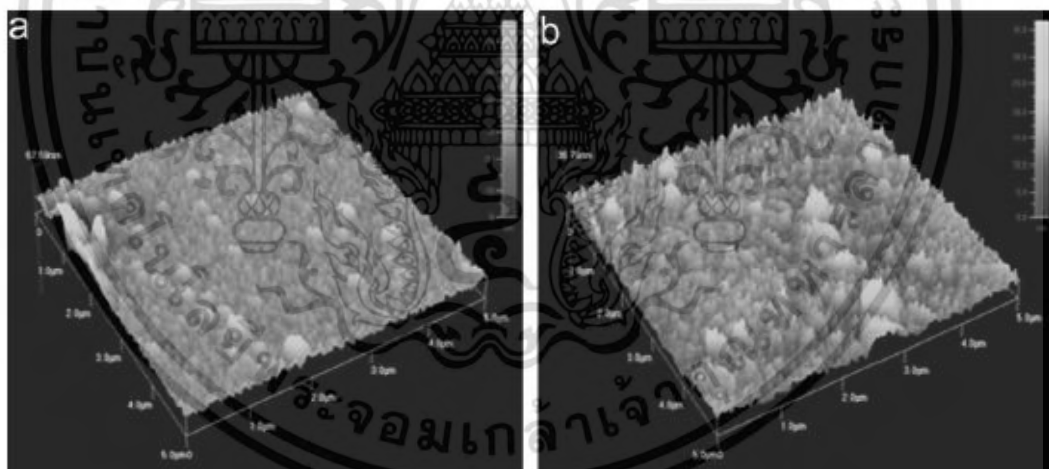
รูปที่ 2.28 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$

ค่าคงที่โครงสร้างผลึกและขนาดของเกรน มีค่าลดลงค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตามค่าสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



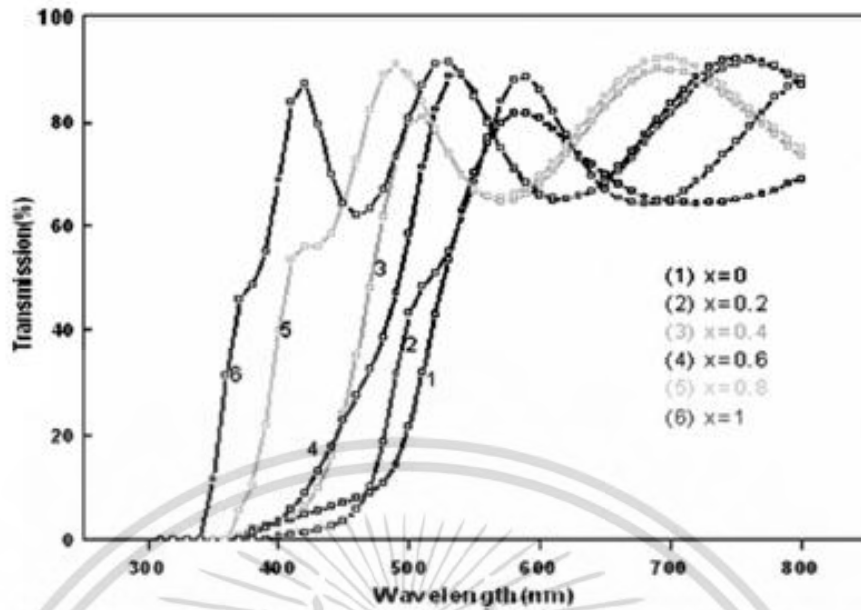
รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึกและขนาดของเกรนกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$



รูปที่ 2.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$
 a. $x=0.2$ b. $x=0.4$

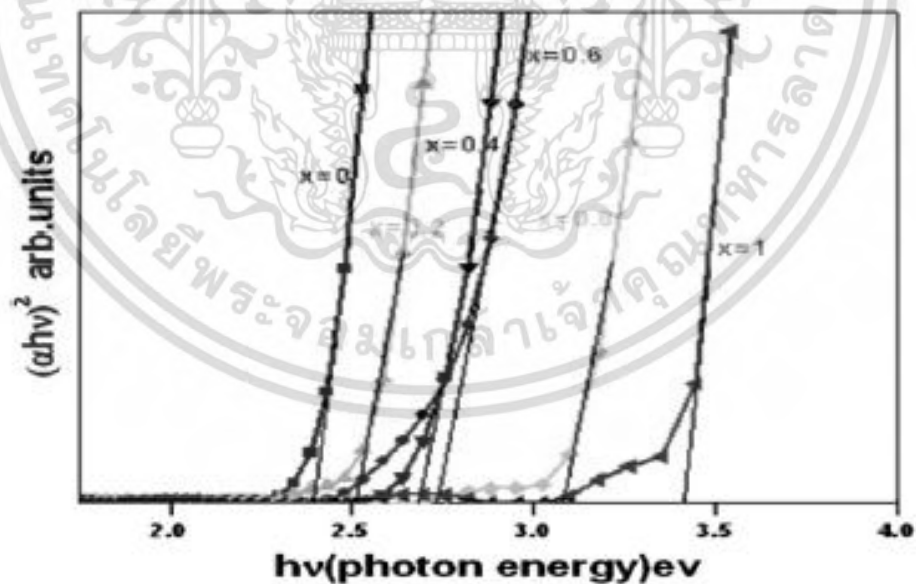
จากรูปที่ 2.30 เมื่อค่าสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะผิวหน้ามีความเรียบเพิ่มมากขึ้น ค่าเฉลี่ยความขรุขระ (RMS) อยู่ที่ 4.864 และ 3.497 nm ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากขนาดของเกรนที่เล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



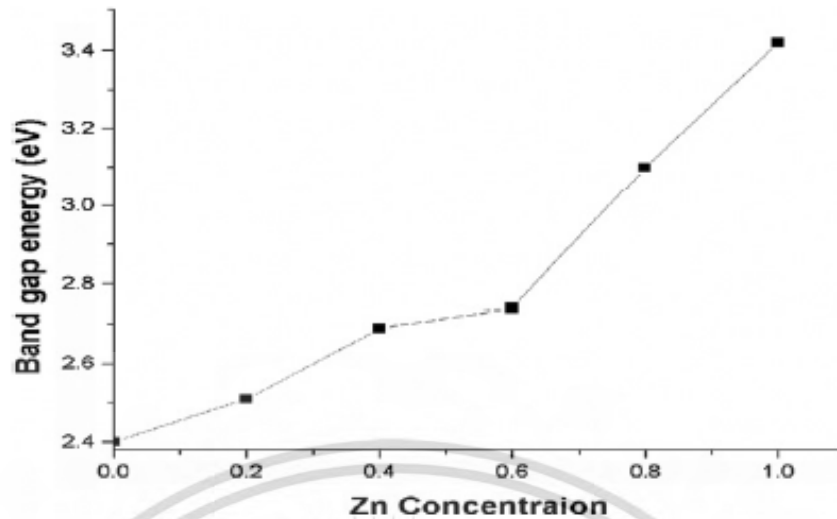
รูปที่ 2.31 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$

จากรูปที่ 2.31 เมื่อค่าสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะผิวหน้ามีความเรียบเพิ่มมากขึ้น การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะเลื่อนมาทางความยาวคลื่นที่สั้นลง



รูปที่ 2.32 แสดงการหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับเศษส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$

จากการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในรูปที่ 2.28 นำมาหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่า เมื่อค่าสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะผิวหน้ามีความเรียบเพิ่มมากขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. กระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เต้าอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
8. สารเคมี(น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)
9. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
 - ท่อแก้วควอซปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทั้งสแตน 1,000 วัตต์
2. ผงผลึกแคดเมียมเซลีไนต์และซิงค์เซลีไนต์ บริสุทธิ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. เมทธานอล
5. ปากคืบ
6. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี
7. แวนตากรองแสง
8. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้
9. ครกบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu₂O

1. กระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
8. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอตประจุ อะซีโตนและ เอทานอล)
9. นาฬิกาจับเวลา

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu₂O

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อน
2. ระบบบริแฉ่คที่พีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
3. ผงผลึกซิงค์เซลีนไนด์ บริสุทธิ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์
4. เป้าคอปเปอร์ (Cu) บริสุทธิ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์
5. ก๊าซออกซิเจน บริสุทธิ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
7. อะซีโตน (CH₃COOH)
8. สำลีสำหรับการเช็ดทำความสะอาด
9. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี
10. แวนตากรองแสง
11. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรดิฟแฟร็กโตเมเตอร์(XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงไฟฟ้าดัน 30 กิโลโวลต์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-60 องศา

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า

3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300-1100 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. เต้าให้ความร้อน
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟ
8. คอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 25x50 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
7. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

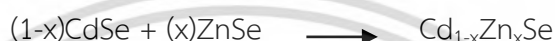
1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยเมทานอล
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอลนีลทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่แล้ว
4. ทำการอบกล่องแกรไฟต์ที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำกล่องแกรไฟต์ไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
6. ทำความสะอาดท่อแก้วควอซปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เชย่าทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ จากนั้นเชย่าทำความสะอาดด้วย

เอทานอล 1 ครั้งตามด้วยน้ำปลอดประจุ 3 ครั้ง ทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ปิดปากท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก

7. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยเอทานอล
8. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยแปรงทองเหลือง ขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายละเอียด ทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ตกค้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

3.2.3 การเตรียมผลึกของสารตั้งต้น $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารตั้งต้น CdSe และ ZnSe ดังสมการ



มวลอะตอมของธาตุ Cd, Zn และ Se มีค่าเท่ากับ 112.41, 65.38 และ 78.96 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น CdSe = $112.41 + 78.96 = 191.37$ กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น ZnSe = $65.38 + 78.96 = 144.34$ กรัมต่อโมล

กรณี $x = 0.2$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$Cd_{0.8}Zn_{0.2}Se = (0.8 \times 112.41) + (0.2 \times 65.38) + 78.96 = 181.964$ กรัมต่อโมล

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Se$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารตั้งต้น CdSe} = \left(\frac{0.8 \times 191.37}{181.964} \right) = 0.8414 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารตั้งต้น ZnSe} = \left(\frac{0.2 \times 144.34}{181.964} \right) = 0.1586 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.4$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นได้เท่ากับ

$Cd_{0.6}Zn_{0.4}Se = (0.6 \times 112.41) + (0.4 \times 65.38) + 78.96 = 172.558$ กรัมต่อโมล

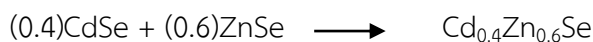
ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Se$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารตั้งต้น CdSe} = \left(\frac{0.6 \times 191.37}{172.558} \right) = 0.6654 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารตั้งต้น ZnSe} = \left(\frac{0.4 \times 144.34}{172.558} \right) = 0.3346 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x = 0.6$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

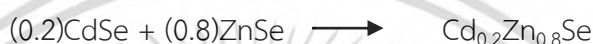
$$\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Se} = (0.4 \times 112.41) + (0.6 \times 65.38) + 78.96 = 163.152 \text{ กรัมต่อโมล}$$

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

$$\text{ของสารตั้งต้น CdSe} = \left(\frac{0.4 \times 191.37}{163.152} \right) = 0.4692 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารตั้งต้น ZnSe} = \left(\frac{0.6 \times 144.34}{163.1521} \right) = 0.5308 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.8$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Se} = (0.2 \times 112.41) + (0.8 \times 65.38) + 78.96 = 153.746 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้นจำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารตั้งต้น CdSe} = \left(\frac{0.2 \times 191.34}{153.746} \right) = 0.2489 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารตั้งต้น ZnSe} = \left(\frac{0.8 \times 144.34}{153.746} \right) = 0.7511 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆของ CdSe และ ZnSe และอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

Mole Fraction (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	CdSe	ZnSe		
0.0	-	1.0000	680	580
0.2	0.8414	0.1586	780	680
0.4	0.6654	0.3346	780	680
0.6	0.4692	0.5308	780	680
0.8	0.2489	0.7511	780	680
1.0	1.0000	-	780	680

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

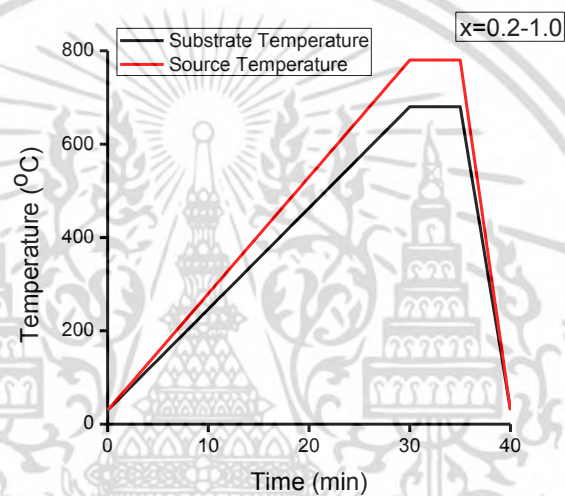
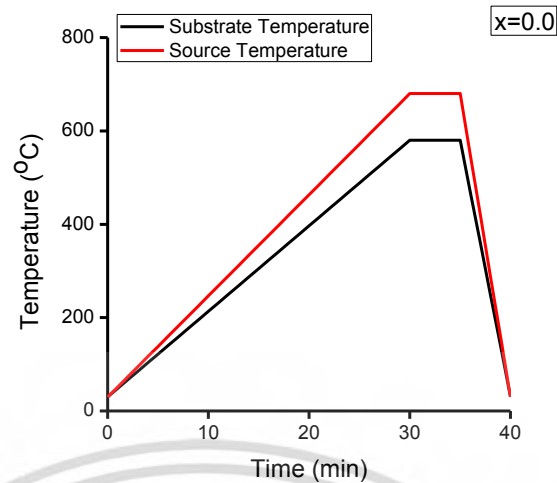
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

- การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ชั่งสารตั้งต้น $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,$ และ 1.0) ตามสัดส่วนผสมทาง เคมีต่างๆที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
5. นำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบล้ออากาศออก จนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนจากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประติษฐานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20–60 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของยี่ห้อ LED รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วและวัดค่าพลังงานกระตุ้นโดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

3.4 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu₂O

3.4.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdSe/p-Cu₂O

1. ทำความสะอาดกระจก FTO ด้วยอะซิโตน
2. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4. นำแผ่นกระจกมาเก็บไว้ในภาชนะที่สามารถควบคุมความชื้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อน

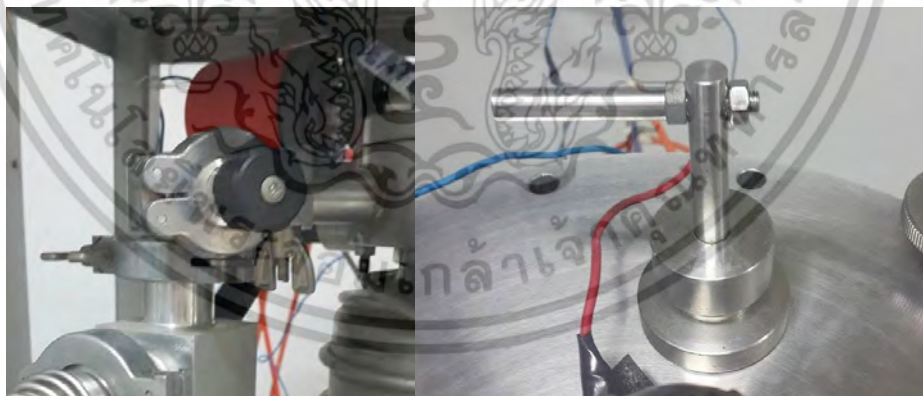
ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.2 โดยมีขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆ และคราบไขมันด้วยอะซิโตนและเอทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบของแคดเมียมเซลีไนด์ใส่ลงในภาชนะระเหยสารเคมีซึ่งเป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นกระจกที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางลงบนหน้ากอกซึ่งทำมาจากแผ่นอลูมิเนียม เจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วมีเสื่อและวาล์วปล่อยอากาศเข้า ให้อยู่ตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. สับสวิทช์ไปที่วาล์วหยาบ (roughing) และเปิดปั๊มกลโรตารี (ยี่ห้อ Edwards ชนิด two stage รุ่น E2M8) รอจนความดันอยู่ในย่านมิลลิบาร์
7. สับสวิทช์กลับมาที่แบคคิง (backing) และเปิดระบบน้ำวนให้ปั๊มดีฟิวชัน
8. รอจนเข็มตีกลับมาที่เดิม แล้วเปิดปั๊มดีฟิวชัน (ยี่ห้อ Edwards รุ่น 63-150M) รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ให้น้ำมันในปั๊มเดือด
9. สับสวิทช์กลับไปที่วาล์วหยาบ ให้ความดันกลับมาอยู่ในย่านมิลลิบาร์
10. สับสวิทช์กลับมาที่แบคและเปิดวาล์วมีเสื่อ รอจนกระทั่งความดันอยู่ที่ 5.5×10^{-5} มิลลิบาร์
11. เริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเสียบปลั๊กแบริแอกแล้วเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 130 แอมแปร์ (อัตราการเคลือบอยู่ที่ประมาณ 88 นาโนเมตรต่อนาที)
12. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มบางตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแบริแอกและถอดปลั๊กออก
13. ปิดวาล์วมีเสื่อ โดยสวิทช์ยังอยู่ที่ตำแหน่งแบคคิง
14. ปิดปั๊มดีฟิวชัน และรอจนปั๊มเย็น โดยใช้เวลาประมาณ 40-50 นาที
15. ปิดระบบน้ำวนและปั๊มกลโรตารี
16. เปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ (chamber)
17. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบออกมา

3.4.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เตรียมได้โดยวิธีอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบอีพิตักษิแมกนีตรอนสปีดเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิทช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิทช์ปั้มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป้าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ซีลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูปอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป้าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป้าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ซีลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างซีเตอร์และกราวด์ซีลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะห่างฐานรองและเป้าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมุนน็อตทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



รูปที่ 3.3 (ก)แสดงภาพ leak valve

(ข)แสดงภาพคั่นบังคับ Shutter ที่อยู่ภายใน

8. ปิดซีเตอร์ (คั่นบังคับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป้าเอาไว้
9. เปิดสวิทช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงาน มาตราวัดความดัน
10. โยกสวิทช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

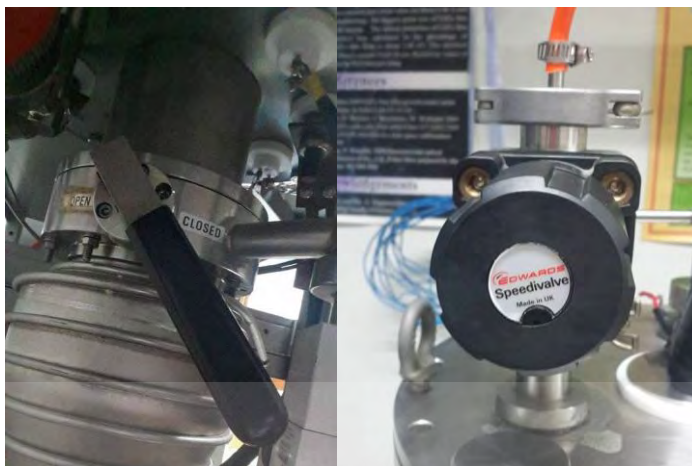
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวยังสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน
13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)



รูปที่ 3.4 (ก.) แสดงภาพตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มกลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย)

(ข.) แสดงภาพวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

14. เมื่อครบ 15 นาที เปิดวาล์วหลังโดยโยกตำแหน่งไปที่ Backing และปรับคันโยกของวาล์วผีเสื้อ (butterfly valve) ไปที่ตำแหน่งเปิด (open) (ดันคันโยกออกจากตัวจนสุด) หากดันคันโยกออกจากตัวตำแหน่งของวาล์วผีเสื้อคือเปิดแต่ถ้าดึงเข้าหาตัวคือ ปิด



รูปที่ 3.5 (ก) แสดงภาพ Butterfly valve ในตำแหน่ง open
(ข) แสดงภาพ speedy valve

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- พิรานิเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 - เพนนิงเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก 10^{-3} – 10^{-6} ทอร์ การป้อนอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุดและใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำ
16. การป้อนอาร์กอนแล้วสูบลอกจำนวน 3 ครั้ง เรียก กระบวนการนี้ว่า การฟลัชอาร์กอน มีขั้นตอนดังนี้
- เปิดวาล์วที่หัวถังอาร์กอน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดวาล์วรูเข็ม (needle valve) ปิดวาล์วผีเสื้อ และเปิดสปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิดสปีดวาล์ว เปิดวาล์วผีเสื้อ ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบลอกครั้งที่ 1)
 - ปิดวาล์วผีเสื้อ และเปิดสปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิดสปีดวาล์ว และเปิดวาล์วผีเสื้อ ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบลอกครั้งที่ 2)
 - ปิดวาล์วผีเสื้อ และเปิดสปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิดสปีดวาล์ว และเปิดวาล์วผีเสื้อ ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบลอกครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 (ก) แสดงภาพ Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ
(ข) แสดงภาพ power supply

17. เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-5} ทอร์
18. เปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
19. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม cut on เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)
20. ในเบื้องต้นหมุนปุ่มเพิ่มกระแสไปก่อน เมื่อเพิ่มไปถึงปริมาณหนึ่ง เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะสลับไปสู่โหมดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเองอัตโนมัติ ซึ่งจะสังเกตได้ถึงแม้ว่าจะหมุนเพิ่มกระแสเข้าไปแต่จะไม่มีกระแสเพิ่มขึ้น นั่นคือเครื่องสลับเข้าสู่โหมดต้องการเพิ่มแรงดัน จึงต้องเปลี่ยนไปหมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแทน



รูปที่ 3.7 (ก) แสดงภาพสวิตซ์ของ power supply
(ข) แสดงภาพปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

21. หลังจากมาใช้ปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้วให้หมุนเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆช้าจนกระทั่งพลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสถานะยังไม่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป่ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผมให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมามีพลังงานและสถานะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงภาพพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

22. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 2.0 ,4.0 ,6.0 ,8.0 และ10.0 sccm
23. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปให้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่า สปีดเตอริงยิลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกบนฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



รูปที่ 3.9 (ก) แสดงภาพวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด
(ข) แสดงภาพท่อก๊าซ Ar และท่อหล่อเย็นสำหรับ target

24. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการสปีดเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาดเรียกขั้นตอนนี้ว่าการเตรียมตัวสปีดเตอริง (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่าง เช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆดังนี้



แรงดันไฟฟ้า : 350 โวลต์

กระแส : 0.06 แอมป์

ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ : 3×10^{-4}

ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร

เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 1 ชั่วโมง

รูปที่ 3.10 แสดงภาพการเริ่มเคลือบฟิล์ม

25. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชุดเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสีเขียวเล็กๆทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิทช์สีดำ
26. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปิตวาล์วตามด้วยเรกูเลเตอร์วาล์ว และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
27. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ดึงคันโยกเข้าตัว)
28. โยกสวิทช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
29. ปิดสวิทช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
30. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิทช์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตทางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ลดน็อตทางปลาออกก่อน เกลียน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนปล่อยลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะตั้งออกมาเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30. เปิดฝาหน้าออกนำตัวอย่างที่เคยลบเส็ดแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ(ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

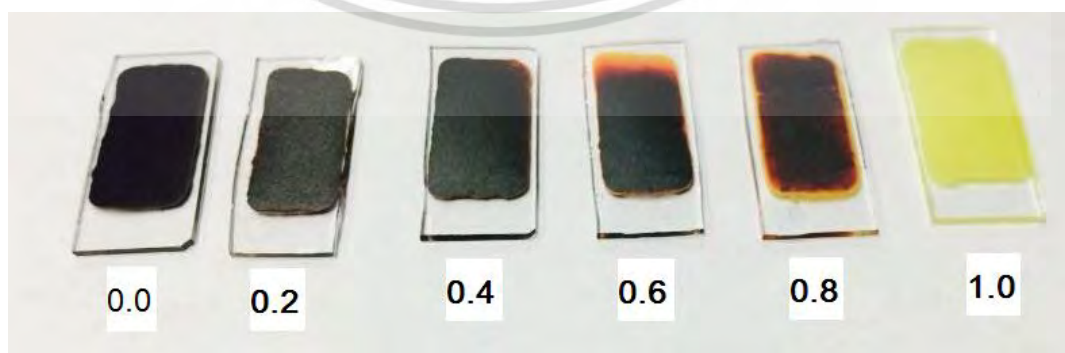
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่ความดันต่ำระดับ 3.5×10^{-2} มิลลิบาร์ เมื่อค่า $x = 0.0$ จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 580 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที แต่เมื่อค่า $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 780 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที และนำฟิล์มบางที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว

4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ $x = 0.0$ ฟิล์มมีลักษณะเป็นสีดำ มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุน ซึ่งลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 580 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิดตั้งแต่ 5 นาที ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีดำ มีขอบสีส้มเหลือง มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดี ไม่มีรูพรุนแต่จะหลุดร่อนได้ถ้าทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 780 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที จะแสดงดังรูป ที่ 4.1

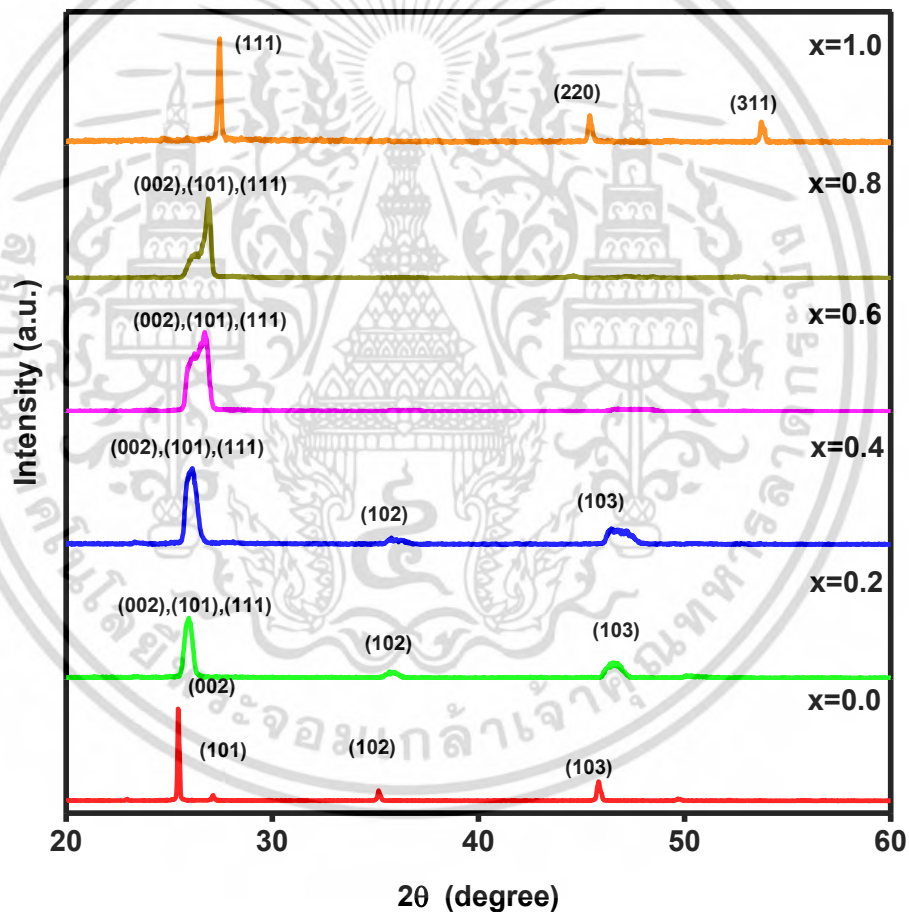


รูปที่ 4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ 1.0 ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีเหลือง ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ดี ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 780 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 680 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที จะแสดงดังรูปที่ 4.1

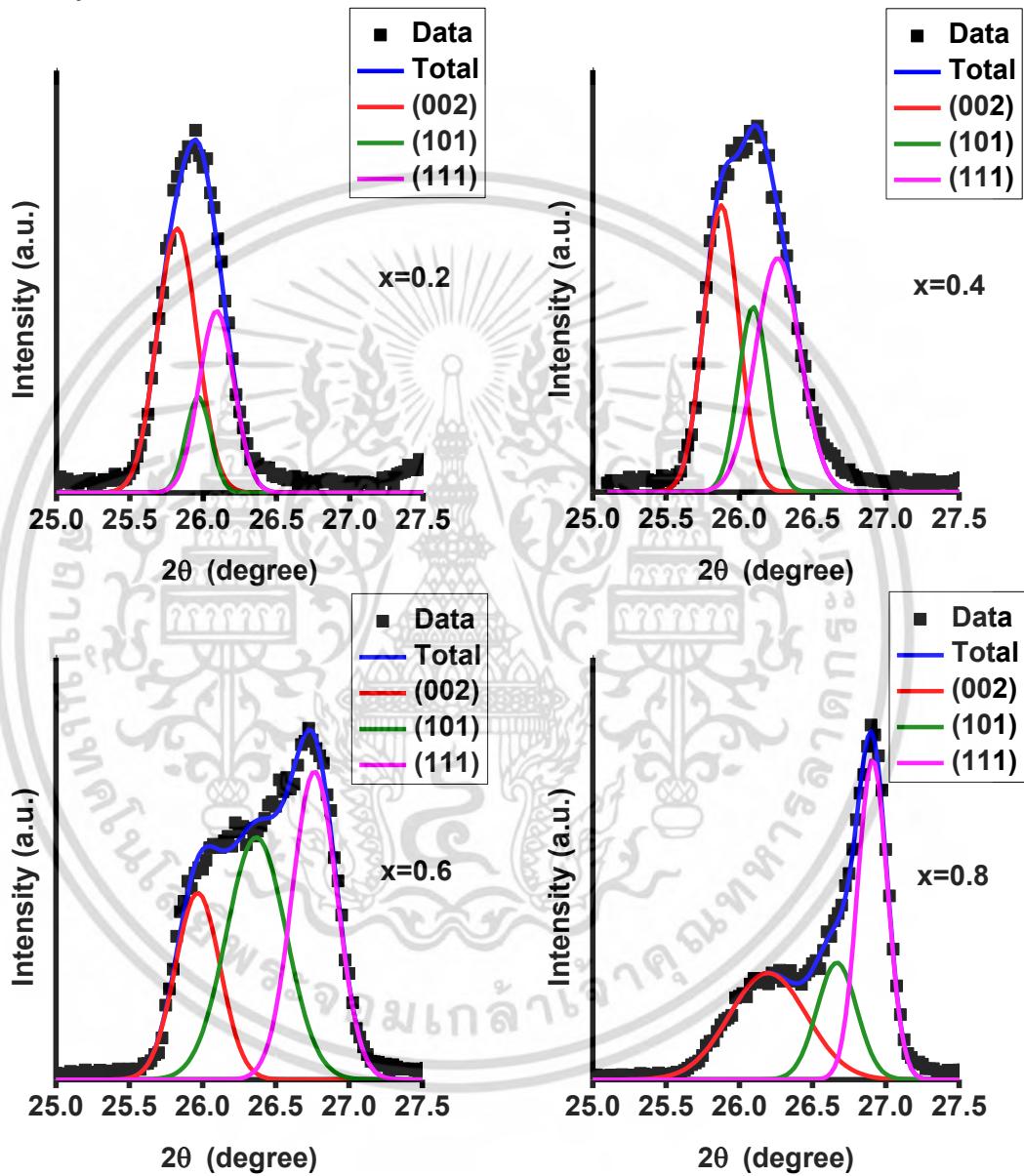
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.2 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ลักษณะโครงสร้างผลึกจากการศึกษาด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn น้อยกว่า 0.2 ($x < 0.2$) ไม่ว่าจะฉีกดูทีละชิ้น ออกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัล โดยมีระนาบ (002) ที่โดดเด่น แต่เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn อยู่ในช่วง $0.2 \leq x \leq 0.8$ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบเฮกซะโกนัลและคิวบิกอยู่ร่วมกัน กล่าวคือ มีทั้งระบบ (002) และ (101) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก เกิดขึ้นร่วมกัน และเมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn สูงกว่า 0.8 ($x > 0.8$) จะโครงสร้างแบบคิวบิก โดยมีระนาบ (111) ที่โดดเด่น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แสดงการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

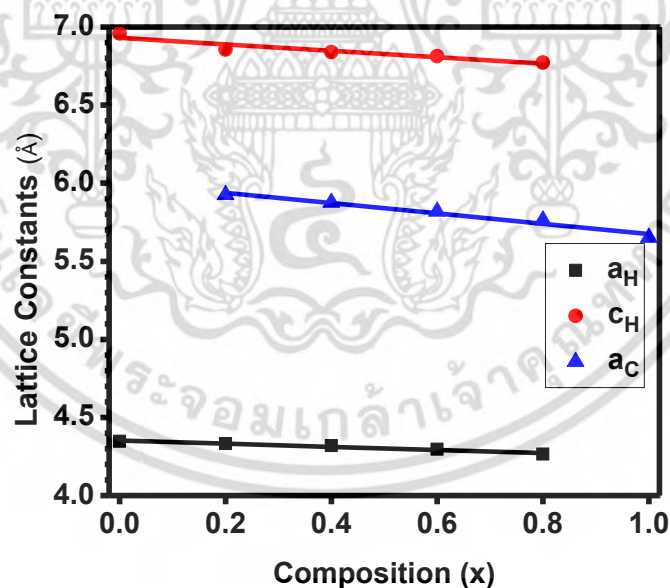
จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn อยู่ในช่วง $0.2 \leq x \leq 0.8$ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบเฮกซะโกนัลและคิวบิกอยู่ร่วมกัน กล่าวคือ มีทั้งระบบ (002) และ (101) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก เกิดขึ้นร่วมกัน และเมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn สูงกว่า 0.8 ($x > 0.8$) จะโครงสร้างแบบคิวบิก โดยมีระนาบ (111) ที่โดดเด่น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

เฮกซะโกนัลและคิวบิกอยู่ร่วมกัน ดังนั้นจึงได้ทำการแยกพีคของระนาบต่างๆที่ซ้อนทับกันอยู่โดยใช้ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian functions) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการใช้เลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพราะพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีรูปร่างลักษณะเป็นรูปแบบระฆังคว่ำที่จะตรงกับฟังก์ชันเกาส์เซียน และดำเนินการโดยใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB)

ผลจากการแยกพีคพบว่า มีพีคที่ซ้อนทับกันอยู่ถึง 3 พีค เปรียบได้กับระนาบ (002) และ (101) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ซึ่งเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn มากขึ้น จะทำให้มุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) ทำได้โดยการคำนวณหาขนาดของเกรน (Grain Size) และนำไปเปรียบเทียบกับขนาดของเกรนที่ได้จากการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งในหัวข้อถัดไป โดยที่ขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากจากความสัมพันธ์ของเชอร์เรอร์ (Scherrer)

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

ขนาดของเกรนที่สามารถคำนวณได้ แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึกกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 สามารถที่จะนำมาหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก (Lattice Constants) ของทั้งโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและแบบคิวบิก จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่โครงสร้างผลึกกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ได้ดังนี้ อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบแม่แบบ (CdSe หรือ ZnSe) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิงต่างๆ ซึ่งสิ่งนี้เองที่จำเป็นต้องมีการนำค่าเหล่านี้ไปใช้

$$\text{แบบเฮกซะโกนัล} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.2)$$

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

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเฮกซะโกนัล (a_H, a_H) และของคิวบิก (a_C) จะแสดงดังนี้

$$a_H = \frac{a_C}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

$$c_H = \frac{2a_C}{\sqrt{3}} \quad (4.5)$$

จากการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกโดยอาศัยสมการที่ 4.2 พบว่า 4.3 เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเป็นไปตามกฎของ Vegard ทั้งโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลและแบบคิวบิก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1

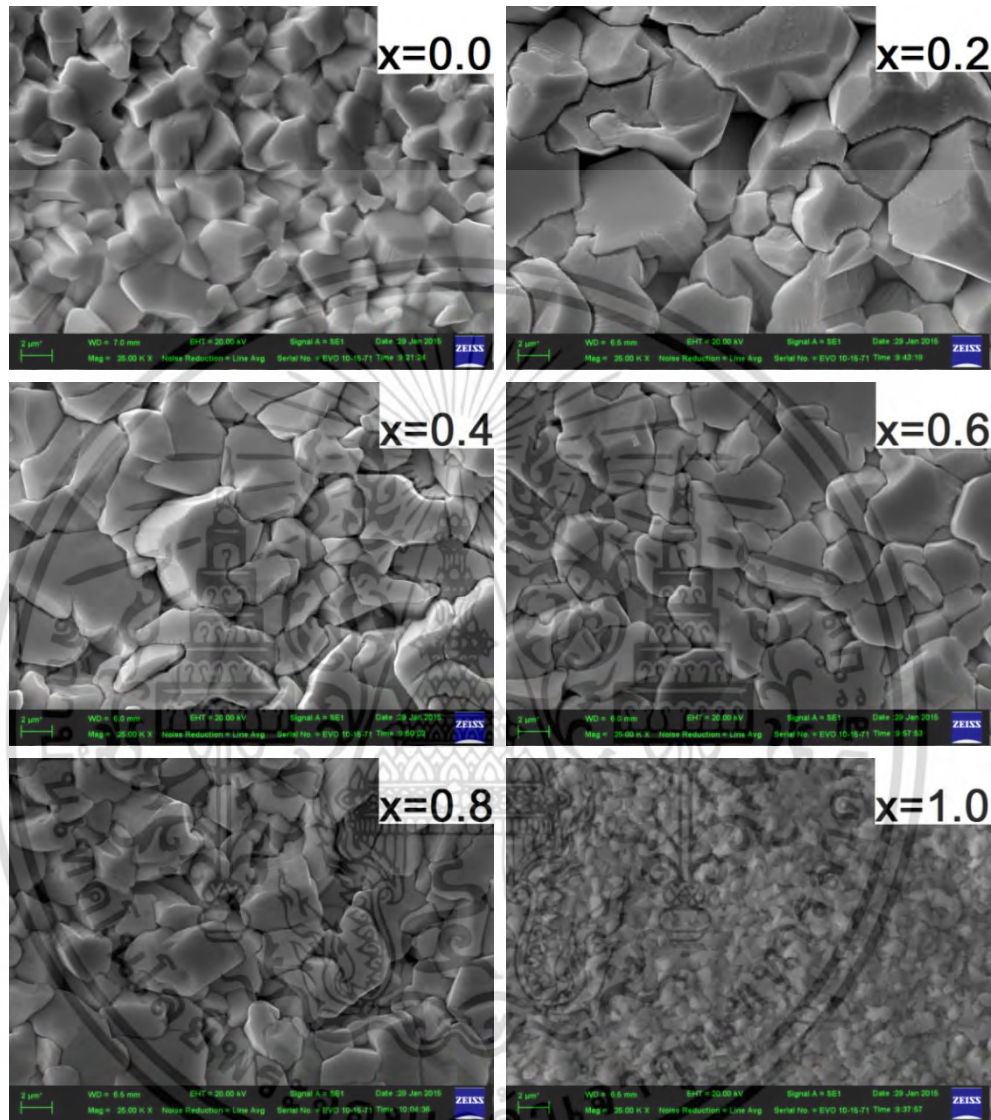
ตารางที่ 4.1 แสดงระนาบ มุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Phase	(hkl)	2θ (deg)	Lattice Parameters (nm)				Grain Size (Scherrer) (nm)
				Hexagonal			Cubic	
				a_H	c_H	$\frac{c_H}{a_H}$	a_C	
0.0	H	(002)	25.425	0.4347	0.6959	1.60	-	205
		(101)	27.125					-
0.2	H	(002)	25.825	0.4332	0.6855	1.58	-	450
		(101)	25.975					-
0.4	H	(002)	25.875	0.4319	0.6839	1.58	-	320
		(101)	26.100					-
0.6	H	(002)	26.050	0.4297	0.6814	1.59	-	250
		(101)	26.375					-
0.8	H	(002)	26.200	0.4265	0.6773	1.59	-	210
		(101)	26.675					-
1.0	C	(111)	27.450	-	-	-	0.5651	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดูแลของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

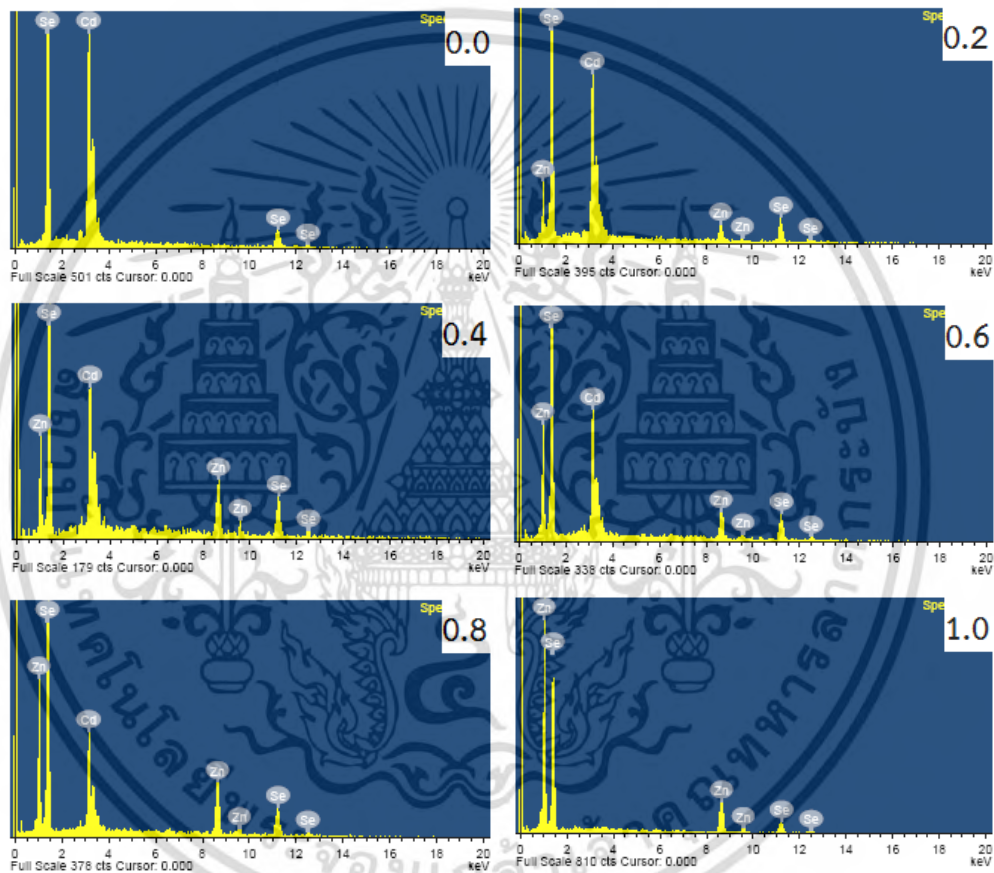
จากรูปที่ 4.5 พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ($x=0.0$) มีขนาดเกรนประมาณ 1.2 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่าขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ($x=1.0$) ที่มีขนาดเกรนประมาณ 0.3 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) มีขนาดของเกรนใหญ่กว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe และ ZnSe มีความพรุนน้อยลงเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เพิ่มมากขึ้น และขนาดของเกรนมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้

จากพิจารณาแล้วเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่บริเวณชั้นผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

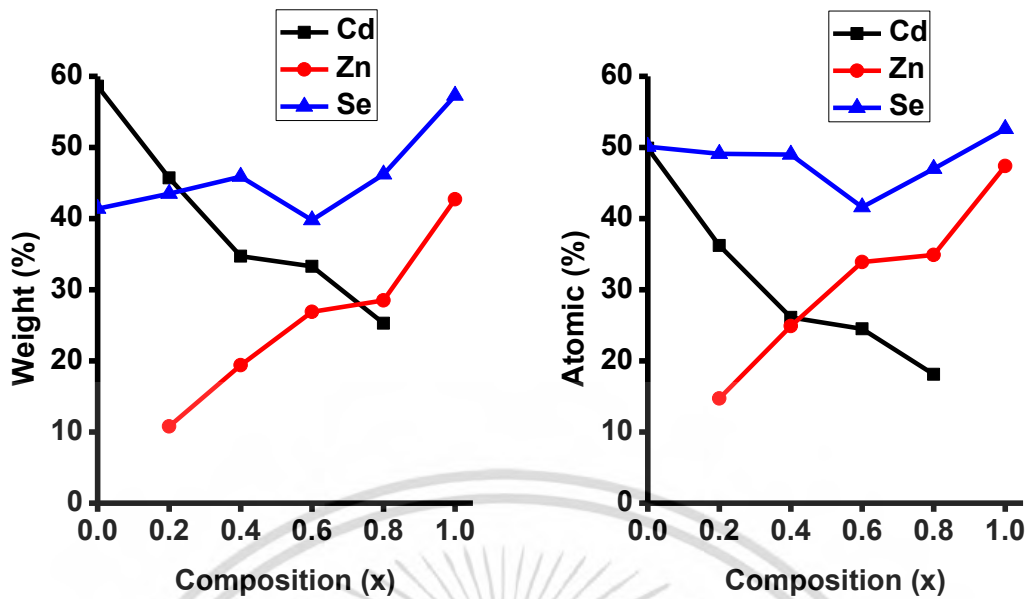
การศึกษากการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสูงพีคที่ตรงกับธาตุ Zn จะมีค่าสูงขึ้น แต่ความสูงของพีคที่ตรงกับธาตุ Cd จะมีค่าลดลง แสดงว่าปริมาณของธาตุมี Zn ที่อยู่ในฟิล์มบางมีมากขึ้น ซึ่งช่วยยืนยันได้ถึงการเข้าแทนที่ธาตุ Cd ด้วยธาตุ Zn ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Cd, Zn และ Se ที่อยู่ในรูปแบบของน้ำหนักและจำนวนอะตอม แสดงดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเปอร์เซ็นต์ของธาตุ Cd, Zn และ Se กับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

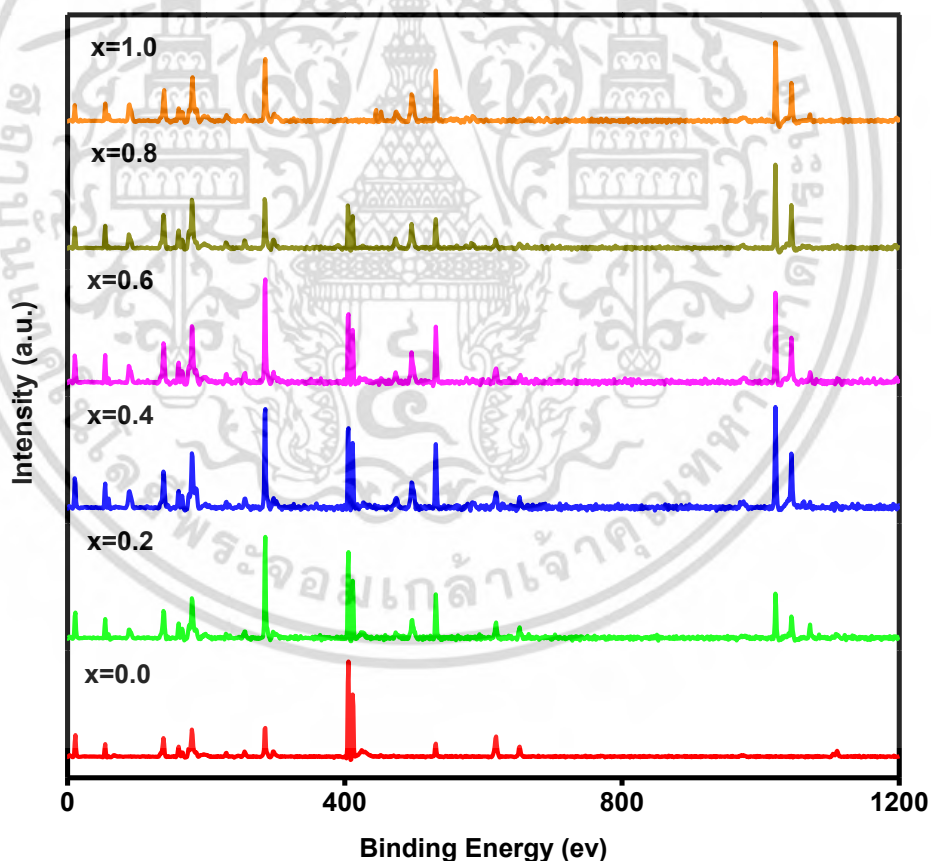
Composition (x)	EDS analysis					
	Weight			Atomic		
	Cd (%)	Zn (%)	Se (%)	Cd (%)	Zn (%)	Se (%)
0.0	58.6	-	41.4	49.9	-	50.1
0.2	45.7	10.8	43.5	36.2	14.7	49.1
0.4	34.7	19.4	45.9	26.1	24.9	49.0
0.6	33.3	26.9	39.8	24.5	33.9	41.6
0.8	25.3	28.5	46.2	18.1	34.9	47.0
1.0	-	42.7	57.3	-	47.4	52.6

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2 พบว่า จำนวนเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Se ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่ควรจะมีจำนวนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เพราะอะตอมของ Cd และ Zn จะจับกับอะตอมของ Se แบบ 1 ต่อ 1 แต่จากผลการวิเคราะห์ที่ได้มีไม่ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ บ่งบอกถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขาดหายไปของอะตอมธาตุ Se (Selenium Vacancy) จึงทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็น n-type

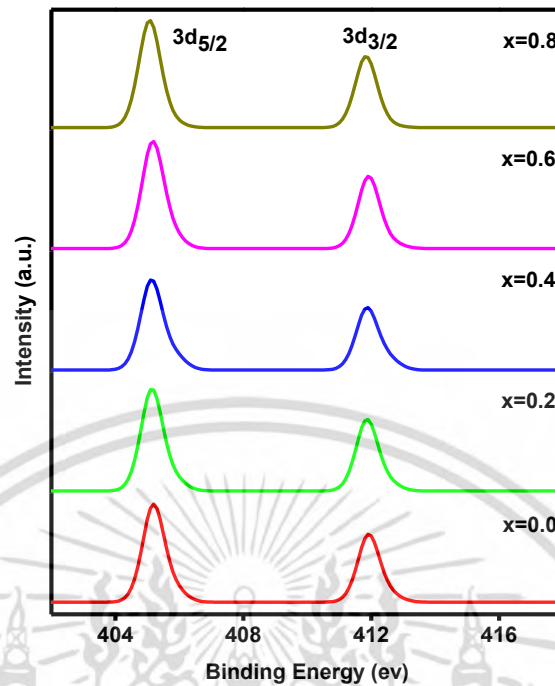
4.5 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

การศึกษากการวัดจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน เป็นอีกวิธีที่ใช้วิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยจะใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) เพื่อเป็นการระบุชนิดของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบาง

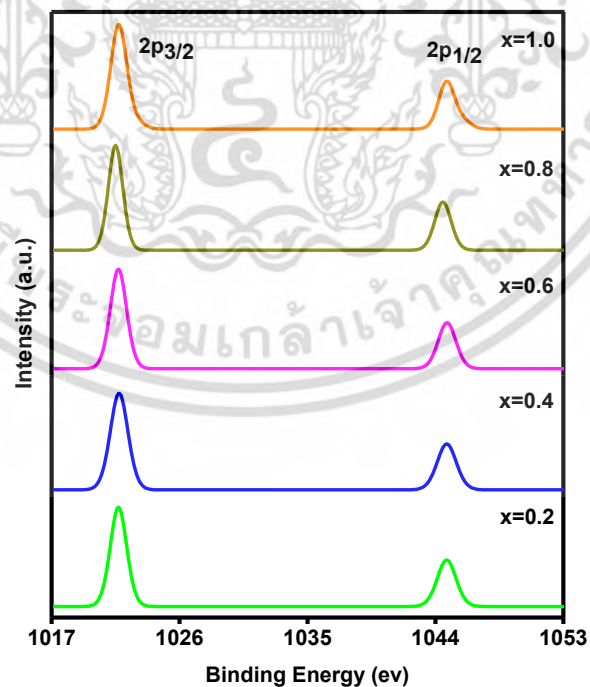


รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

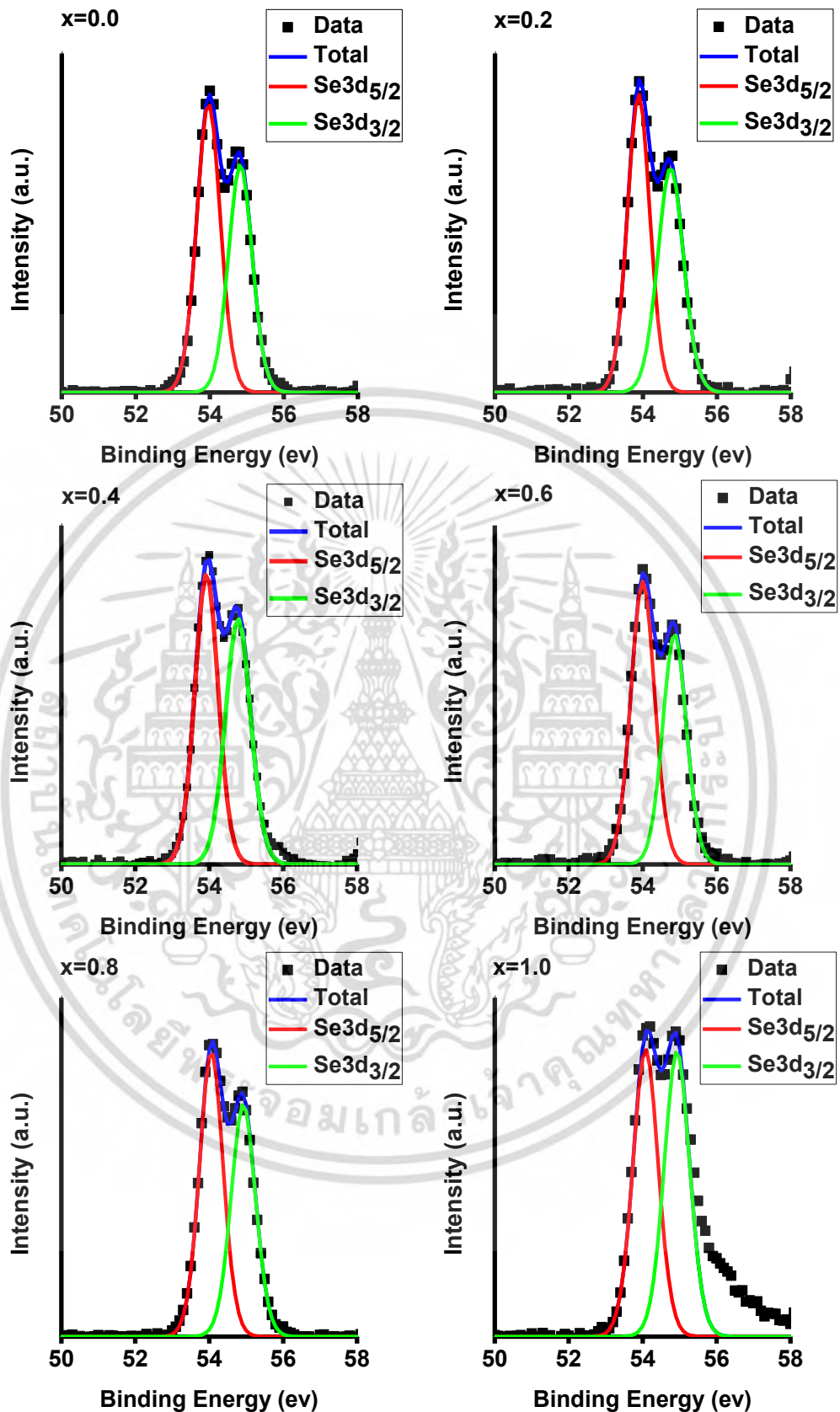


รูปที่ 4.9 สเปกตรัม XPS ในช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe (0.0 ≤ x ≤ 0.8) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.10 สเปกตรัม XPS ในช่วง 1017-1053 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe (0.2 ≤ x ≤ 1.0) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้ ทั้งนี้หากมีข้อผิดพลาดประการใด ทางมหาวิทยาลัยขออภัยเป็นอย่างสูง



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 50-58 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

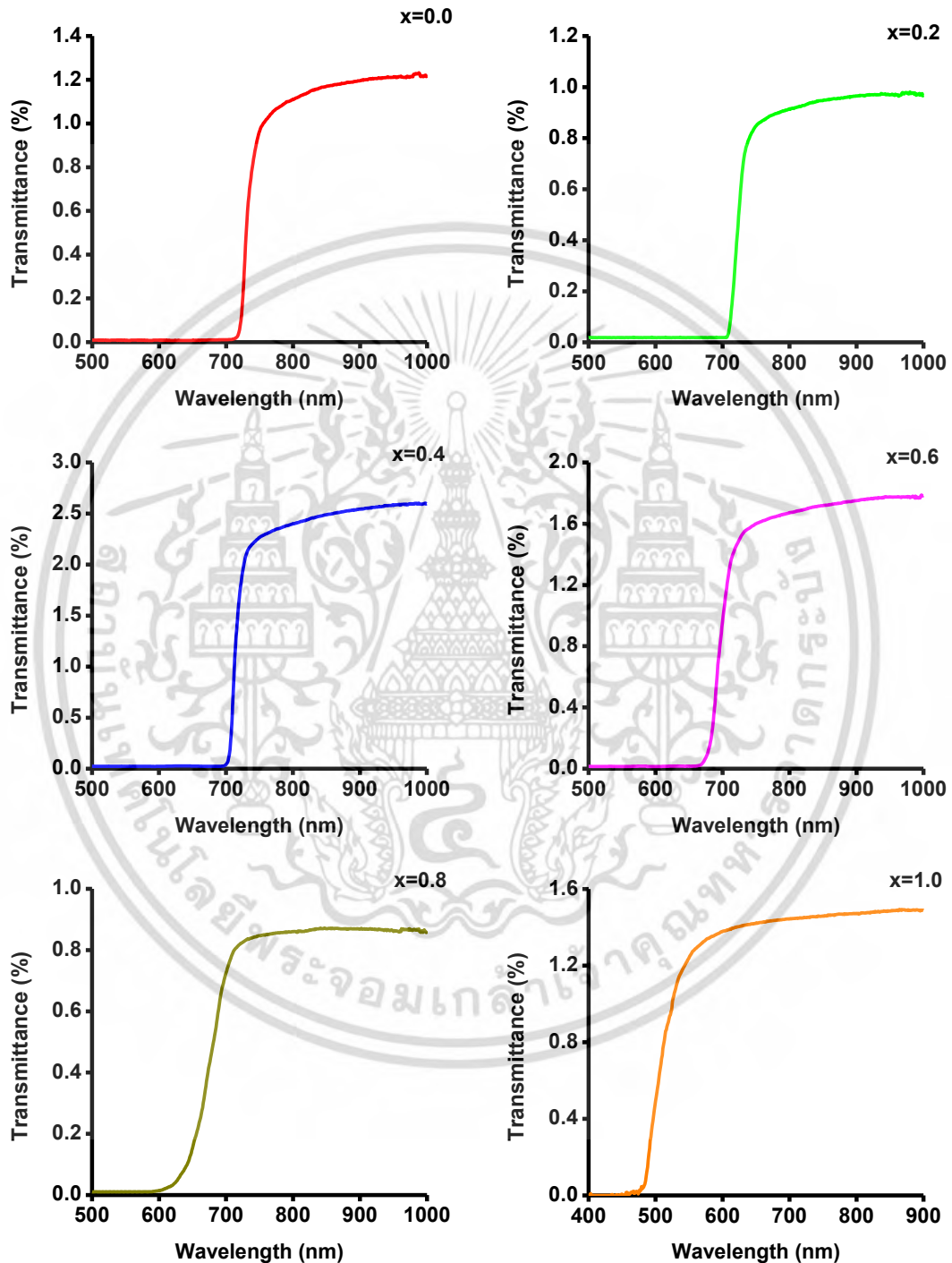
จากผลการตรวจสอบพบธาตุ Cd คือ $Cd3d_{5/2}$ และ $Cd3d_{3/2}$ ที่พลังงาน 405.1-405.2 eV และ 411.8-411.9 eV (รูปที่ 4.9) ตามลำดับ ธาตุ Zn คือ $Zn3p_{3/2}$ และ $Zn3p_{1/2}$ ที่พลังงาน 1021.5-1021.7 eV และ 1044.5-1044.8 eV (รูปที่ 4.10) ตามลำดับ ธาตุ Se คือ $Se3d_{5/2}$ และ $Se3d_{3/2}$ ที่พลังงาน 53.9-54.1 eV และ 54.7-54.9 eV (รูปที่ 4.11) ตามลำดับ แสดงยังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Binding Energy (eV)					
	Cd		Zn		Se	
	$3d_{5/2}$	$3d_{3/2}$	$2p_{3/2}$	$2p_{1/2}$	$3d_{5/2}$	$3d_{3/2}$
0.0	405.2	411.9	-	-	54.0	54.8
0.2	405.1	411.9	1021.7	1044.8	53.9	54.7
0.4	405.1	411.9	1021.7	1044.8	53.9	54.8
0.6	405.2	411.9	1021.7	1044.8	54.0	54.9
0.8	405.1	411.8	1021.5	1044.5	54.1	54.9
1.0	-	-	1021.7	1044.8	54.1	54.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี

5 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากรูปที่ 4.12 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่า เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทางด้านที่ความยาวคลื่นที่น้อยลง และหลังจากนั้นได้ทำการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ได้จากความสัมพันธ์

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (4.6)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (4.7)$$

ในการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานให้เขียนกราฟระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv แล้วลากเส้นตรงให้ตัดกับแนวแกนพลังงาน ดังที่แสดงยังรูปที่ 4.13 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มมากขึ้น

จากความสัมพันธ์

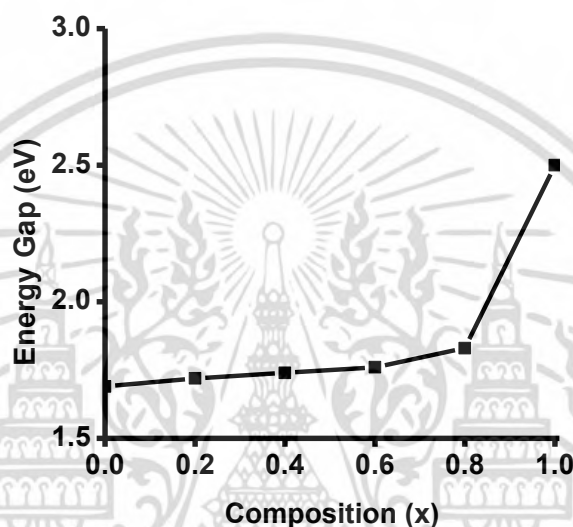
$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{hv}{E_0}\right)$$

$$\ln \alpha = \left(\frac{1}{E_0}\right) hv + \ln \alpha_0 \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_0 คือ ความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงาน
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

จากค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้น ยังช่วยยืนยันได้ถึงการเพิ่มมากขึ้นของอะตอมของธาตุ Zn กล่าวคือการเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุ Cd โดยอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปและค่าส่วนหางของแถบพลังงาน แสดงยังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.4



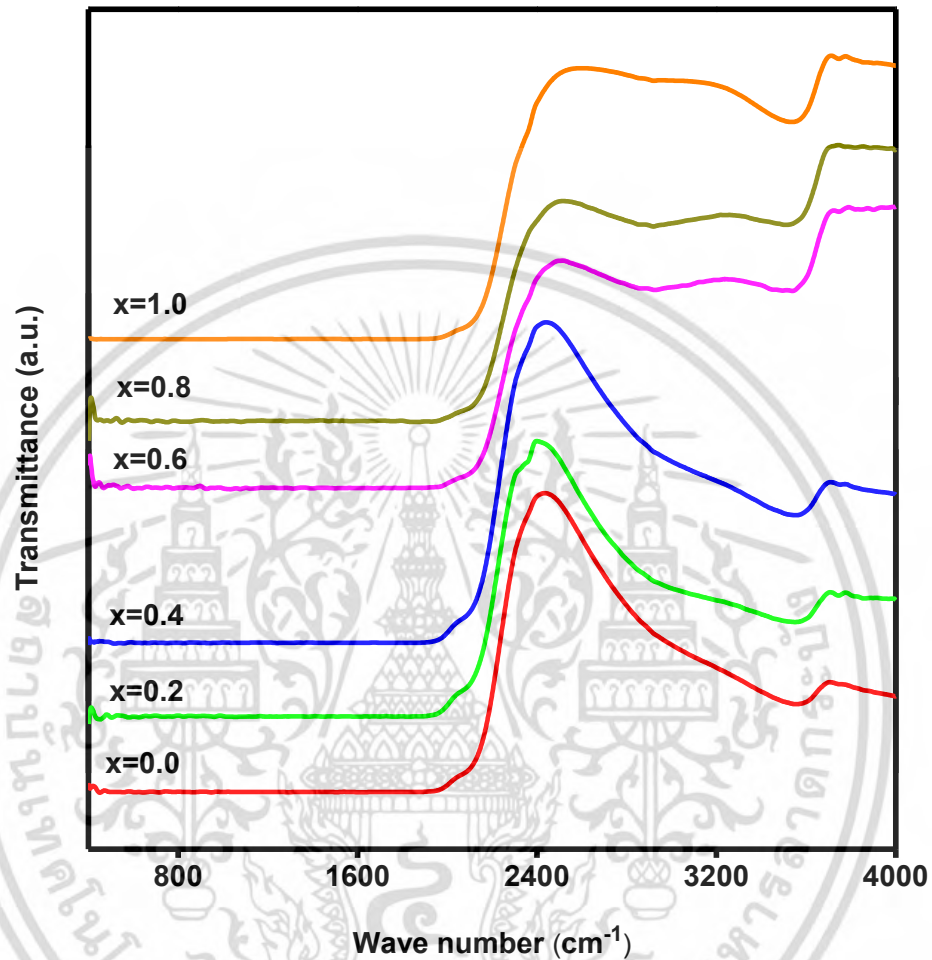
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

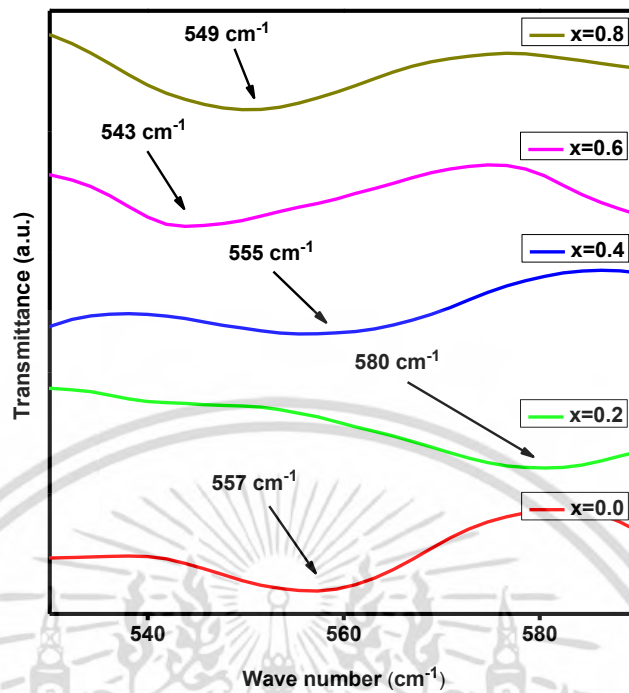
Composition (x)	Energy Gap (eV)
0.0	1.68
0.2	1.71
0.4	1.73
0.6	1.75
0.8	1.76
1.0	2.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

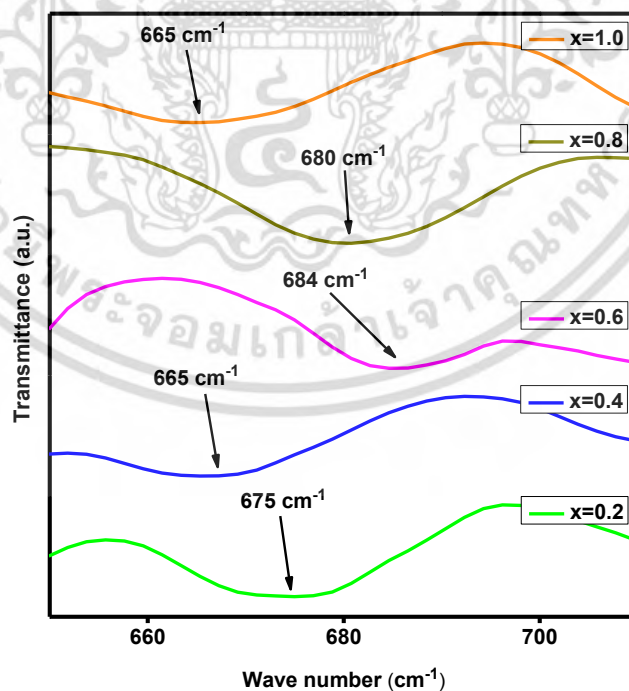
4.7 ผลการศึกษาฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 530-590 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 650-710 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

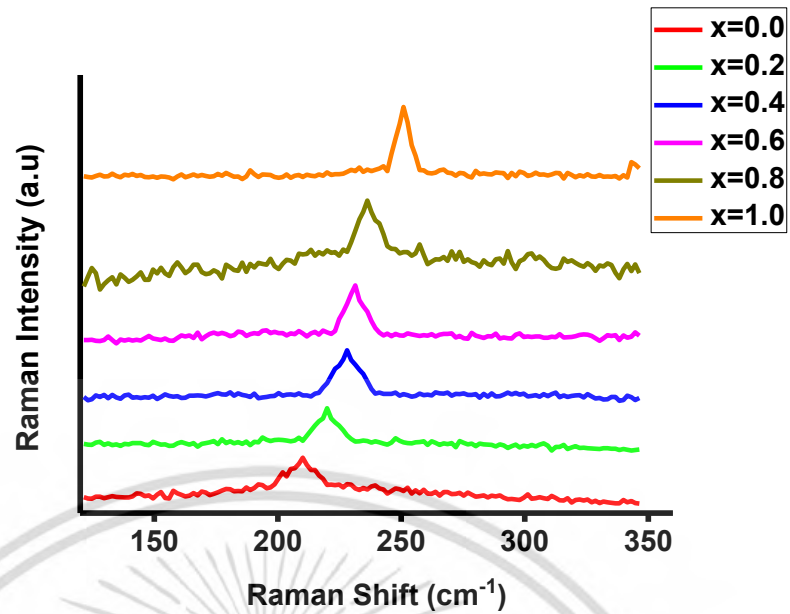
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

จากรูปที่ 4.15-4.17 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ สามารถอธิบายได้โดยการที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบเท่านั้น จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ เลขคลื่นในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ปรากฏแถบการสั่นแบบยืด-หด (stretching mode) ของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Cd-Se ที่ค่าเลขคลื่น 543- 580 ต่อเซนติเมตร และแถบการสั่นแบบยืด-หดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Zn-Se ที่ค่าเลขคลื่น 665-684 ต่อเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบการสั่นแบบยืด-หดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ C-C, C-H และ O-H แสดงยังตารางที่ 4.5

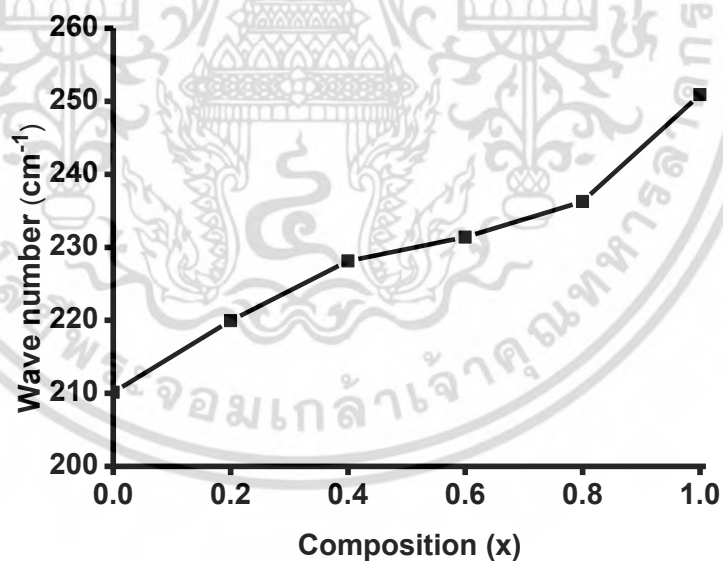
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Wave number (cm ⁻¹)					
	Cd-Se stretching mode	Zn-Se stretching mode	C-C stretching mode	C-H stretching mode		O-H stretching mode
0.0	557	-	2088	1951	2861	3554
0.2	580	675	2092	1953	2854	3552
0.4	555	665	2080	1959	2858	3554
0.6	543	684	2092	1963	2863	3538
0.8	549	680	2080	1928	2858	3506
1.0	-	665	2080	1963	2850	3533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



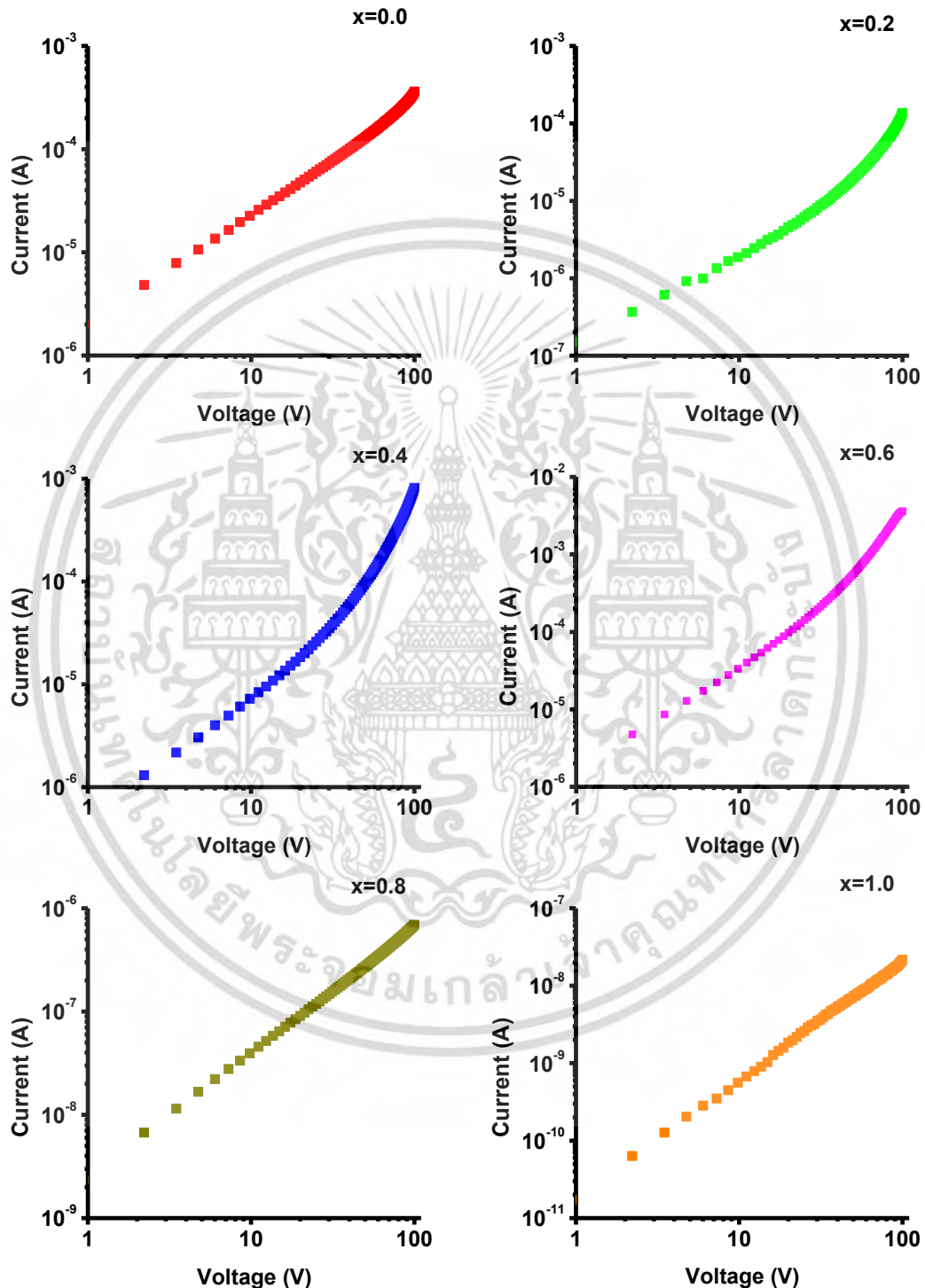
รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัม Raman ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

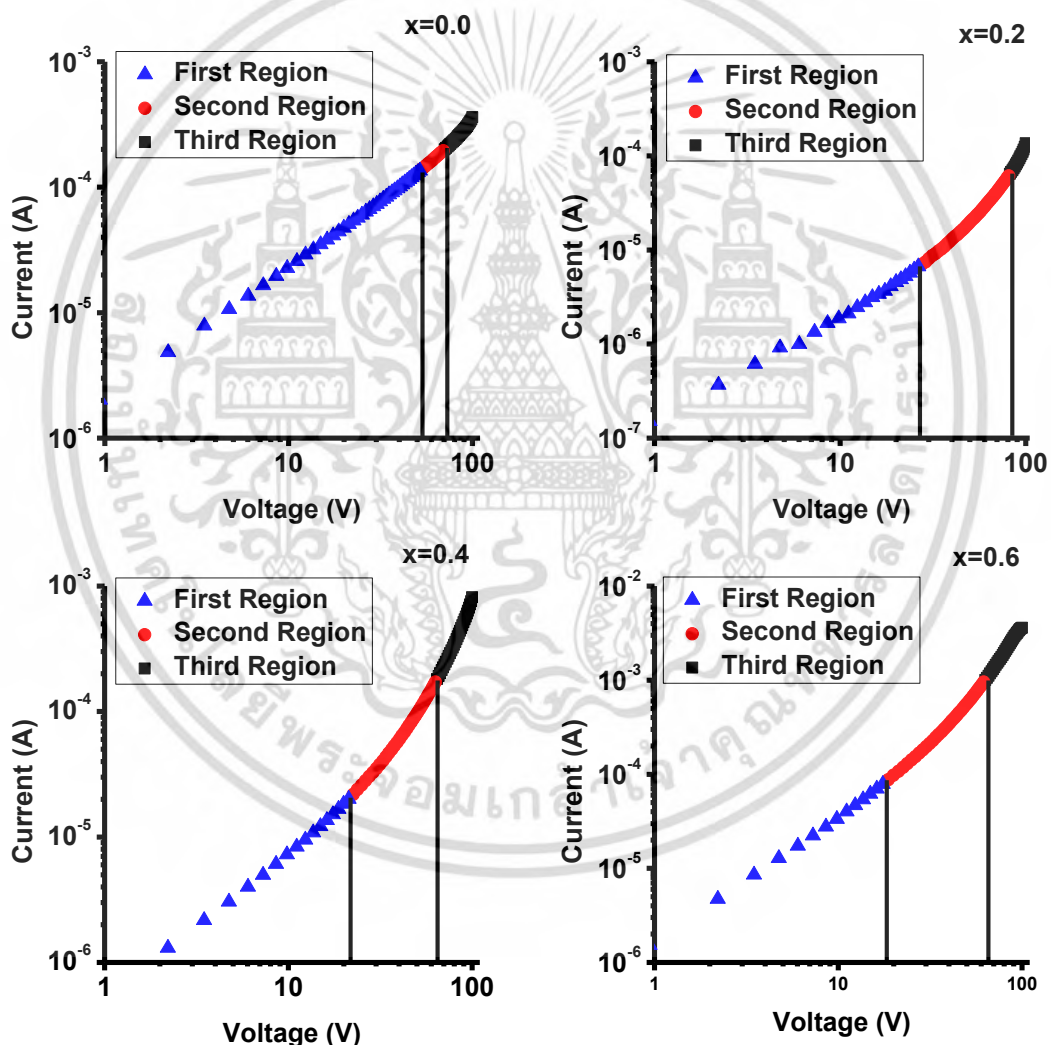


รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ในรูปที่ 4.20 พบว่าที่ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn(x) เท่ากับ 0.8 ถึง 1.0 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม แต่ที่ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn(x) เท่ากับ 0.0 ถึง 0.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงซึ่งแบ่งลักษณะการนำกระแสที่เป็น 3 แบบ ดังที่แสดงยังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่การนำไฟฟ้าในช่วงที่ 2(สีแดง) ตามรูปที่ 4.21 เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\frac{I}{A} = \left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{\epsilon\mu\theta}{L^3}\right) V^2 \quad (4.9)$$

เมื่อ θ มาจากความสัมพันธ์

$$\theta = \left(\frac{n_0}{n_0 + n_1}\right) = \frac{N_c}{N_t} \exp\left[\frac{-(E_c - E_t)}{kT}\right] \quad (4.10)$$

ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณหาค่า θ ได้จากความสัมพันธ์

$$\theta = \frac{I_1}{I_2} \quad (4.11)$$

เมื่อ I_1 และ I_2 คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องกับ V_{TR} และ V_{TFL} ตามลำดับ และ จากสมการที่ (4.9) จะได้ว่า

$$\ln I = 2\ln V + \ln\left[\left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{\epsilon\mu\theta}{L^3}\right) A\right] \quad (4.12)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่างซึ่งเท่ากับ $(0.8 \times 10^{-2})(1 \times 10^{-6}) = 8.0 \times 10^{-9}$ ตารางเมตร

ดังนั้น ในบริเวณที่ 2 (Region II) ของรูปที่ 4.21 จะมีความชัน เท่ากับ 2 ตามสมการที่ (4.10) ส่วนสภาพคล่องของพาหะ (μ) สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ของสมการที่ (4.10)

ความหนาแน่นของพาหะ (n_0) หาได้จากความสัมพันธ์

$$V_{TR} = \frac{8}{9} \left(\frac{n_0 q L^2}{\epsilon \theta}\right) \quad (4.13)$$

เมื่อทราบค่า n_0 แล้ว ก็สามารถหา n_1 โดยอาศัยสมการที่ (4.10) และความหนาแน่นของกักพาหะ N_t หาได้จากความสัมพันธ์

$$V_{TFL} = \frac{q N_t L^2}{2\epsilon} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณที่ 1 (Region 1) จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเป็นดังนี้ คือ

$$J = \frac{I}{A} = n_0 q \mu_0 \frac{V}{L}$$

$$I = \left(\frac{n_0 q \mu_0 A}{L} \right) V \quad (4.15)$$

ตามกฎของโอห์มจะได้ว่าความชันเท่ากับ 1 นั่นคือ

$$1 = \frac{n_0 q \mu_0 A}{L}$$

$$\mu = \frac{L}{n_0 q A} \quad (4.16)$$

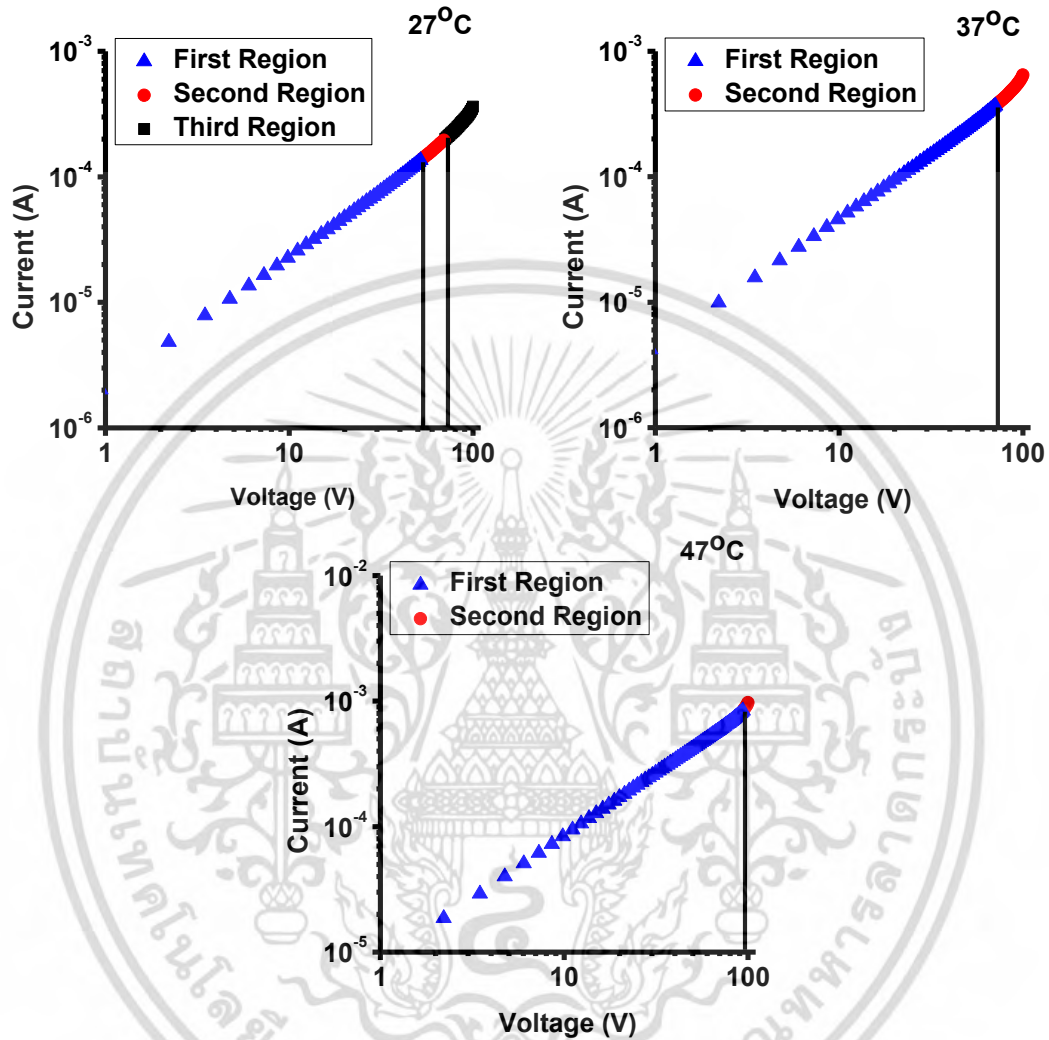
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 4.21 จะแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหยสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	V_{TR} (V)	V_{TFL} (V)	θ	μ ($m^2 V^{-1} s^{-1}$) ($\times 10^{-12}$)	N_t (m^{-3}) ($\times 10^{23}$)	n_0 (m^{-3}) ($\times 10^{21}$)	n_1 (m^{-3}) ($\times 10^{22}$)
0.0	53.0	69.5	0.712	2.07	2.88	78.23	3.16
0.2	27.6	81.0	0.115	2.46	3.36	6.58	5.06
0.4	22.5	63.2	0.128	10.13	2.62	5.98	4.07
0.6	18.7	61.9	0.092	81.33	2.57	3.56	3.52

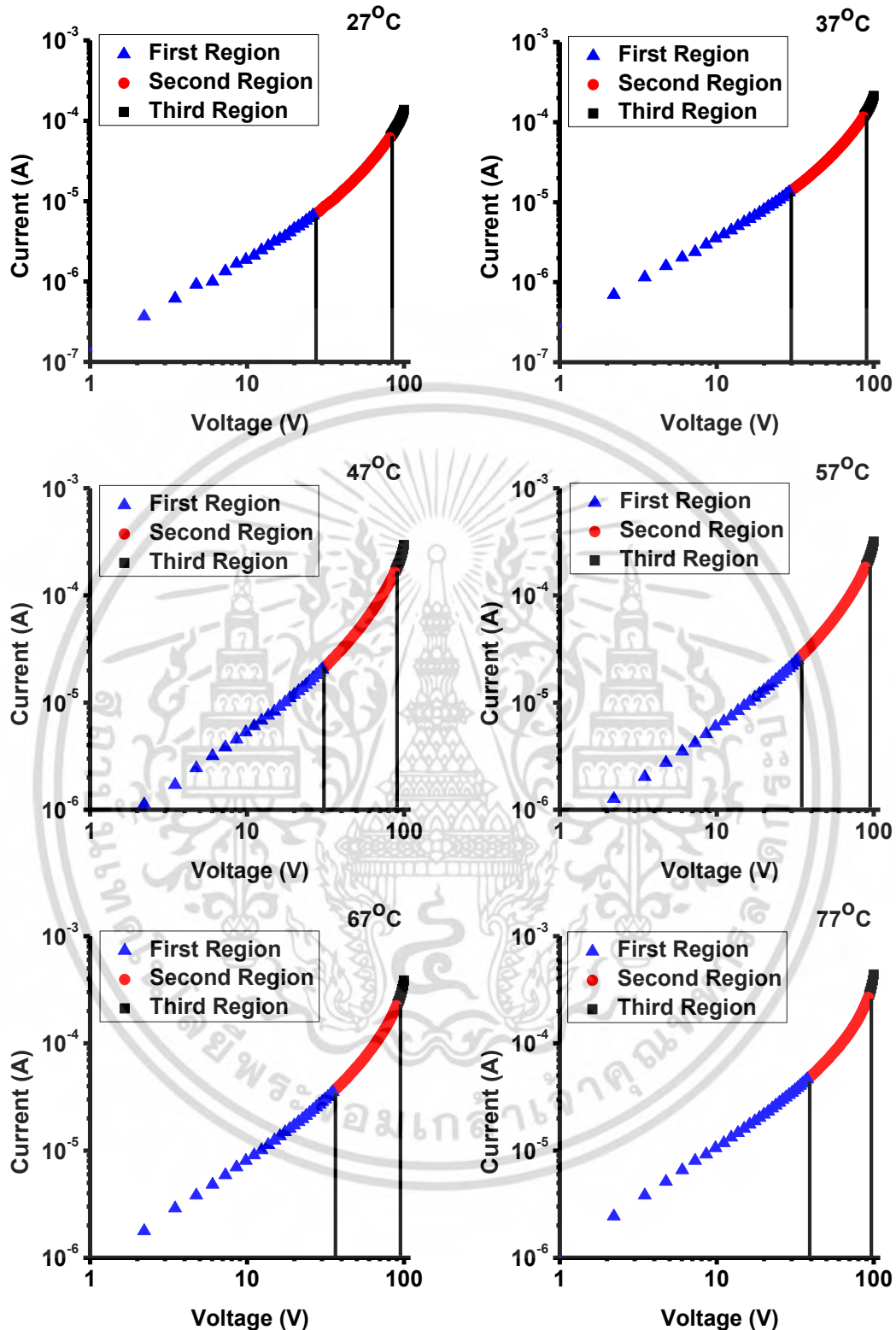
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



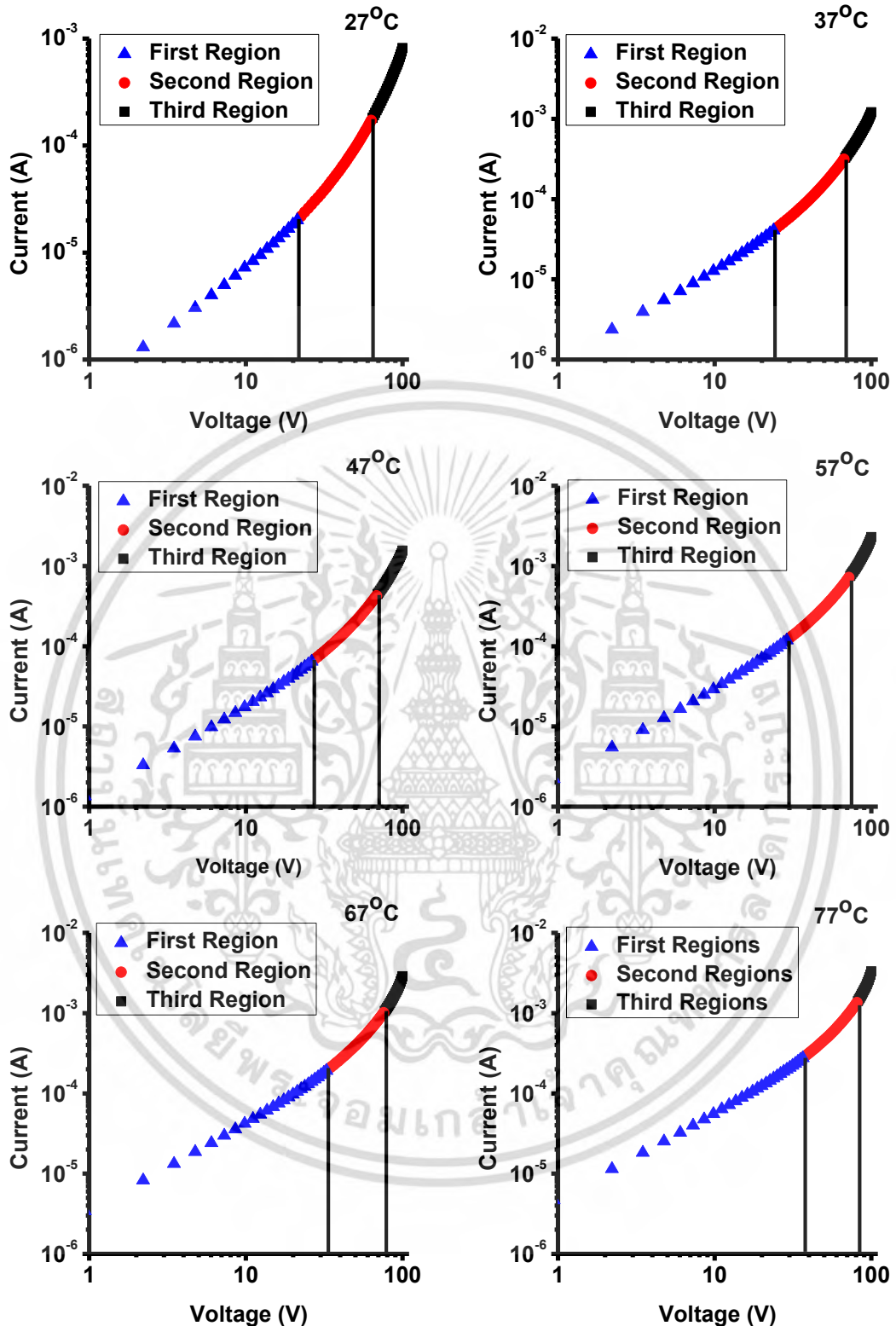
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x=0.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



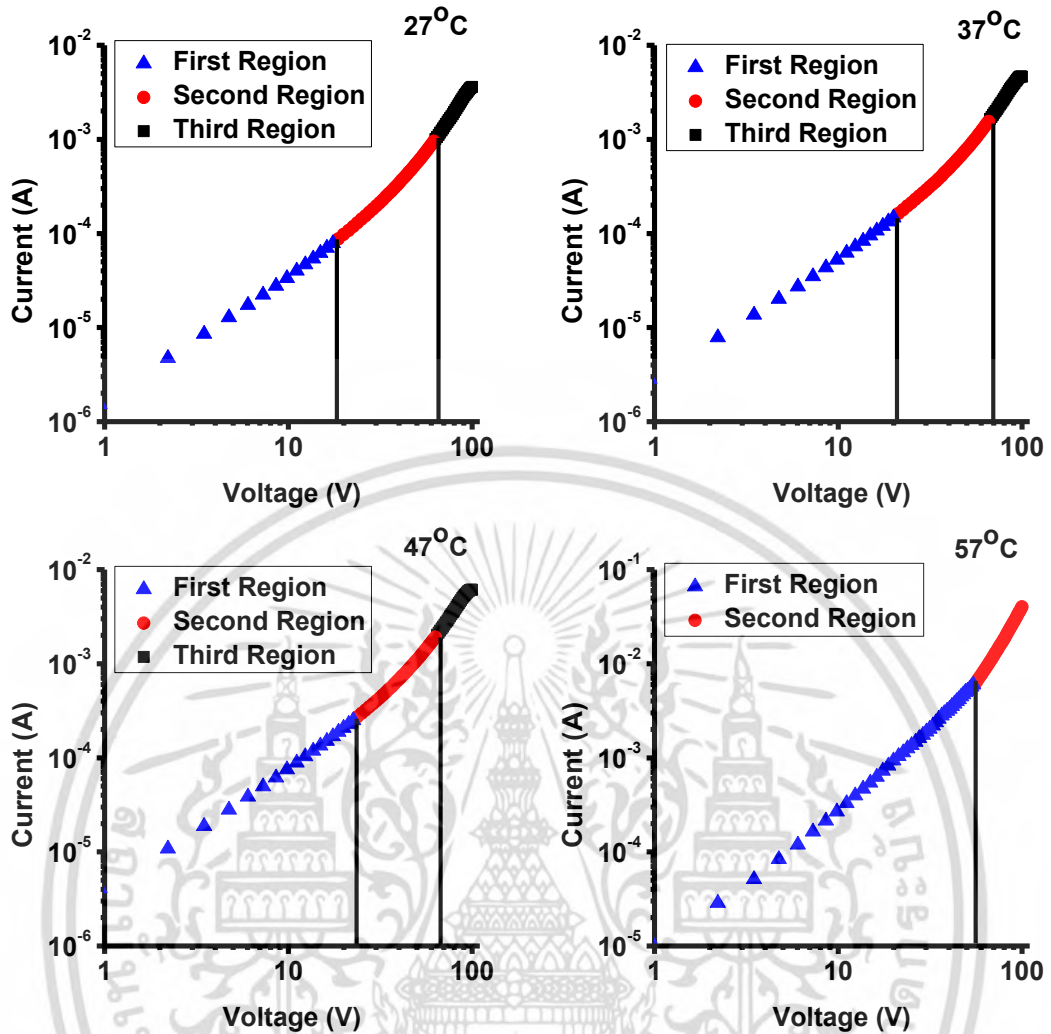
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($x=0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



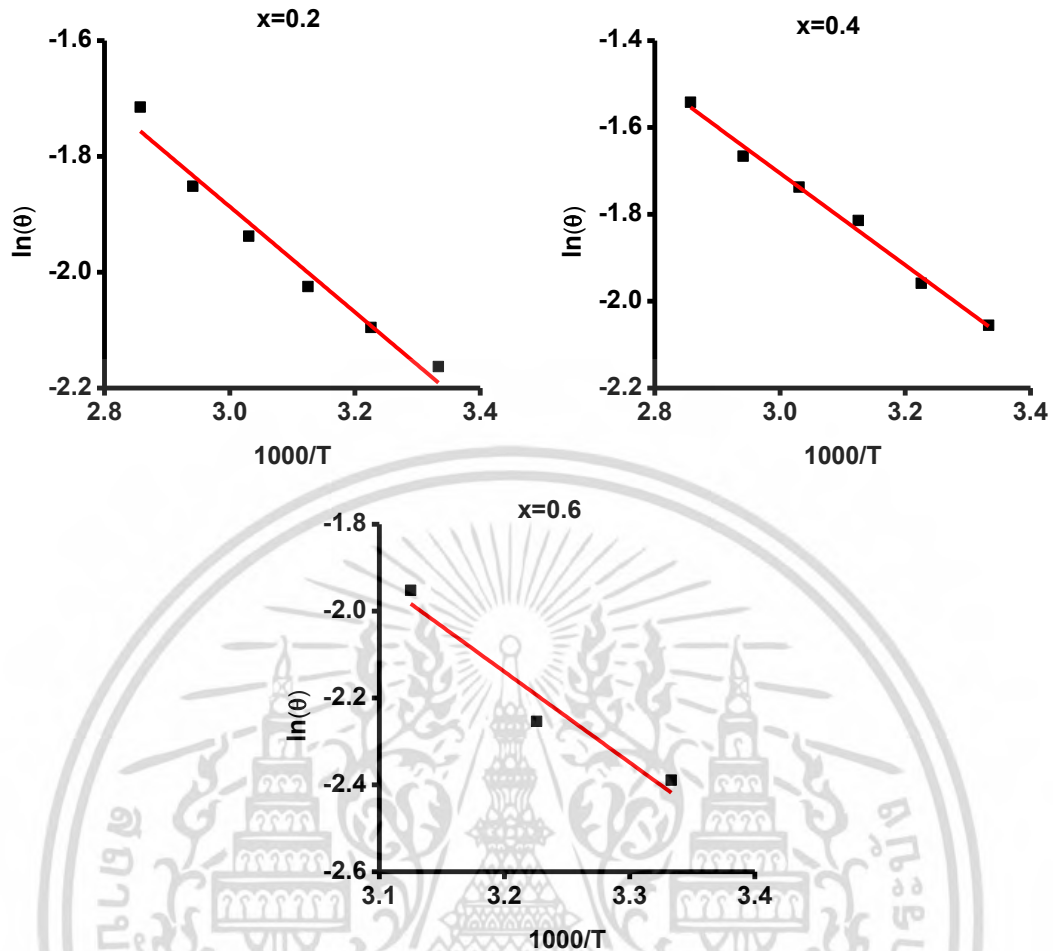
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe (x=0.4) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x=0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากกราฟในรูปที่ 4.22-4.25 สามารถคำนวณหาความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบนำ (E_c) และระดับพลังงานของกัปดักพาหะ (E_t) ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.9 โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $1000/T$ ตามรูปที่ 4.26



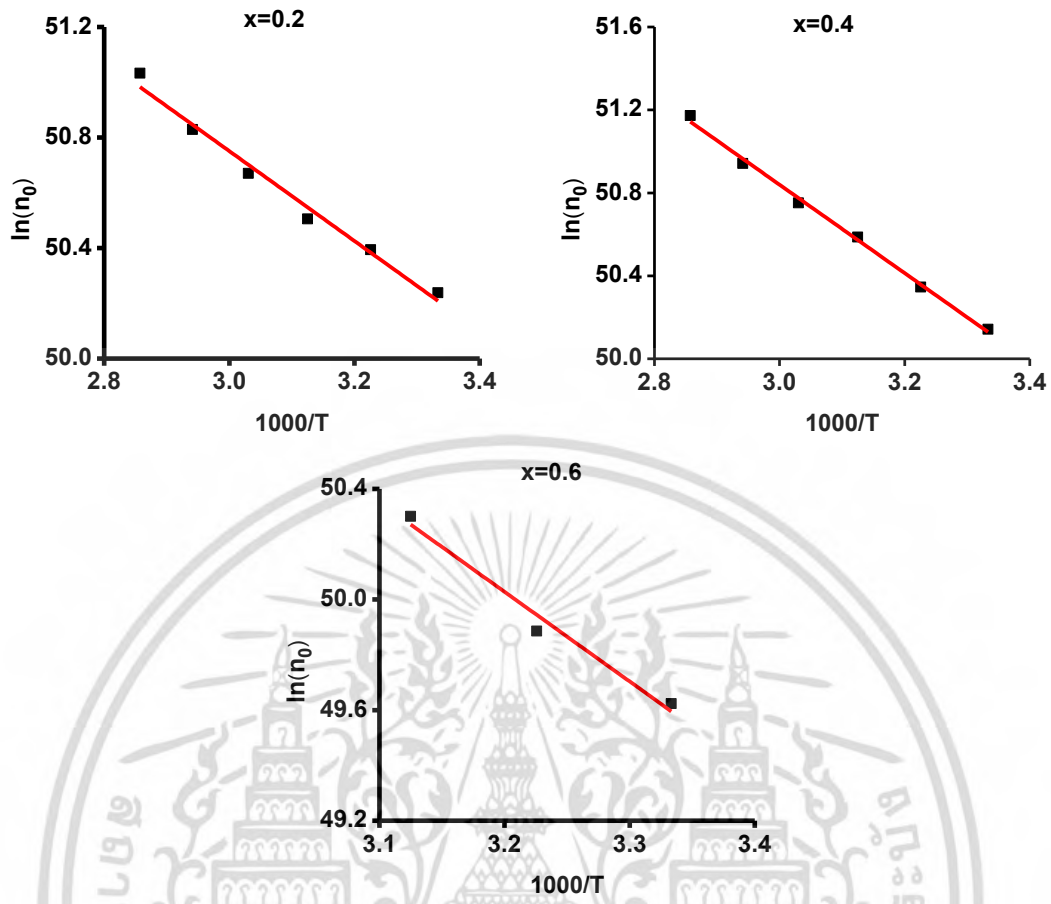
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\theta$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

นอกจากนี้ยังคำนวณหาระดับพลังงานของกักตักพาหะและระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy) (E_F) ได้จากความสัมพันธ์

$$n_0 = N_C \exp\left(\frac{-E_F}{kT}\right) \quad (4.17)$$

โดยที่ n_0 สามารถคำนวณได้จากก่อนหน้านี้

จากสมการที่ 4.13 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln n_0$ กับ $1000/T$ ตามรูปที่ 4.27 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถคำนวณได้ แสดงยังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln n_0$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.7 แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ทำการวัดที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition	N_c (10^{21} m^{-3})	E_t (eV)	E_F (eV)
0.2	143.71	0.08	0.14
0.4	60.18	0.09	0.18
0.6	2.72	0.18	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาพบว่า สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ มีการตอบสนองต่อแสงที่ช้าและรวดเร็ว โดยที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 มีการตอบสนองต่อแสงที่ช้า แต่ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ 0.8 และ 1.0 มีการตอบสนองต่อแสงที่เร็ว เวลาในการตอบสนองต่อแสงประมาณ 1 วินาที

4.9.1 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ในการศึกษาสภาพไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสขาลง ทั้งกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเป็นไปดังสมการ

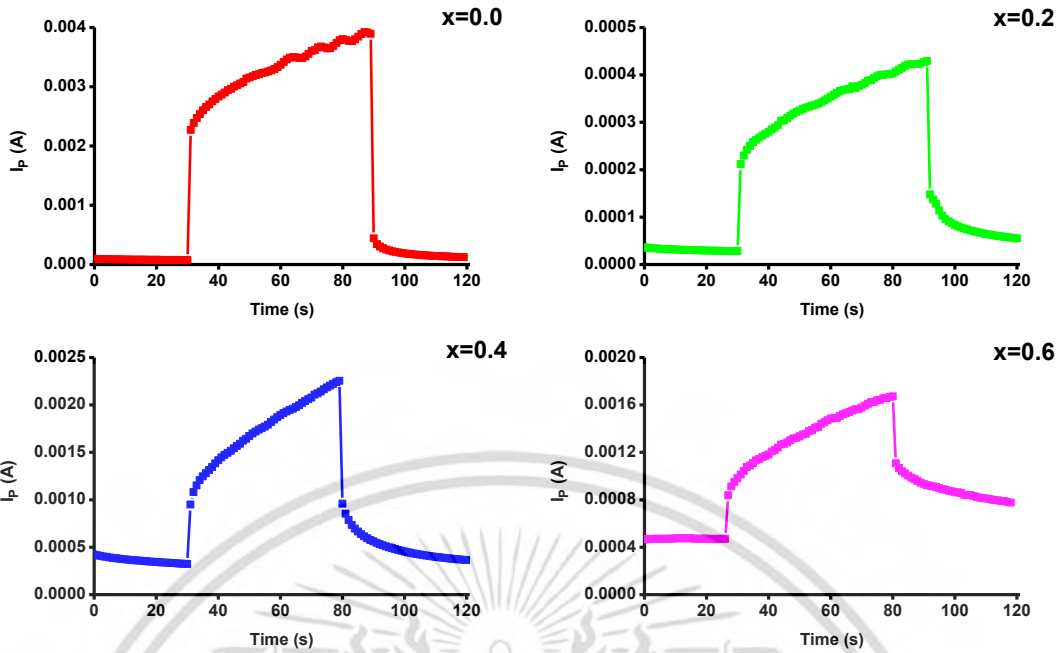
$$I = I_0(1 - e^{-t/\tau_r}) \quad (4.18)$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d} \quad (4.19)$$

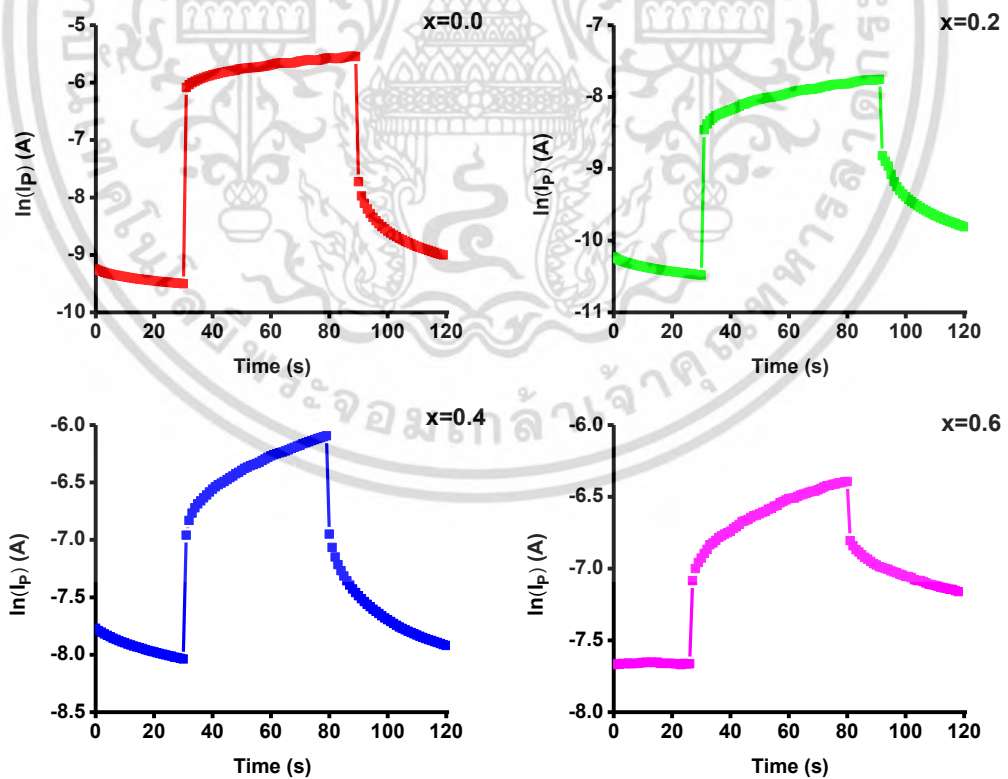
ส่วนใหญ่พบว่าเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเขียนอยู่ในรูปมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ดังสมการ

$$I = \sum_2^{n-1} A_{n-1} [1 - \exp(-t/\tau_{r(n-1)})] + A_n [1 - \exp(-(t/\tau_m)^\beta)] \quad (4.20)$$

$$I = \sum_2^{n-1} A_{n-1} [\exp(-t/\tau_{d(n-1)})] + A_n [\exp(-(t/\tau_{dn})^\beta)] \quad (4.21)$$

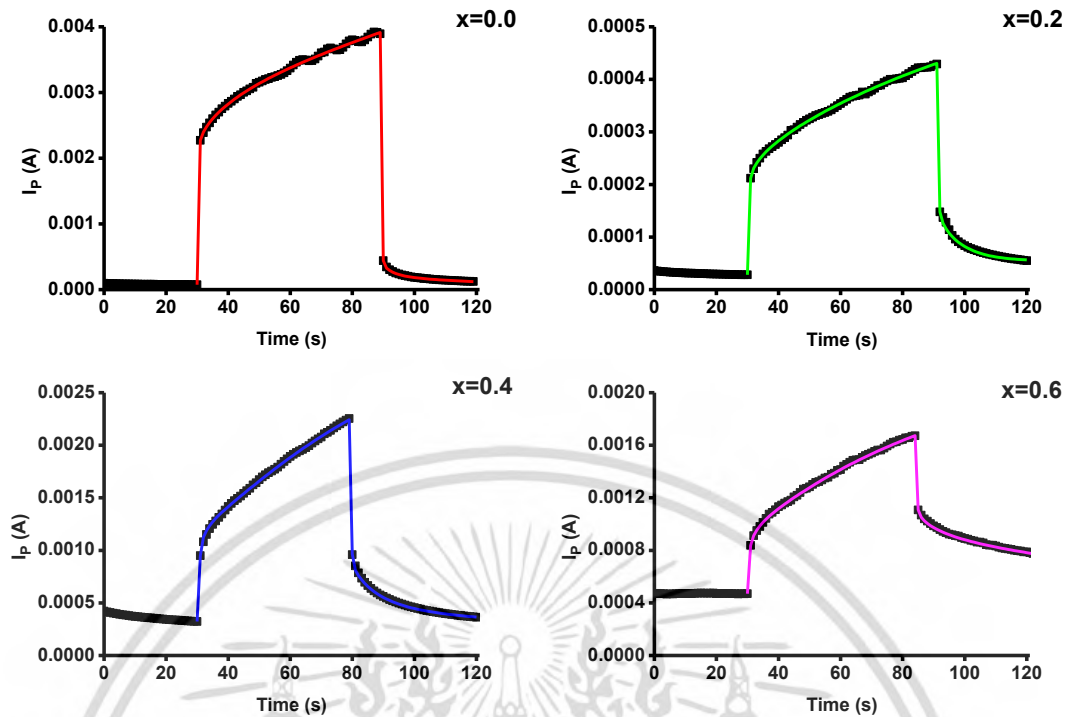


รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟิโตนกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_p)$ กับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.20) และ (4.21) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

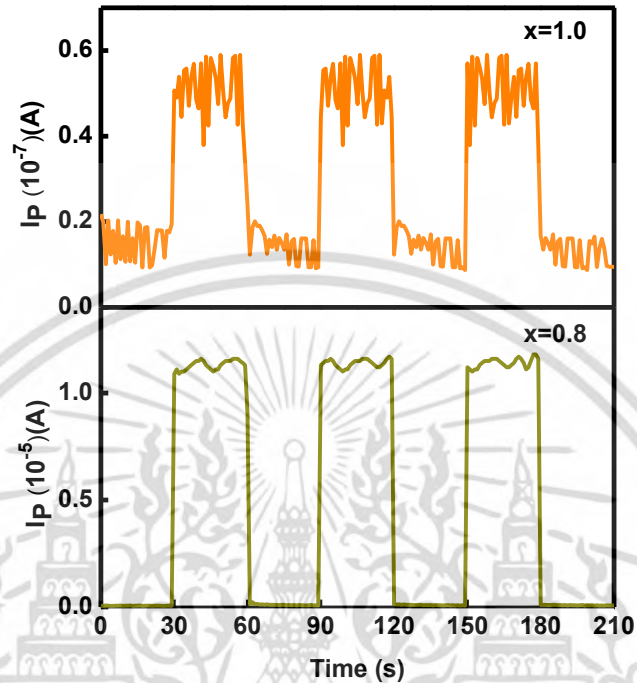
Composition (x)	Rise Time (s)				Decay Time (s)			
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	
0.0	$T_{r1} = 27.21829$ $A_1 = -9.62e-005$	$T_{r2} = 91.40768$ $A_2 = -0.004567$	$T_{r3} = 183.4862$ $A_3 = 0.01181$ $\beta = 0.4296$		$T_{d1} = 8.716116$ $A_1 = 8.074e-005$	$T_{d2} = 29.12056$ $A_2 = -7.285e-007$	$T_{d3} = 56.43341$ $A_3 = 0.000265$ $\beta = 0.3444$	
0.2	$T_{r1} = 18.11594$ $A_1 = -3.725e-005$	$T_{r2} = 63.33122$ $A_2 = 3.062e-005$	$T_{r3} = 160.7717$ $A_3 = 0.0005762$ $\beta = 0.6518$		$T_{d1} = 11.15449$ $A_1 = 8.23e-005$	$T_{d2} = 28.81014$ $A_2 = -0.0001191$	$T_{d3} = 59.066745$ $A_3 = 0.0001848$ $\beta = 0.5471$	
0.4	$T_{r1} = 10.42427$ $A_1 = 1.683e-005$	$T_{r2} = 63.33122$ $A_2 = 0.1307$	$T_{r3} = 62.53909$ $A_3 = -0.1284$	$T_{r4} = 99.50249$ $A_4 = 0.001241$ $\beta = 0.4482$	$T_{d1} = 10.006$ $A_1 = 0.0002544$	$T_{d2} = 26.08923$ $A_2 = -5.896e-005$	$T_{d3} = 96.33911$ $A_3 = 0.0007684$ $\beta = 0.371$	
0.6	$T_{r1} = 46.4684$ $A_1 = 0.0001653$	$T_{r2} = 76.33588$ $A_2 = 0.00112$	$T_{r3} = 156.0062$ $A_3 = 5.242e-005$ $\beta = 0.1475$		$T_{d1} = 31.85728$ $A_1 = -5.272e-005$	$T_{d2} = 68.87052$ $A_2 = -0.0002477$	$T_{d3} = 160.7717$ $A_3 = 0.001409$ $\beta = 0.6092$	

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความถี่ในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

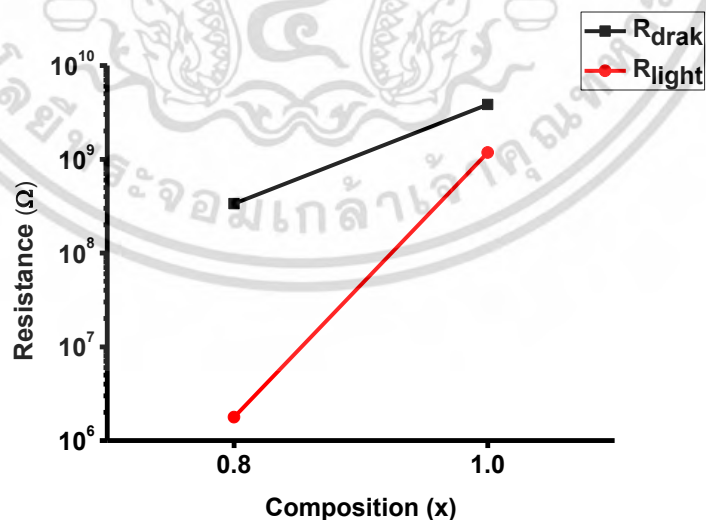
Composition (x)	Decay Component					
	1 st Term		2 nd Term		3 rd Term	
	I_0 (10^{-5} A)	N_{H1} (10^{11} cm $^{-3}$)	I_0 (10^{-5} A)	N_{H1} (10^{11} cm $^{-3}$)	I_0 (10^{-5} A)	N_{H1} (10^{11} cm $^{-3}$)
0.0	38.4757	13.7413	26.5324	9.4758	20.4625	7.3080
0.2	14.9520	5.3400	10.9592	3.9139	8.7815	3.1362
0.4	95.3711	34.0611	81.1627	28.9867	54.6519	19.5186
0.6	110.5917	39.4971	106.3425	37.9795	97.3688	34.7746

ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากกราฟสถานะนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.0 \leq x \leq 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

4.9.2 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

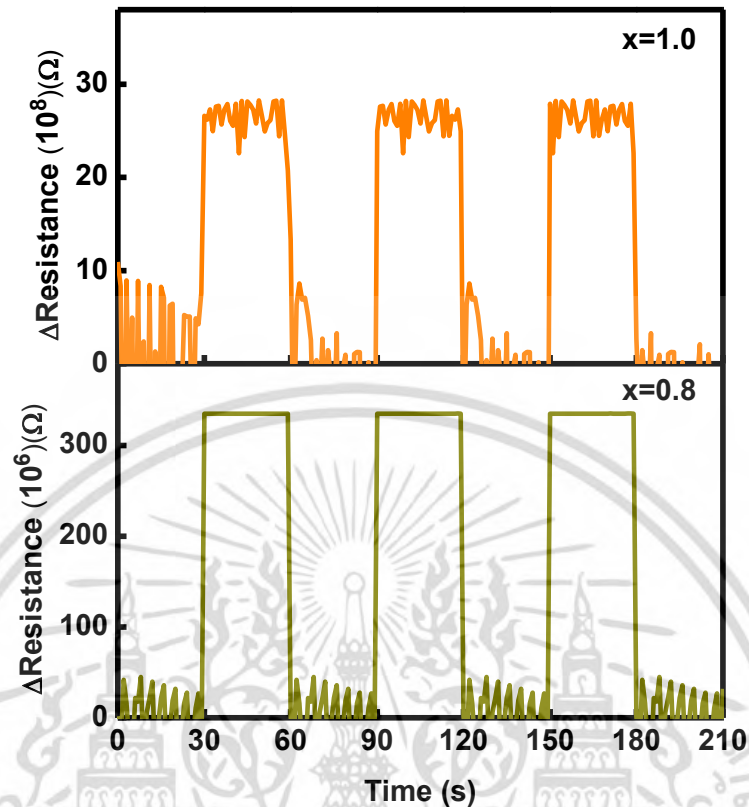


รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขณะฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การไบอัสที่แรงดัน 80 โวลต์ พบว่าทุกสารตัวอย่างตอบสนองกับแสงสีขาวจากหลอดฮาโลเจนด้วยช่วงเวลาตอบสนองที่สั้นมากทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสลง ถ้ากำหนดให้สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงขณะที่ความเข้มของแสงจากหลอดไฟมีค่าคงที่ (stationary photoconductivity) คือ $\Delta\sigma_s$ ซึ่งจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma_s = q\alpha\beta I\mu_p\tau_p \quad (4.22)$$

- เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง
 β คือ สัมประสิทธิ์เชิงควอนตัมในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (quantum yield)
 I คือ กระแสโฟโต
 μ_p คือ สภาพคล่องของพาหะ
 τ_p คือ ค่าชีวิตของพาหะภายใต้การฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (4.23)$$

ส่วนกระแสขาลงจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [\exp(-t/\tau)] \quad (4.24)$$

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

เวลาขาขึ้นคือ เวลาขณะที่กระแสขาขึ้นมีค่าเท่ากับ $0.63\Delta\sigma_s$ ส่วนเวลาขาลงคือ เวลาขณะที่กระแสขาลงมีค่าเท่ากับ $0.37\Delta\sigma_s$ เวลาขาขึ้นและเวลาขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) สามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสงและหยุดฉายแสง (ดังรูปที่ 4.33) ตามลำดับ

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity, S) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้ คือ

$$S = \left(\frac{R_{\text{dark}} - R_{\text{light}}}{R_{\text{dark}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{\Delta R}{R_{\text{dark}}} \right) \times 100\% \quad (4.25)$$

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่งนิยามความไวในการตอบสนองต่อแสง ดังนี้

$$S = \frac{R_{\text{dark}}}{R_{\text{light}}} \quad (4.26)$$

ในทางปฏิบัติมักมีการป้อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง ดังนั้น ความไวในการตอบสนองต่อแสงสามารถคำนวณได้ง่ายๆ จากความสัมพันธ์

$$S = \frac{I_{\text{light}}}{I_{\text{dark}}} \quad (4.27)$$

และผลการทดลองที่เกี่ยวกับสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่อุณหภูมิต้องจะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.10

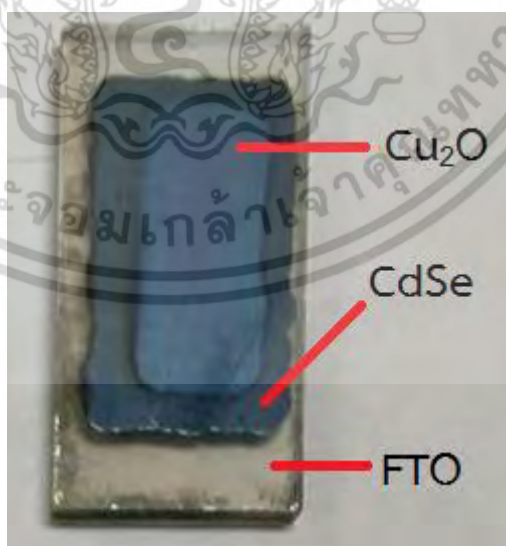
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบสุญญากาศ ภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Photosensitivity (S)	
	$S = \left(\frac{\Delta R}{R_{\text{dark}}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{R_{\text{dark}}}{R_{\text{light}}}$
0.8	99.4794	192.0733
1.0	71.0348	3.4524

4.10 ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O

ที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เตรียมด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยสารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ถูกเตรียมด้วยวิธีการรีแอ็คทีฟที่พีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยใช้เป้าเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่ประดิษฐ์ได้ แสดงดังรูปที่ 4.34

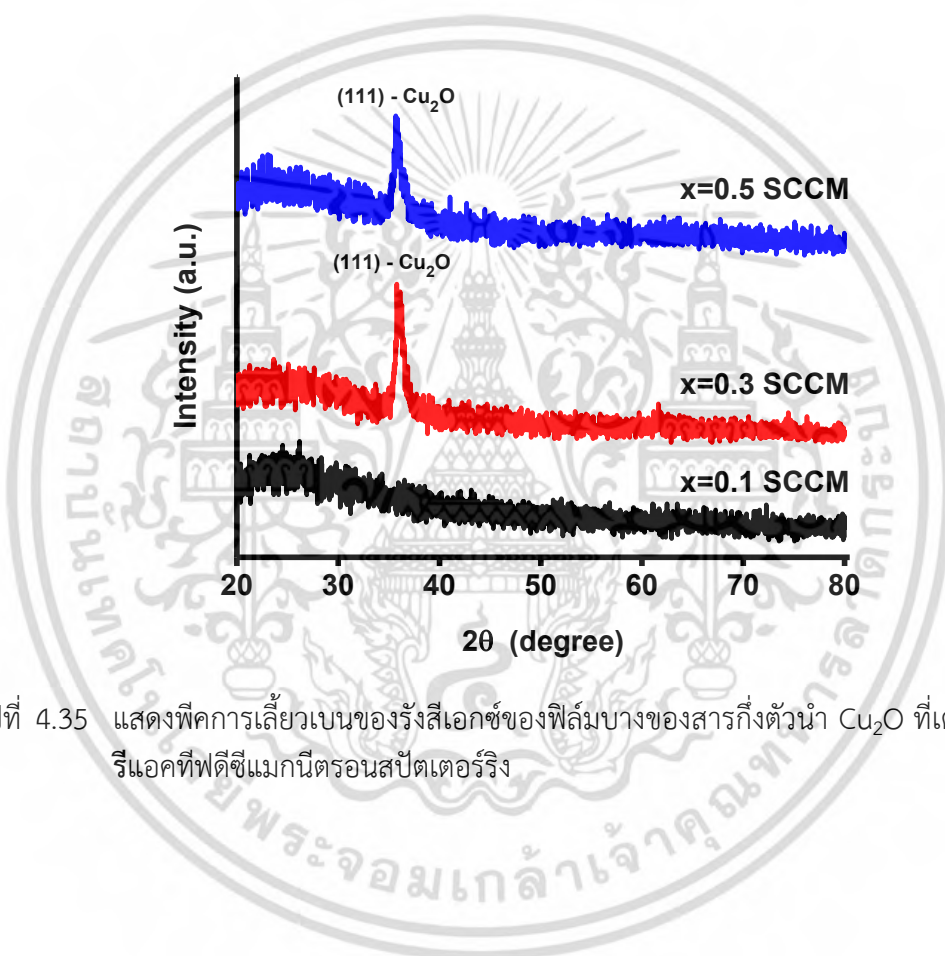


รูปที่ 4.34 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

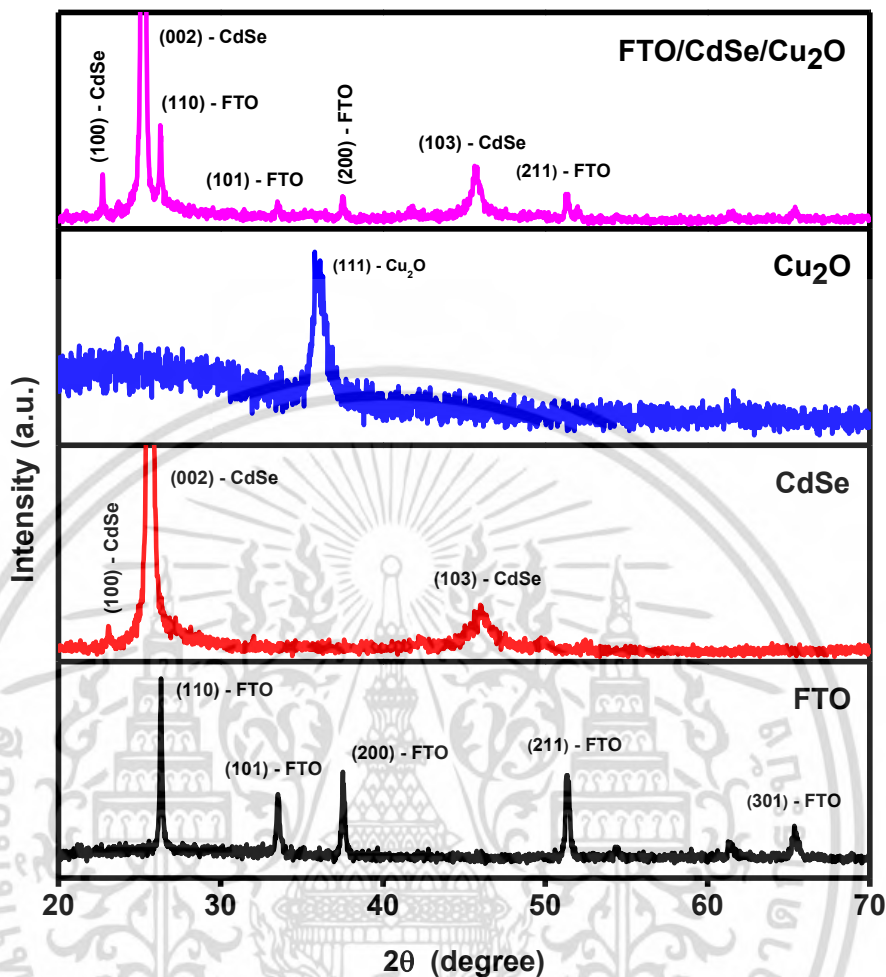
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O

จากพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ พบว่าที่อัตราการไหล 0.3 และ 0.5 SCCM จะปรากฏพีคตรงกับระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แสดงยังรูปที่ 4.35 และพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O แสดงยังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

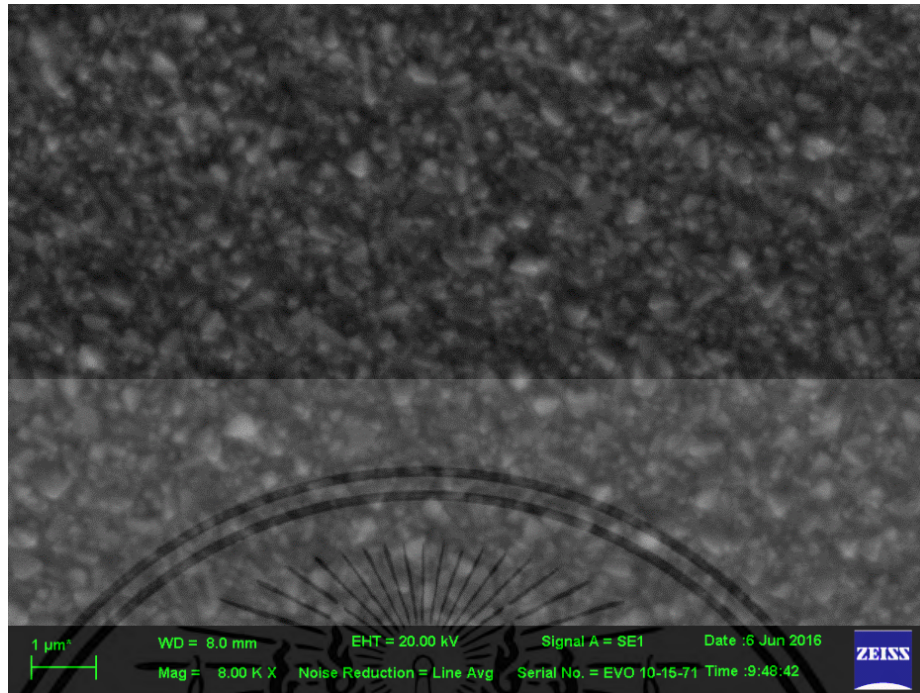


รูปที่ 4.36 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

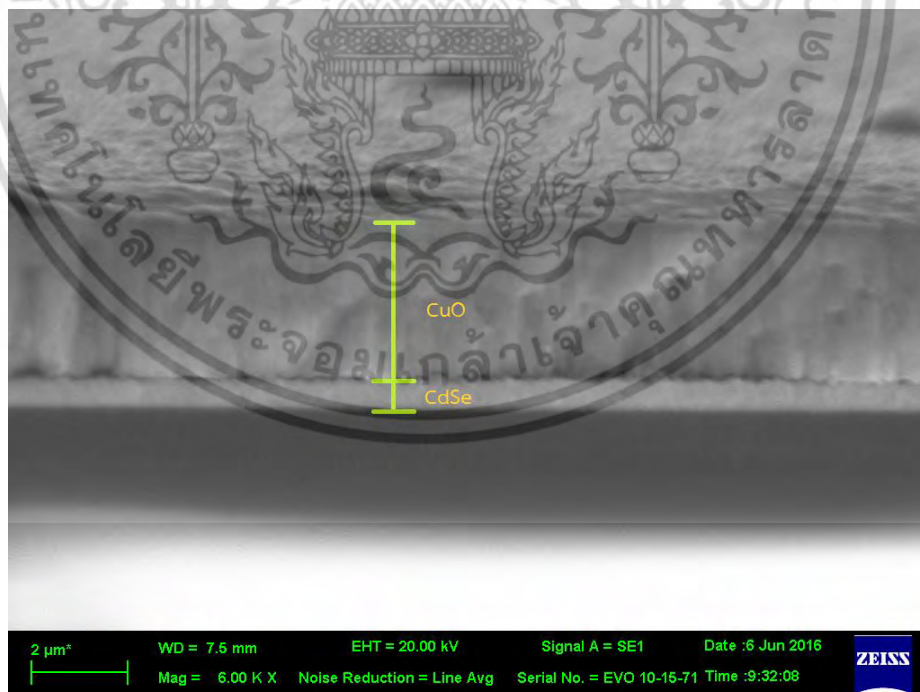
4.12 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O บริเวณผิวหน้า พบว่า ผิวหน้าค่อนข้างเรียบและมีเกรนเล็กขนาดประมาณ 0.4 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O ที่เตรียมด้วยวิธีการรีแอ็คทีฟิตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง แสดงดังรูปที่ 4.37 และ จากภาพถ่ายแบบ พบว่า ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe มีความหนาประมาณ 0.7 ไมโครเมตร และ ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O มีความหนาประมาณ 3.4 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่าย SEM แบบบนผิวหน้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

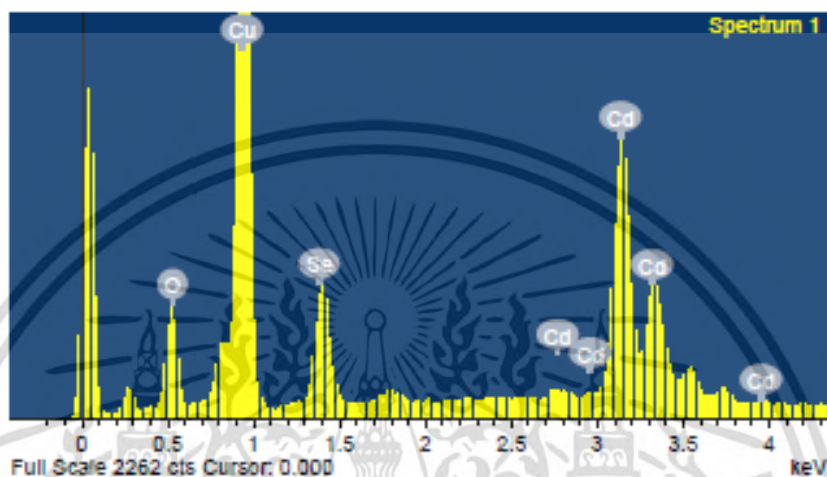


รูปที่ 4.38 แสดงภาพถ่าย SEM แบบภาพตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเซอร์แบบนี้ในกรณิกว่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O

จากสเปกตรัม EDS ในรูปที่ 4.39 พบว่า ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ประกอบไปด้วยธาตุ Cd, Se, Cu และ O โดยที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุต่างๆ แสดงยังตารางที่ 4.11



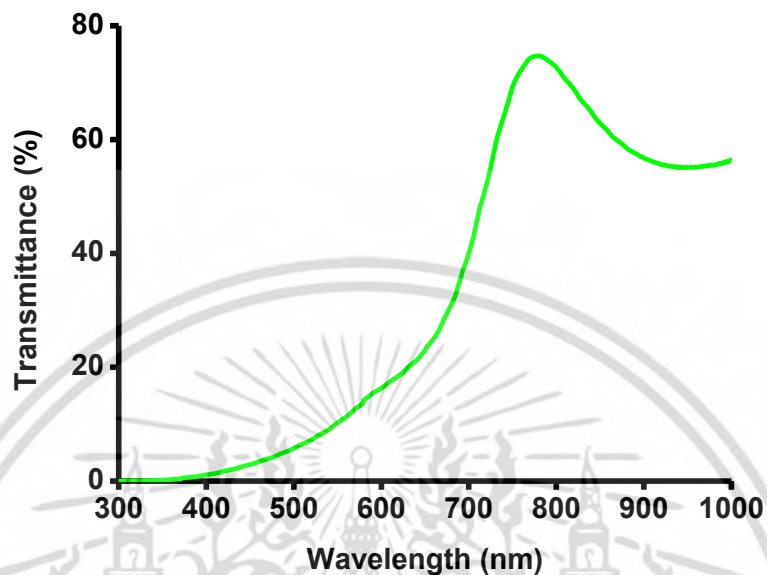
รูปที่ 4.39 แสดงสเปกตรัม EDS ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

ตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

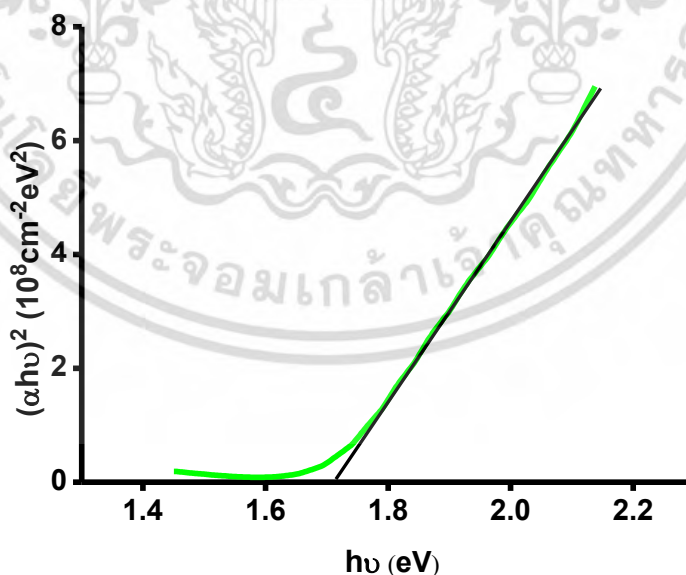
	EDS analysis				
	Cd (%)	Se (%)	Cu (%)	O (%)	Total (%)
Weight	34.52	12.50	28.83	24.15	100
Atomic	12.64	6.52	18.68	62.16	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O

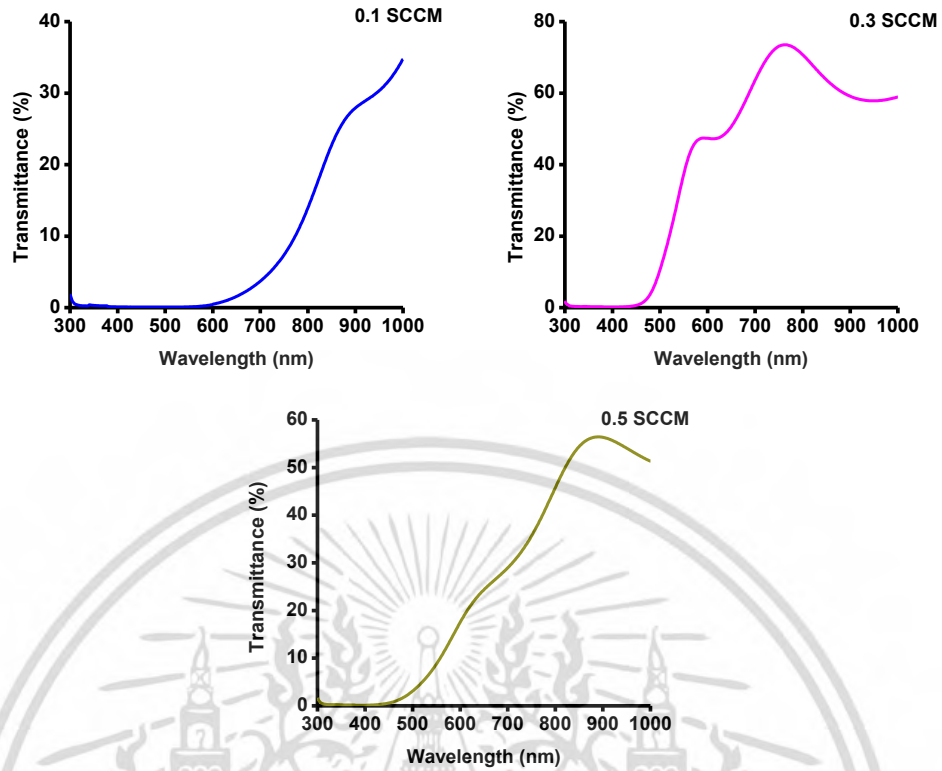


รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe

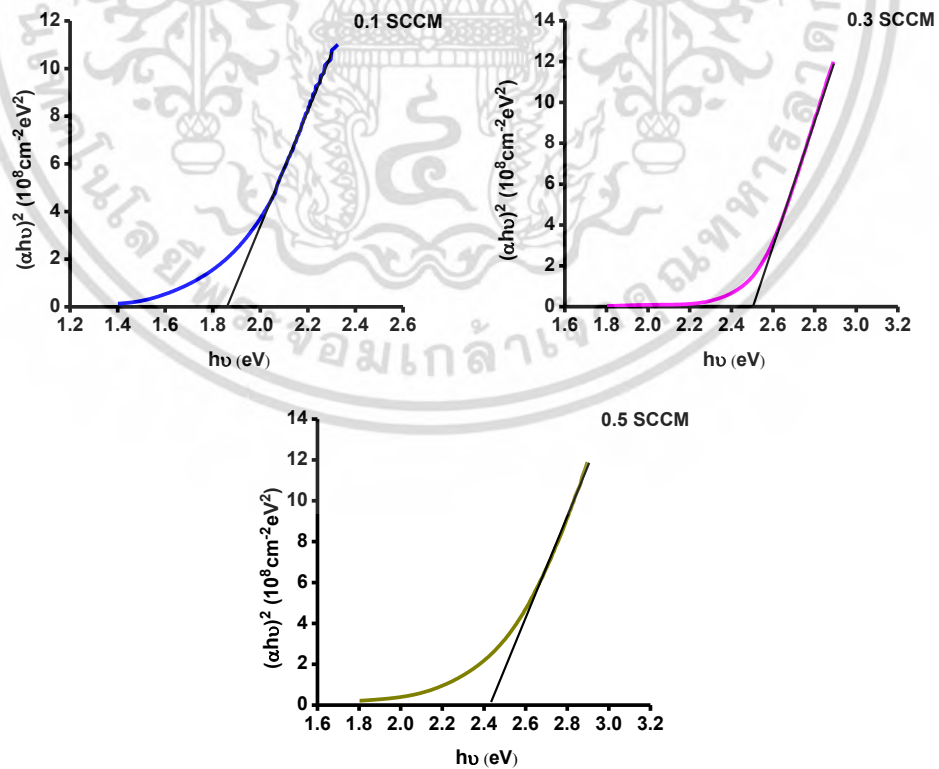


รูปที่ 4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

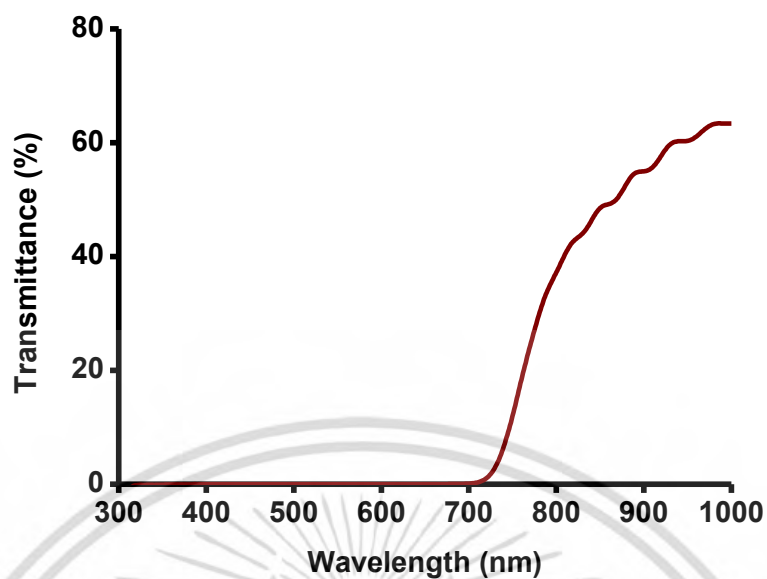


รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O

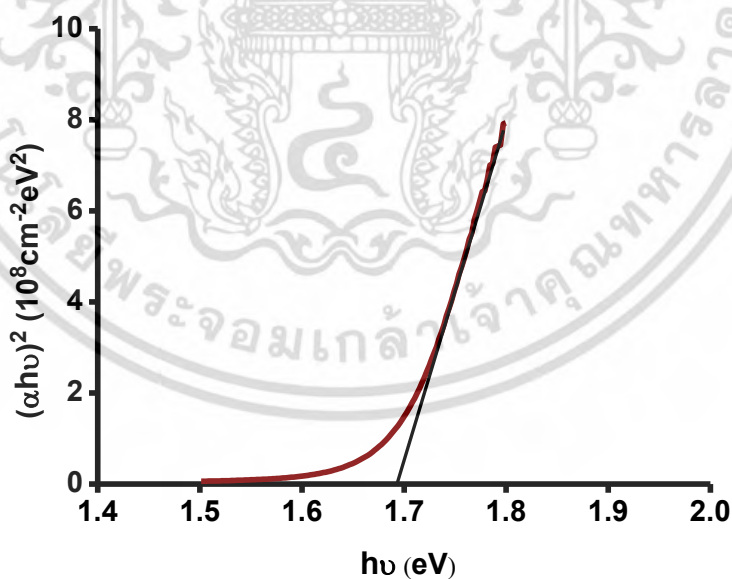


รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

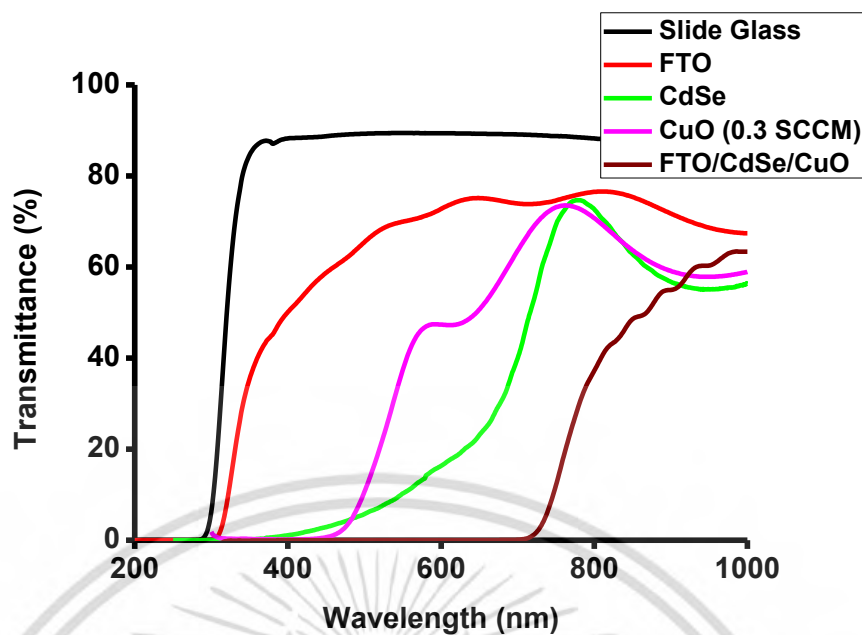


รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของกระจกสไลด์, ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO), ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe, ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p- Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

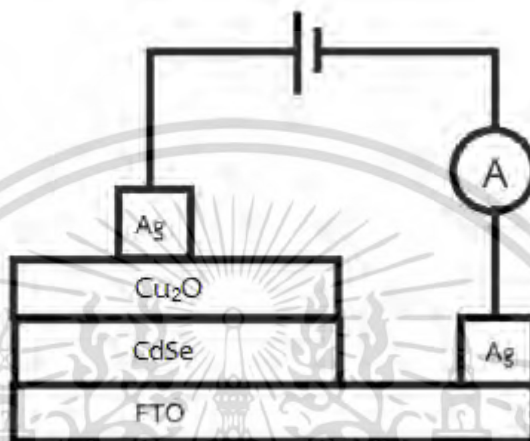
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p- Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

Samples	E_g (eV)
CdSe	1.71
Cu_2O (0.1 SCCM)	1.86
Cu_2O (0.3 SCCM)	2.51
Cu_2O (0.5 SCCM)	2.42
CdSe/ Cu_2O	1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O

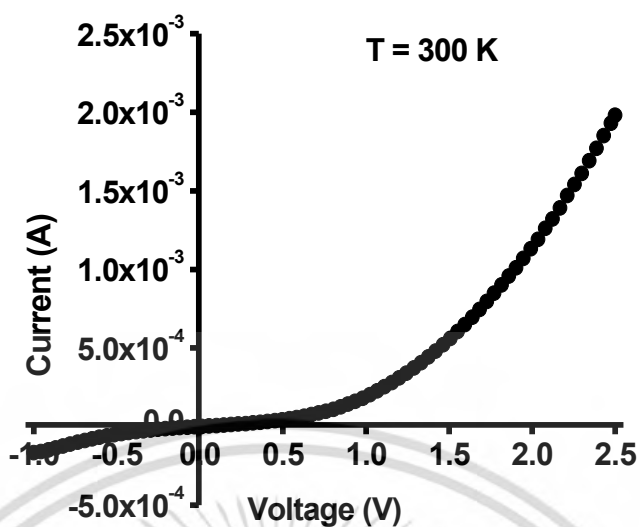
ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ได้ทำการต่อขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 4.47 และนำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้งแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง



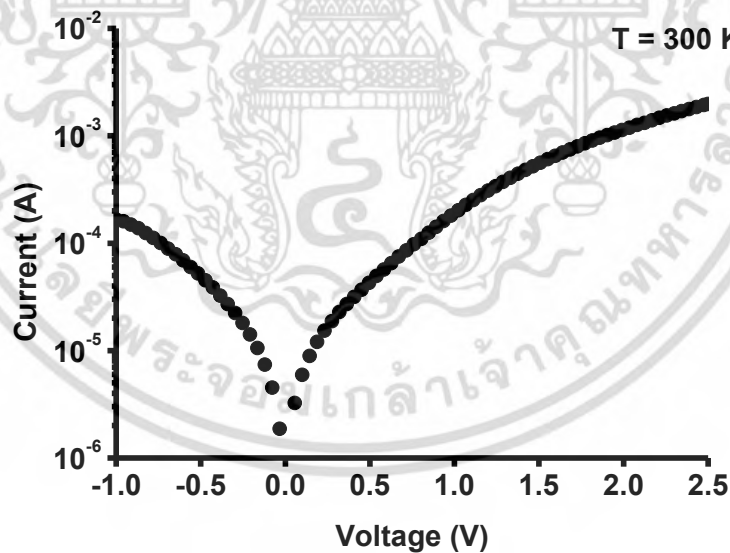
รูปที่ 4.47 แสดงแผนภาพการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยการวัดความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในช่อง -1.0 ถึง 2.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง แสดงยังรูปที่ 4.48 พบว่า มีการเรียงกระแสเป็นเหมือนไดโอด โดยที่มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ประมาณ 1.0 โวลต์

พิจารณา กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ในรูปที่ 4.50 พบว่ากลไกการนำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กลไก คือ กลไกการนำไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง ตามลำดับ รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ซึ่งใช้หาค่าแพกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งใช้หาค่าแพกเตอร์ในอุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ซึ่งใช้หาค่าความสูงของกำแพงศักย์สำหรับค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีการของชวง แสดงยังตารางที่ 4.13

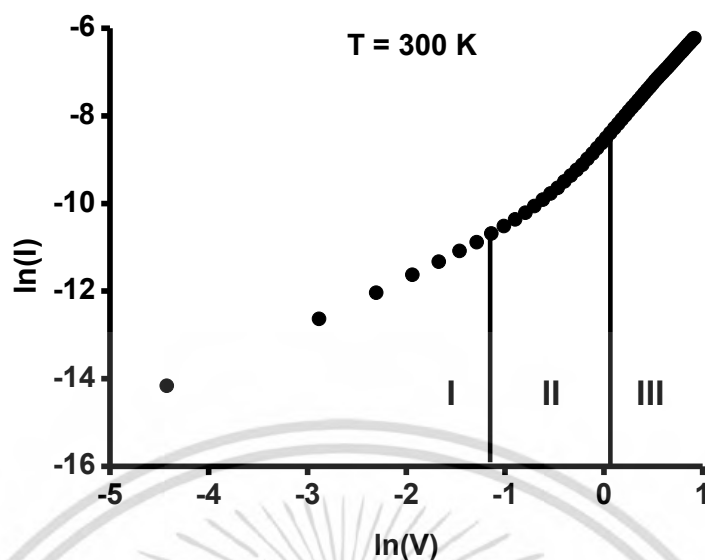


รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง

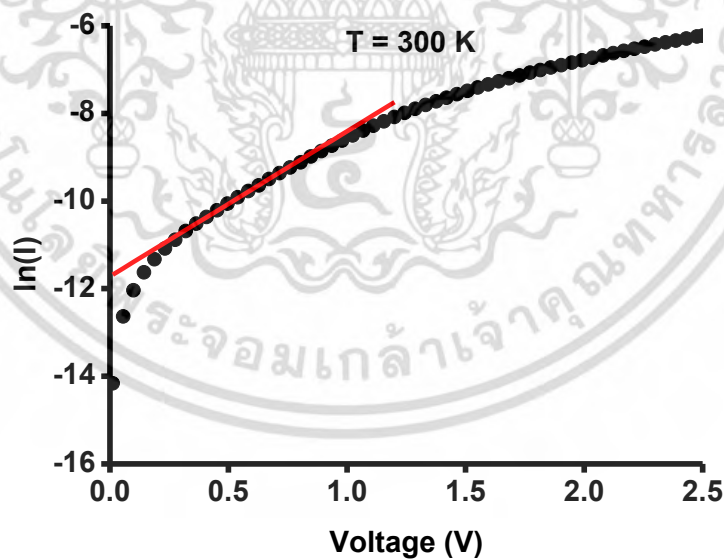


รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

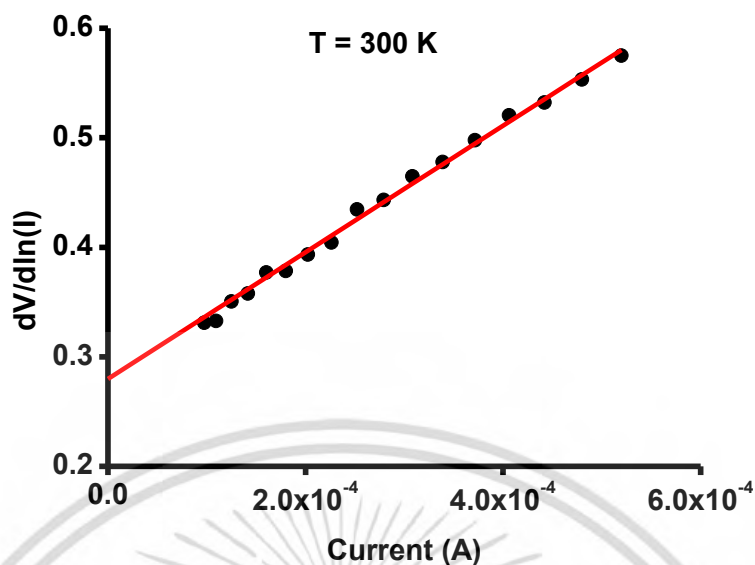


รูปที่ 4.50 แสดงกราฟลอการิทึมการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง

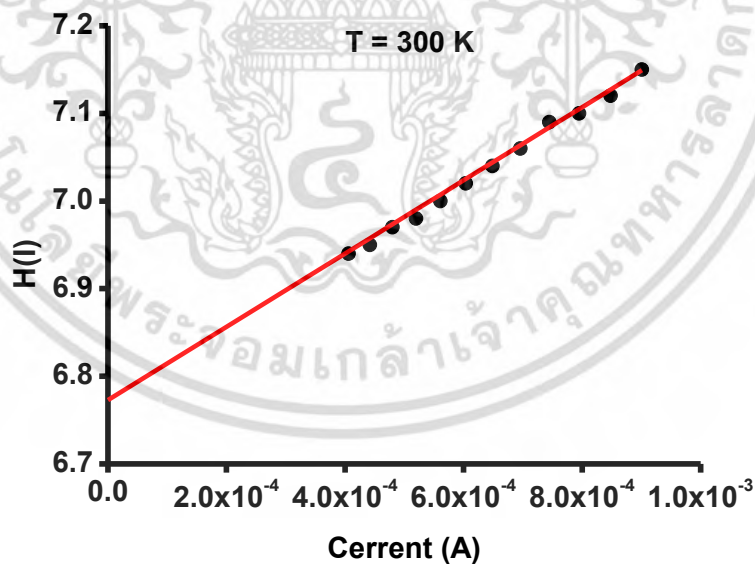


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

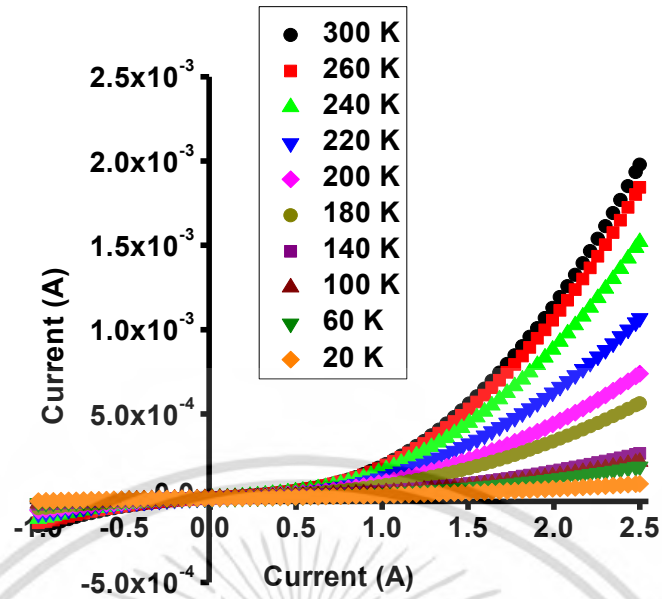


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln(I)$ กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง

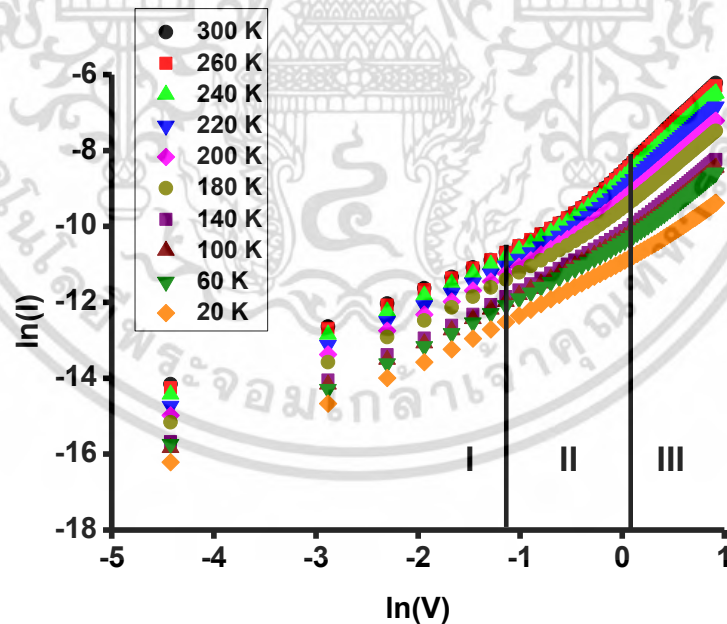


รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

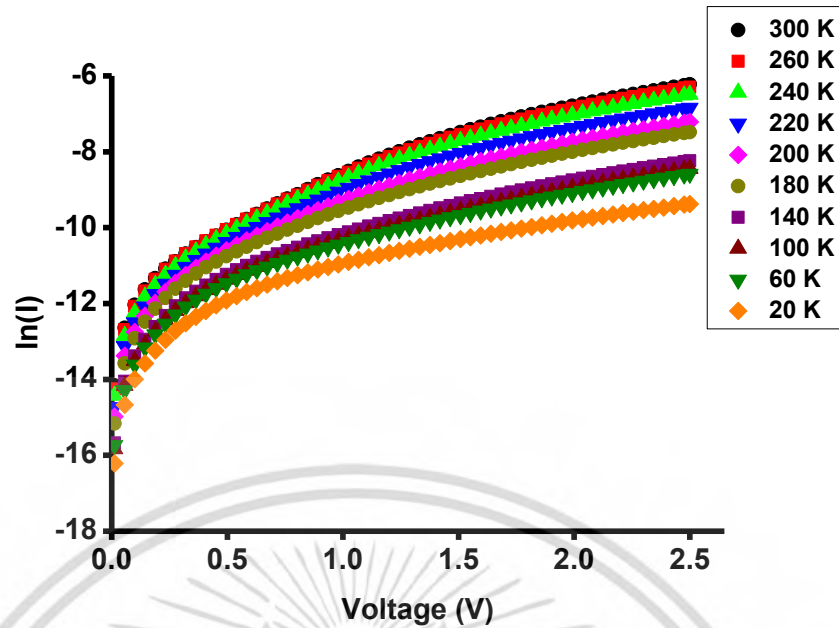


รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

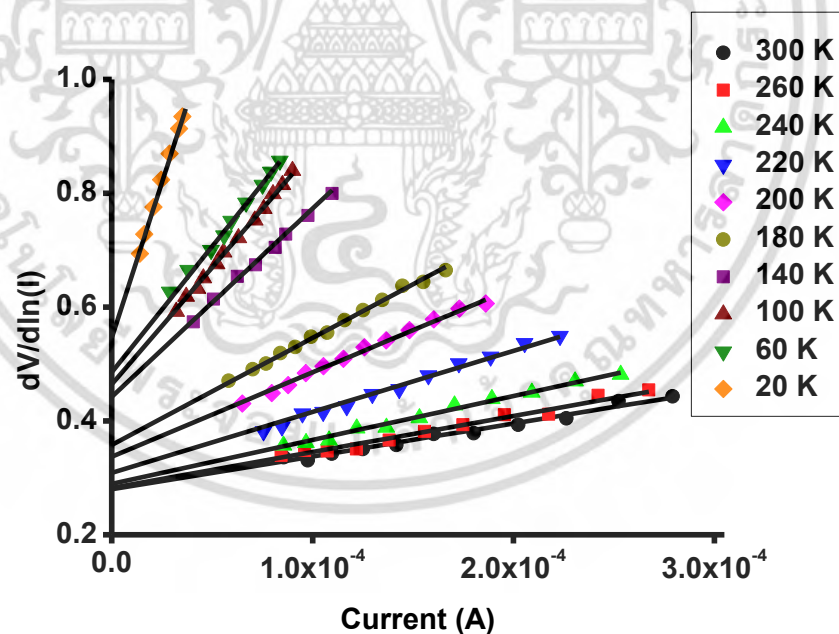


รูปที่ 4.55 แสดงกราฟลอการิทึมการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

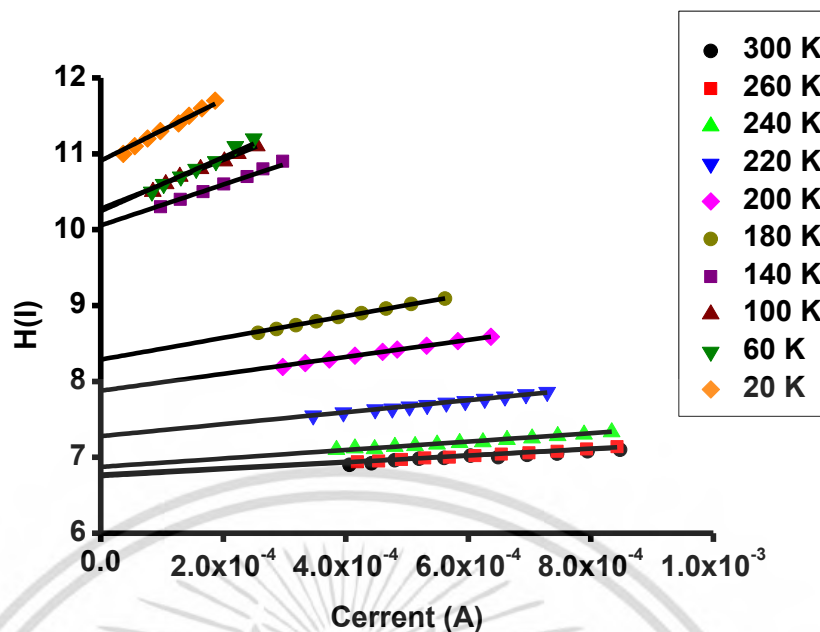


รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe}/p\text{-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

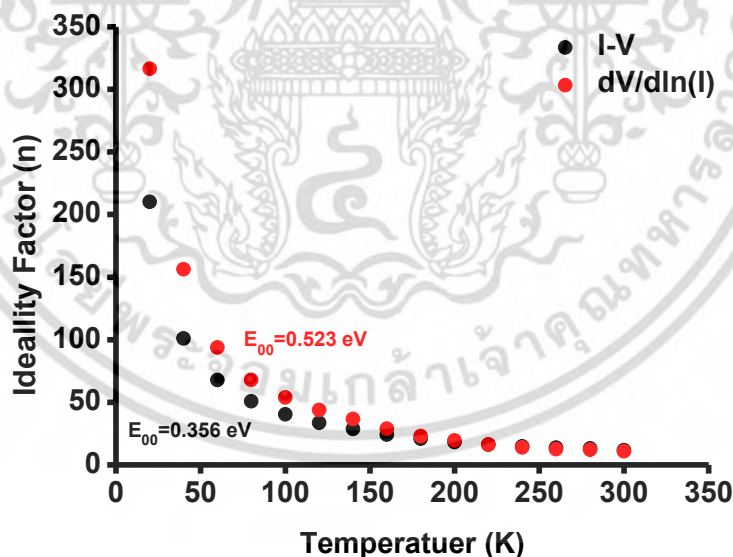


รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln(I)$ กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe}/p\text{-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



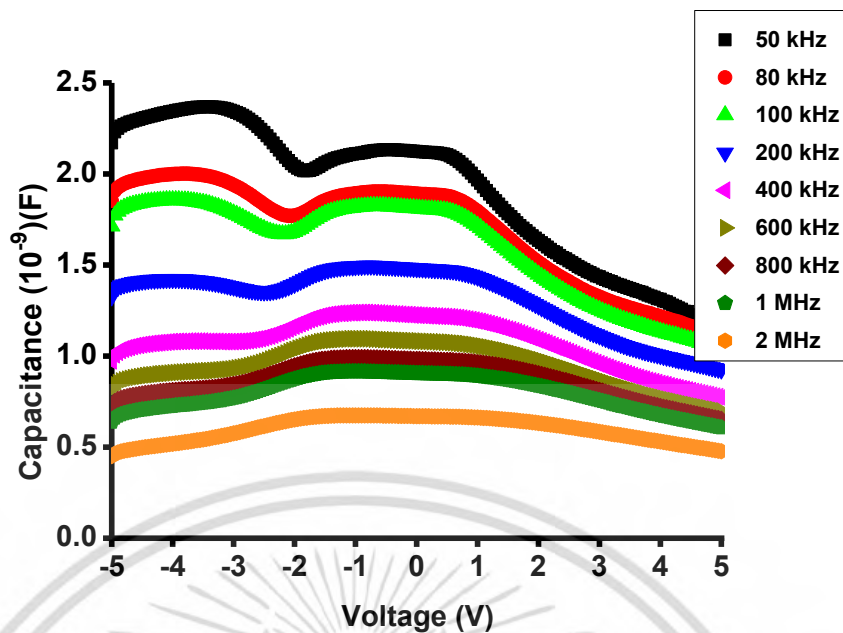
รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

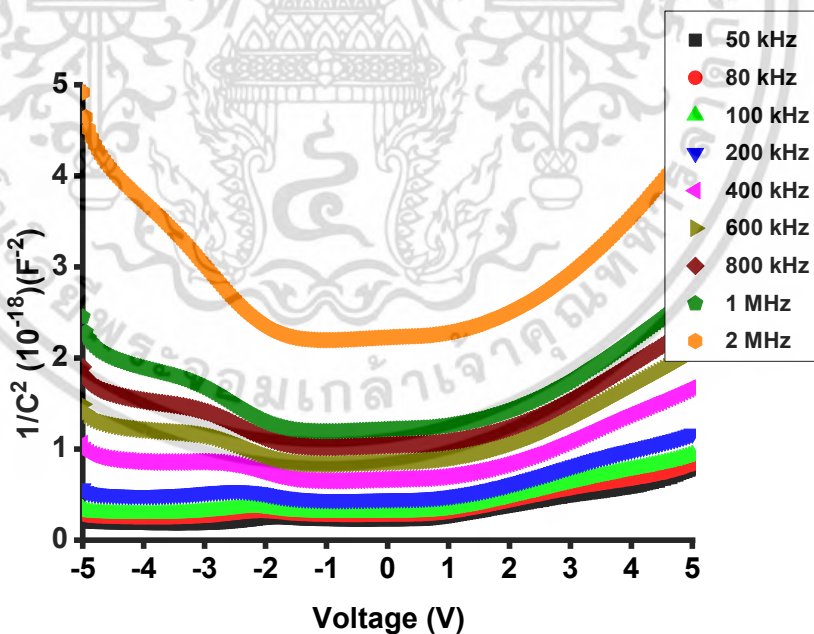
ตารางที่ 4.13 แสดงค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรม ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

T (K)	I _s (10 ⁻⁶ A)	Ideality Factor		Barrier Height (eV)		Series Resistance (R _s) (ohm)	
		I-V	[dV/d(lnI)]-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)]-I
20	1.619	210.096	211.109	0.034	0.033	9137.4	9147.5
40	2.093	100.866	101.870	0.073	0.069	4020.7	4031.2
60	2.448	67.843	68.100	0.112	0.109	3557.0	3562.5
80	2.572	50.723	50.825	0.153	0.149	3418.5	3425.5
100	2.671	40.431	40.658	0.195	0.191	3218.9	3224.0
120	2.791	33.617	33.841	0.237	0.233	3063.6	3075.0
140	3.017	28.598	28.841	0.279	0.274	2692.9	2695.1
160	3.779	24.090	24.242	0.320	0.316	1878.1	1882.2
180	4.481	20.946	21.021	0.361	0.359	1435.1	1440.3
200	5.010	18.287	18.718	0.403	0.403	1115.2	1120.1
220	5.994	16.219	16.825	0.444	0.447	789.6	792.0
240	7.459	14.786	15.102	0.483	0.492	566.4	568.2
260	8.345	13.667	13.846	0.524	0.536	451.6	455.8
280	8.734	13.074	13.215	0.579	0.579	422.6	425.9
300	8.125	11.662	12.101	0.613	0.626	417.7	420.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

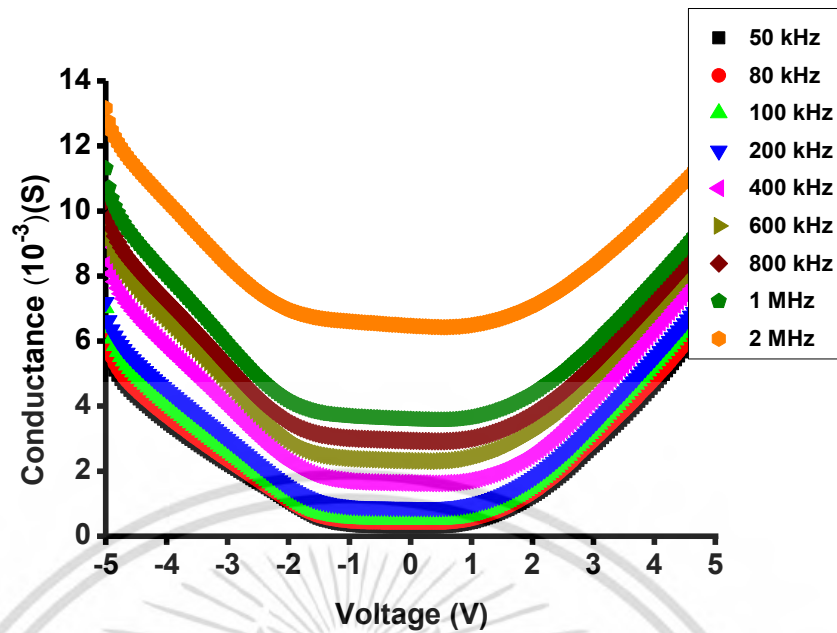


รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

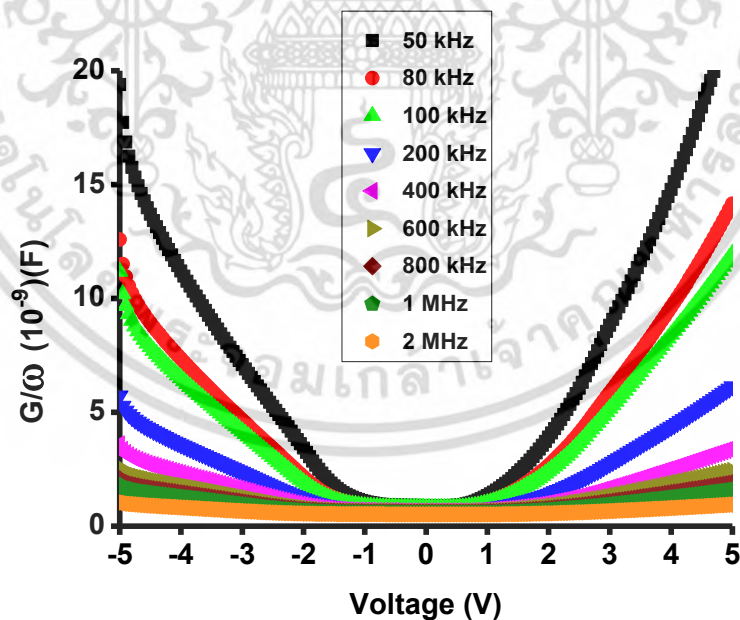


รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ ความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

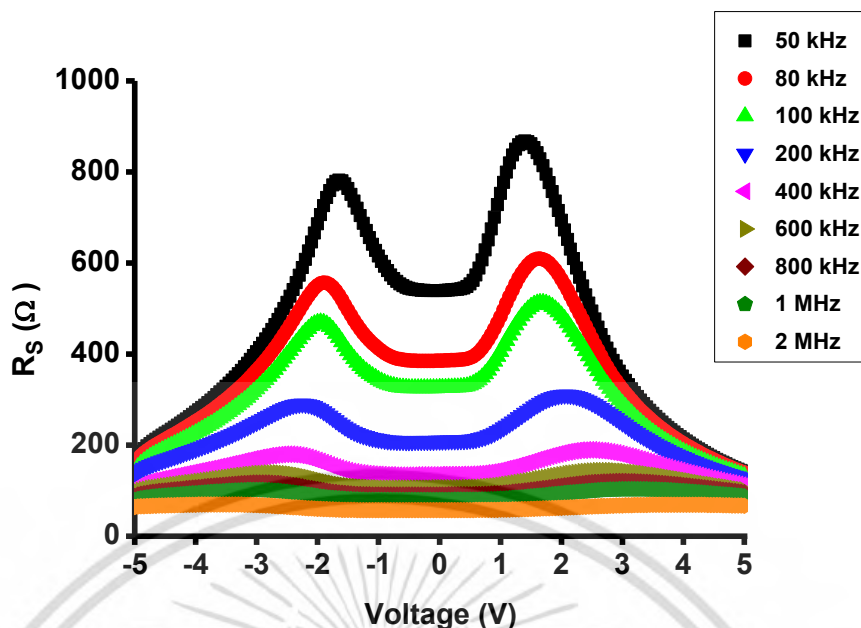


รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe}/p\text{-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

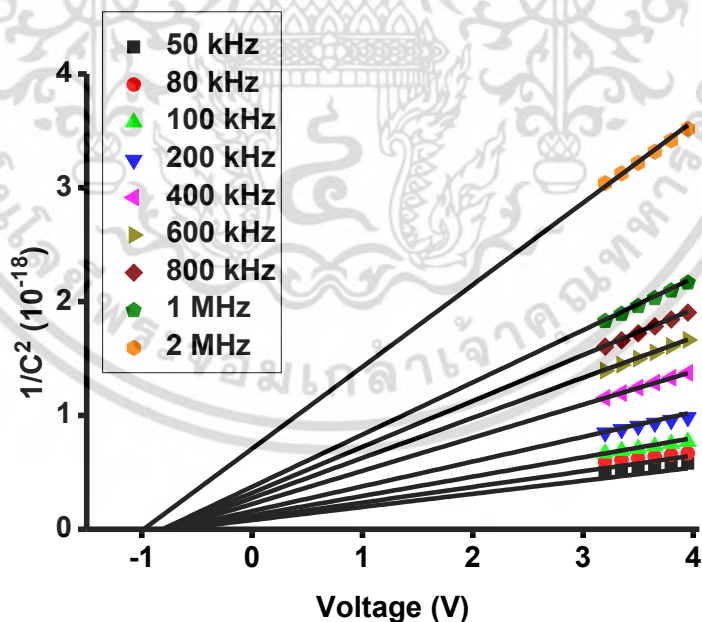


รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe}/p\text{-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

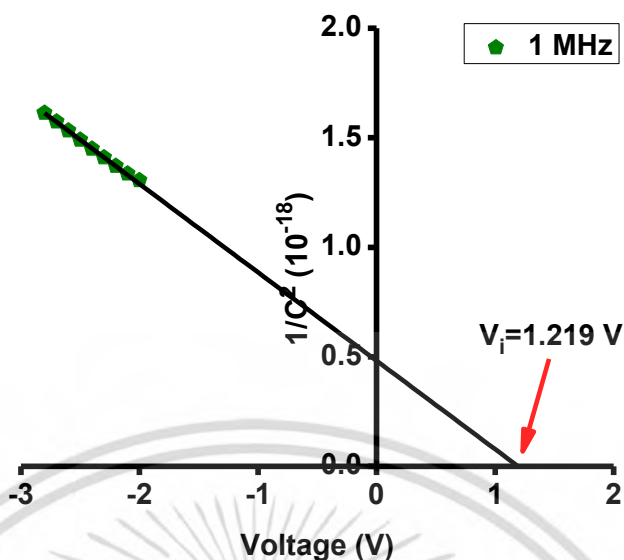


รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ ความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ ความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

จากความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V ของรอยต่อชนิดที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง พบว่าความสูงของกำแพงศักย์และความหนาแน่นของพาหะในการกึ่งตัวนำ Cu₂O มีค่าเท่ากับ 1.41 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 3.91×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้ค่าไดอิเล็กตริก 7.2 และมวลยั้งผลของโฮลเท่ากับ $0.34m_0$

จากสมการความสัมพันธ์

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_s q N_D A^2} \right) (V_{bi} - V) \quad (4.28)$$

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

ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ คือ

$$V_{bi} = V_i + kT \quad (4.29)$$

กำแพงศักย์ คือ

$$\Phi_B(C - V) = V_{bi} + E_F - \Delta\Phi_b \quad (4.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานเฟอร์มิ คือ

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (4.31)$$

ความหนาแน่นของสถานะยังผล คือ

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0}\right)^{3/2} \quad (4.32)$$

โดยที่ $m_e^*(\text{CdSe}) = 0.15m_0$ และ $m_e^*(\text{Cu}_2\text{O}) = 0.34m_0$ [60-61]

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของขอตักคือ

$$\Delta\Phi = \left[\frac{qE_m}{4\epsilon_s\pi} \right] \quad (4.33)$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อขอตักคือ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (4.34)$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะคือ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_D}} \quad (4.35)$$

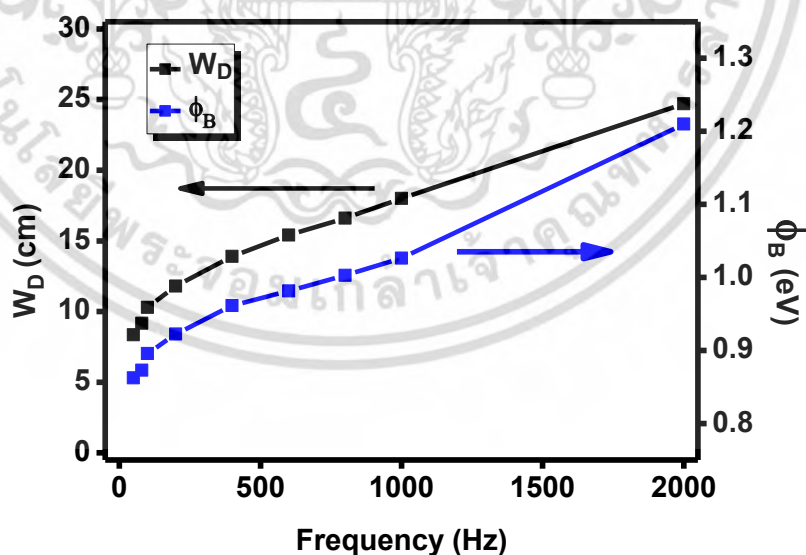
ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางคือ

$$\Psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\epsilon_s} \quad (4.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

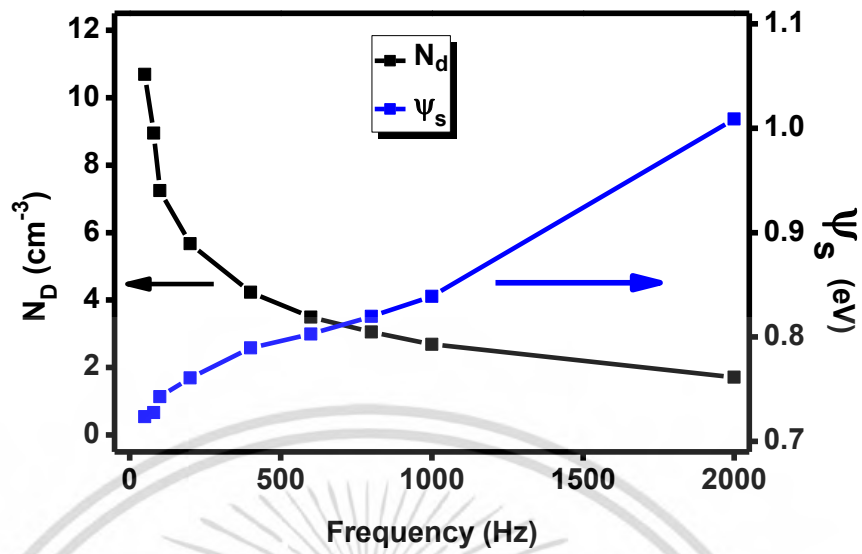
ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

Frequency (kHz)	V _i (V)	N _D (cm ⁻³)	E _F (eV)	ΔΦ _b (eV)	Φ _B (C-V) (eV)	W _D (cm)	Ψ _s (eV)
50	0.697	1.07×10 ¹⁵	0.1869	0.0483	0.8624	8.36×10 ⁻⁵	0.7237
60	0.698	1.06×10 ¹⁵	0.1872	0.0481	0.8631	8.40×10 ⁻⁵	0.7241
70	0.699	9.65×10 ¹⁴	0.1896	0.0471	0.8669	8.80×10 ⁻⁴	0.7244
80	0.702	8.95×10 ¹⁴	0.1916	0.0462	0.8730	9.16×10 ⁻⁵	0.7276
90	0.706	8.03×10 ¹⁴	0.1944	0.0451	0.8813	9.69×10 ⁻⁵	0.7320
100	0.717	7.24×10 ¹⁴	0.1971	0.0441	0.8958	1.03×10 ⁻⁴	0.7429
200	0.735	5.67×10 ¹⁴	0.2034	0.0417	0.9225	1.18×10 ⁻⁴	0.7608
300	0.740	4.82×10 ¹⁴	0.2076	0.0401	0.9335	1.28×10 ⁻⁴	0.7659
400	0.764	4.23×10 ¹⁴	0.2109	0.0392	0.9614	1.39×10 ⁻⁴	0.7896
500	0.711	3.88×10 ¹⁴	0.2132	0.0384	0.9718	1.46×10 ⁻⁴	0.7969
600	0.777	3.49×10 ¹⁴	0.2159	0.0375	0.9814	1.54×10 ⁻⁴	0.8029
700	0.789	3.24×10 ¹⁴	0.2179	0.0369	0.9955	1.61×10 ⁻⁴	0.8145
800	0.794	3.05×10 ¹⁴	0.2194	0.0364	1.0027	1.66×10 ⁻⁴	0.8197
900	0.798	2.88×10 ¹⁴	0.2209	0.0359	1.0086	1.72×10 ⁻⁴	0.8236
1000	0.813	2.69×10 ¹⁴	0.2227	0.0355	1.0262	1.80×10 ⁻⁴	0.8389
2000	0.983	1.71×10 ¹⁴	0.2344	0.0333	1.2099	2.47×10 ⁻⁴	1.0087

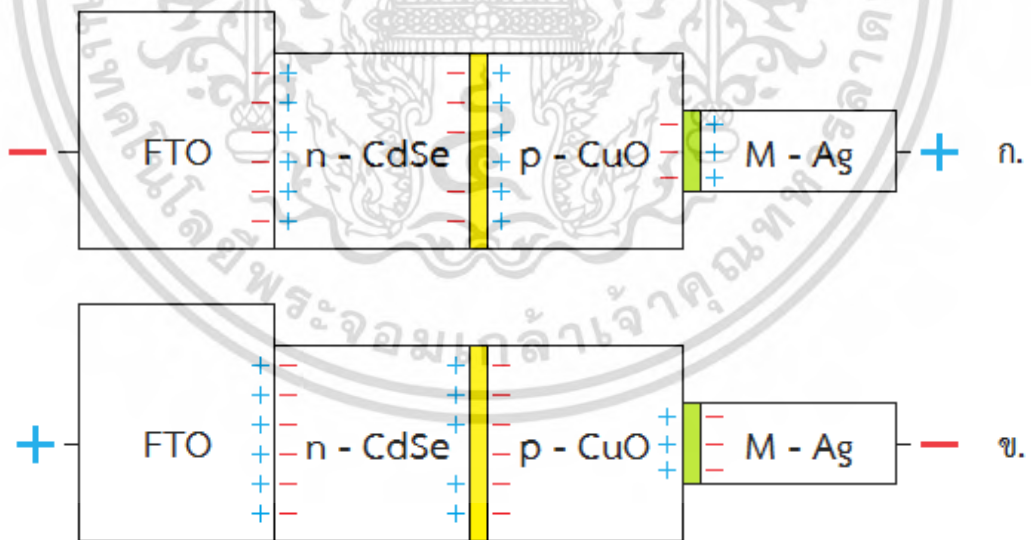


รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W_D และ Φ_B กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

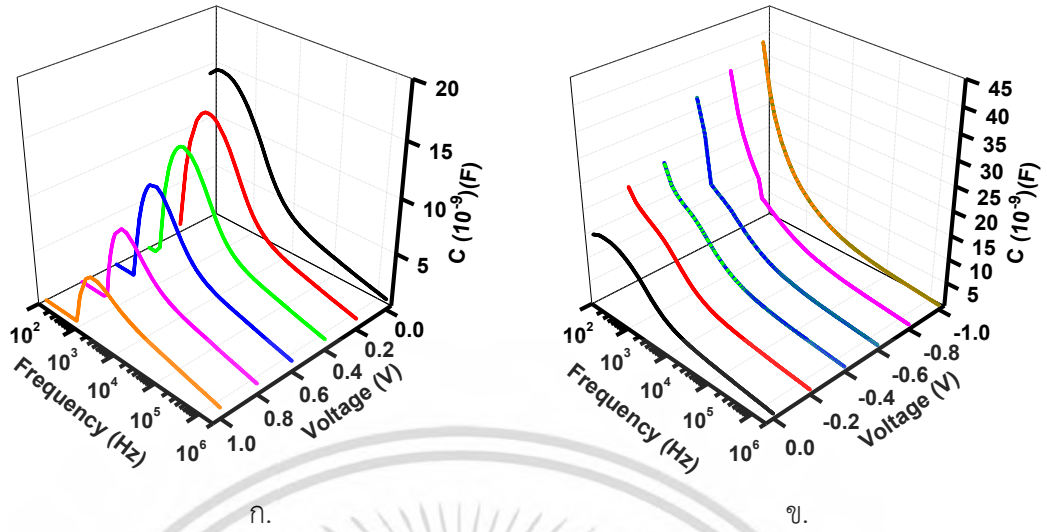


รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_D และ ψ_s กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วย ฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.69 แสดงแรงดันตกคร่อมรอยต่อต่างๆของไดโอด
 ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
 ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

- ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
- ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์

ที่ความต่ำๆ สถานะผิวเชื่อมต่อจะแสดงผลต่อการจับและปล่อยอิเล็กตรอน ดังนั้น ความจุไฟฟ้ารวม (C) ของรอยต่อพี-เอ็น ที่ความถี่ต่ำ จะเป็นดังความสัมพันธ์

$$C = C_D + C_{SS} \tag{4.37}$$

เมื่อ C_D คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะ (depletion region)
 C_{SS} คือ ความจุไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อ

อย่างไรก็ตาม สถานะผิวเชื่อมต่อจะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่สูง ดังนั้น ความจุไฟฟ้ารวม (C) คือ

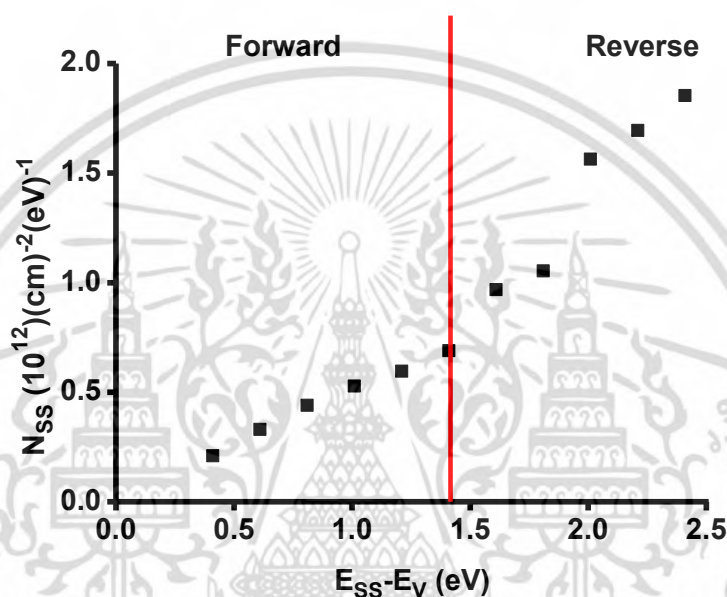
$$C = C_D \tag{4.38}$$

ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (N_{SS}) คือ

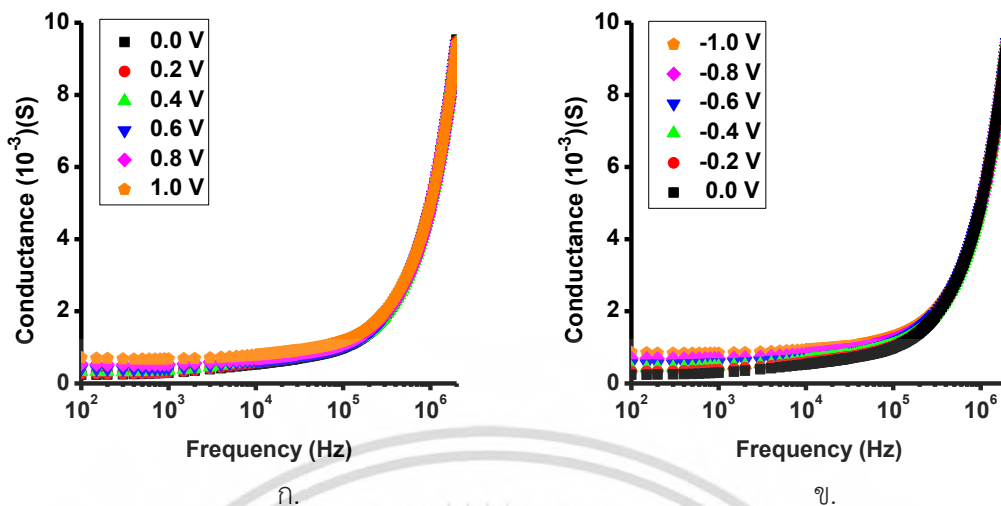
$$N_{SS} = \frac{C_{SS}}{qA} \tag{4.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประติษฐานขึ้น รอยต่อชอตต์กีที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (schottky back contact) จะได้รับการไบแอสย้อนกลับ ค่า C_{\max} ของกราฟ $C-V$ จะมีแนวโน้มลดลงตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก N_{SS} ที่มีค่าลดลง และเมื่อทำการไบแอสย้อนกลับให้กับไดโอดที่ประติษฐานขึ้นมา รอยต่อชอตต์กีจะได้รับการไบแอสตรง ส่งผลให้ C_{\max} ของกราฟ $C-V$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดแรงดันไบแอสย้อนกลับที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า N_{SS} มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า N_{SS} ที่สัมพันธ์กับ $E_{SS} - E_V$ จะแสดงดังรูปที่ 4.71

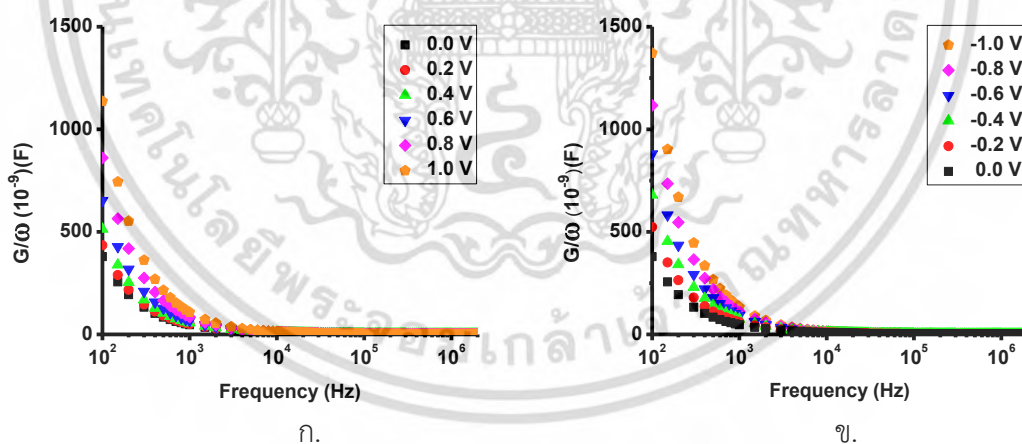


รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_{SS} กับ $E_{SS} - E_V$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe}/p\text{-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

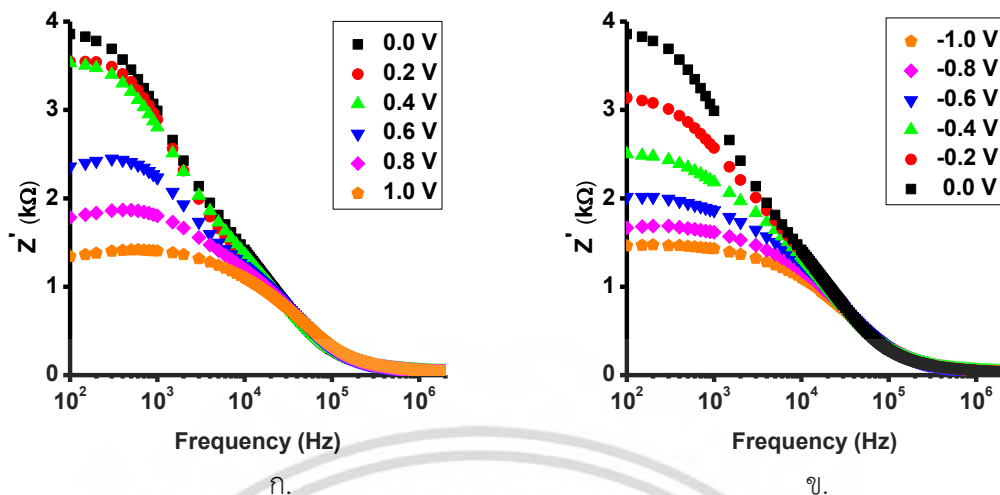
- ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
 ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์



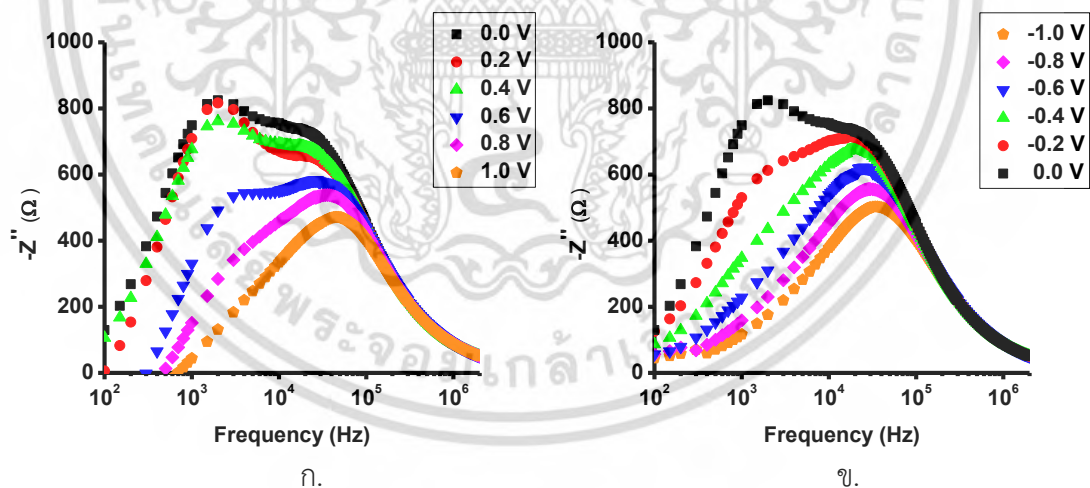
รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

- ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
 ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

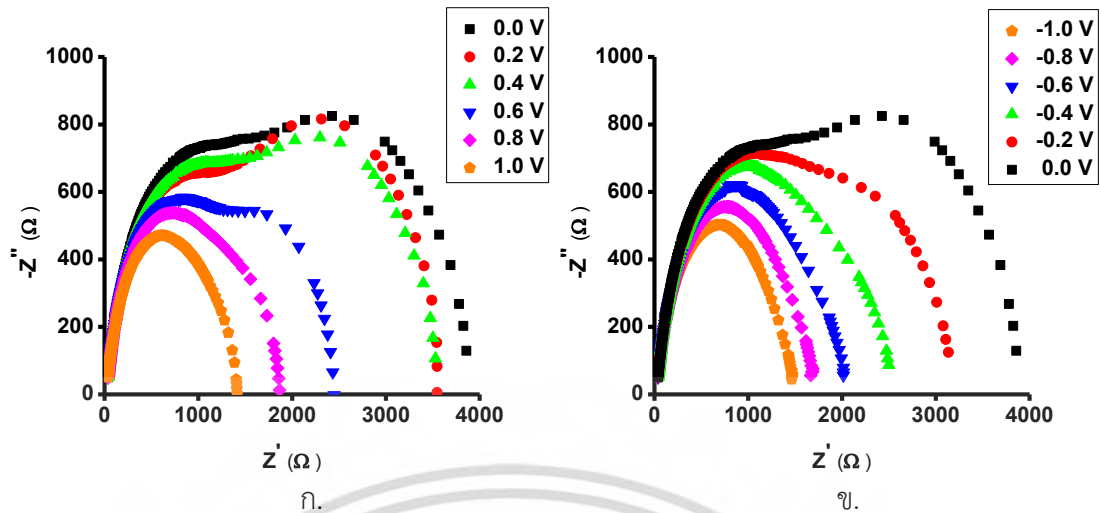


รูปที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
 ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
 ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์



รูปที่ 4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
 ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
 ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรีปที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
 ก. ภายใต้การไบแอสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์
 ข. ภายใต้การไบแอสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์

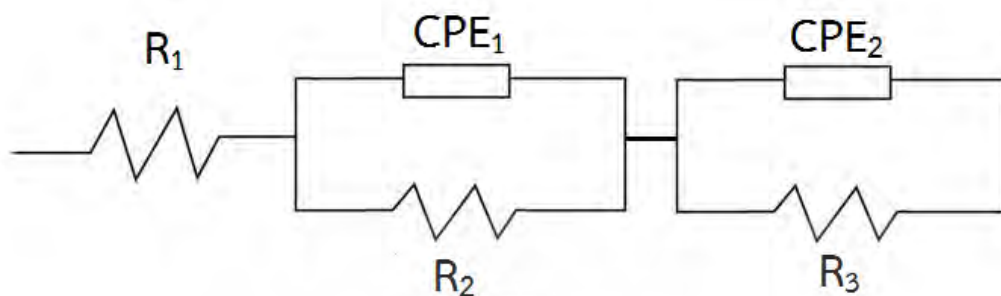
ขณะที่ทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ย่านต่ำความนำไฟฟ้าของกราฟ $G-f$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นค่าความนำไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น ที่ได้รับการไบแอสตรง แต่เมื่อทำการไบแอสย้อนกลับให้กับไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ย่านต่ำความนำไฟฟ้าของกราฟ $G-f$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นค่าความนำไฟฟ้าของรอยต่อขอตติ์ที่ขั้วไฟฟ้านด้านหลังที่ได้รับการไบแอสตรง

ขณะที่ทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ย่านต่ำจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') ของกราฟ $Z'-f$ จะมีแนวโน้มลดลงตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อพี-เอ็น ที่ได้รับการไบแอสตรง แต่เมื่อทำการไบแอสย้อนกลับให้กับไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ย่านต่ำจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของกราฟ $Z'-f$ จะมีแนวโน้มลดลงตามขนาดของแรงดันย้อนกลับที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อขอตติ์ที่ขั้วไฟฟ้านด้านหลังที่ได้รับการไบแอสตรง

สำหรับกราฟ $Z''-f$ ทั้งขณะไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ ที่ความถี่ต่ำ ($\approx 2\text{kHz}$) จะปรากฏพีกของสถานะผิวเชื่อมต่อปรากฏให้เห็นอย่างโดดเด่น

จากกราฟความสัมพันธ์ $Z''-Z'$ จะปรากฏเป็นกราฟรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกัน ขณะที่ทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น กราฟรูปครึ่งวงกลมจะแสดงให้เห็นสองพีกที่ความถี่ต่ำ และที่ความถี่สูง ซึ่งพีกที่ความถี่ต่ำจะสัมพันธ์อยู่กับสถานะผิวเชื่อมต่อของรอยต่อขอตติ์ ส่วนพีกที่

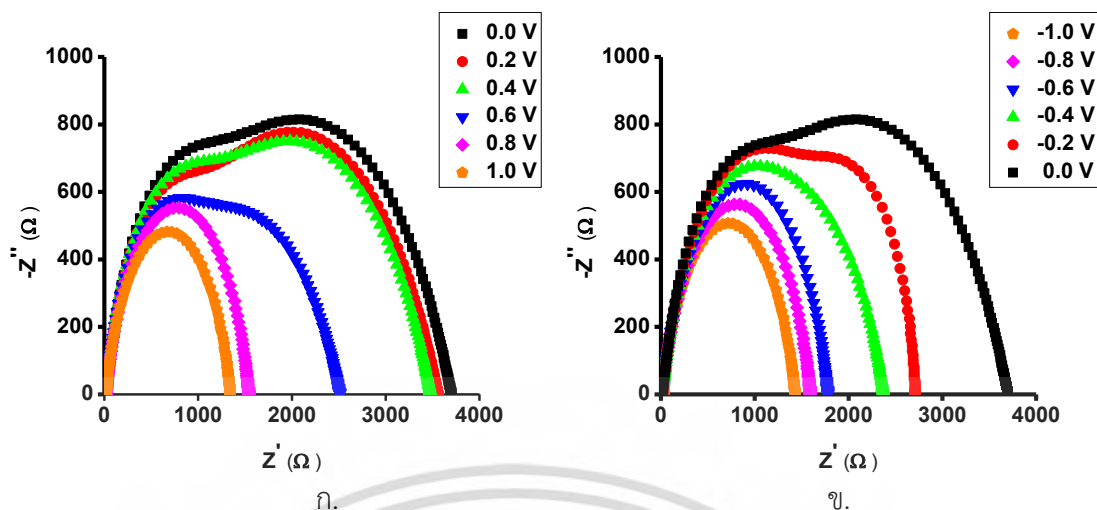
ความถี่สูงจะสัมพันธ์อยู่กับบริเวณพองพาทะของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งวงจรมูลสำหรับการใช้ในการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะแสดงยังรูปที่ 4.77



รูปที่ 4.77 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

- เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานอนุกรมที่มีผลมาจากความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งความต้านทานของผิวสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้า
- CPE_1 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element) ของรอยต่อพี-เอ็น
- R_2 คือ ความต้านทานชั้นของรอยต่อพี-เอ็น
- CPE_2 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ของรอยต่อตติ
- R_3 คือ ความต้านทานชั้นของรอยต่อตติ

จากการจำลองแบบพบว่า ที่ความถี่ต่ำกราฟของการจำลองแบบไม่แนบสนิทกับกราฟ $Z'' - Z'$ ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีสถานะผิวเชื่อมต่อที่บริเวณรอยต่อขอตติที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง อีกทั้งสถานะผิวเชื่อมต่อนี้เป็นระดับพลังงานที่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือกรวมจรมูลที่ใช้จำลองแบบกับสถานะผิวเชื่อมต่อได้ ส่วนที่ความถี่สูงกราฟของการจำลองแบบแนบสนิทกับกราฟ $Z'' - Z'$ ที่ได้จากการทดลอง แสดงว่ารอยต่อพี-เอ็น ไม่มีผลของสถานะผิวเชื่อมต่อปรากฏเด่นชัด



รูปที่ 4.78 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

ก. ภายใต้การไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0 ถึง 1 โวลต์

ข. ภายใต้การไบอัสย้อนกลับในช่วงแรงดัน 0 ถึง -1 โวลต์

ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

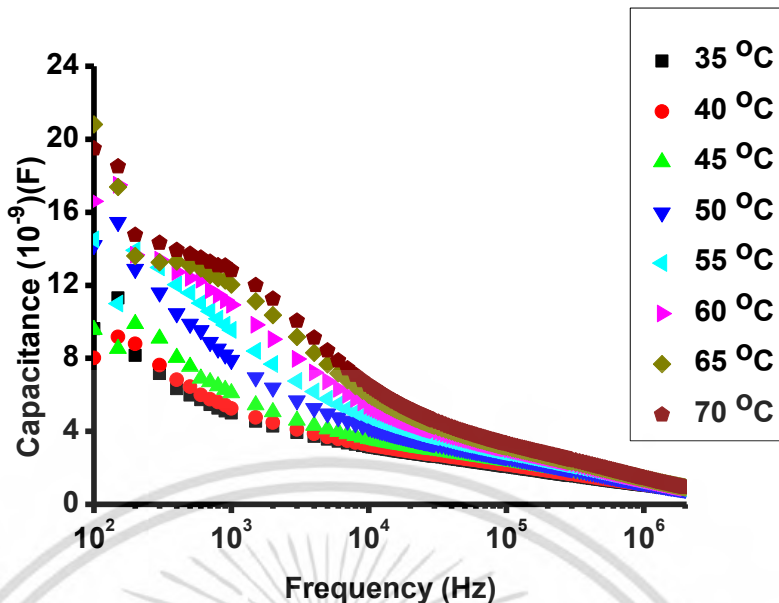
Voltage (V)	Extracted Parameters								
	R _s (Ω)	P-N junction			C _p (F)	τ (s)	f _{max} (Hz)	ω _{max} (rad)	ωτ
		R _p (Ω)	CPE ₁ P ₁	n					
-1.0	9.7	413.5	4.21×10 ⁻⁸	0.793	-	-	-	-	-
-0.8	10.1	440.7	7.36×10 ⁻⁸	0.838	-	-	-	-	-
-0.6	10.5	676.5	4.83×10 ⁻⁸	0.784	-	-	-	-	-
-0.4	10.8	724.2	2.71×10 ⁻⁸	0.858	-	-	-	-	-
-0.2	11.5	770.8	3.88×10 ⁻⁸	0.825	2.92×10 ⁻⁹	2.99×10 ⁻⁵	4.69×10 ⁴	2.95×10 ⁵	1.014
0.0	12.7	856.2	1.33×10 ⁻⁸	0.921	5.01×10 ⁻⁹	1.14×10 ⁻⁶	3.98×10 ⁴	2.50×10 ⁵	1.073
0.2	11.1	824.7	9.52×10 ⁻⁹	0.943	4.69×10 ⁻⁹	7.85×10 ⁻⁵	4.49×10 ⁴	2.81×10 ⁵	1.085
0.4	10.0	751.9	1.26×10 ⁻⁸	0.921	4.67×10 ⁻⁹	9.47×10 ⁻⁶	4.53×10 ⁴	2.85×10 ⁵	1.000
0.6	10.9	652.3	8.13×10 ⁻⁹	0.958	4.77×10 ⁻⁹	5.30×10 ⁻⁶	5.16×10 ⁴	3.24×10 ⁵	1.009
0.8	10.5	452.4	3.82×10 ⁻⁸	0.799	-	-	-	-	-
1.0	9.9	423.5	3.66×10 ⁻⁸	0.803	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

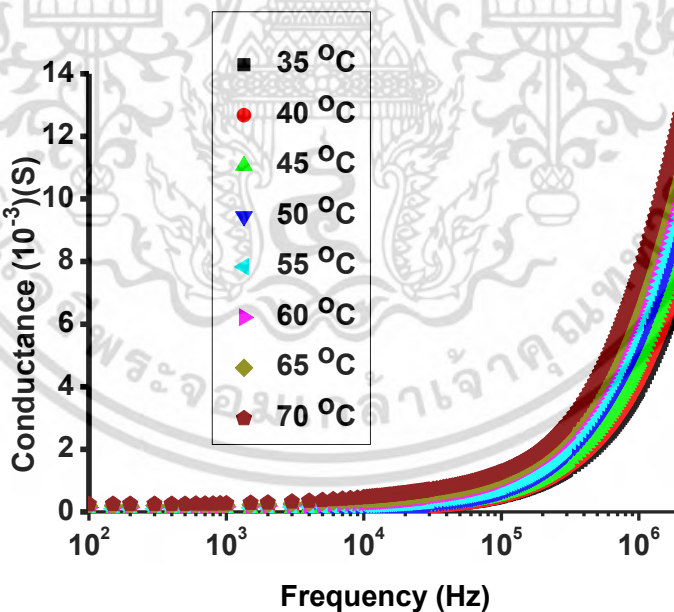
ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

Voltage (V)	Extracted Parameters								
	R _s (Ω)	Schootty junction							ωτ
		CPE ₂			C _p (F)	τ (s)	f _{max} (Hz)	ω _{max} (rad)	
		R _p (Ω)	P ₁	n					
-1.0	9.7	1433.3	4.99×10 ⁻⁸	0.879	-	-	-	-	-
-0.8	10.1	1577.2	4.43×10 ⁻⁸	0.789	-	-	-	-	-
-0.6	10.5	1696.8	3.67×10 ⁻⁸	0.843	-	-	-	-	-
-0.4	10.8	2320.3	4.82×10 ⁻⁸	0.691	-	-	-	-	-
-0.2	11.5	2791.1	6.87×10 ⁻⁸	0.916	3.13×10 ⁻⁸	8.75×10 ⁻⁵	1.82×10 ⁻³	1.15×10 ⁻⁴	1.004
0.0	12.7	2990.9	1.03×10 ⁻⁶	0.623	3.11×10 ⁻⁸	9.31×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻³	1.09×10 ⁻⁴	1.022
0.2	11.1	2732.7	1.37×10 ⁻⁶	0.602	3.41×10 ⁻⁸	9.31×10 ⁻⁵	1.81×10 ⁻³	1.13×10 ⁻⁴	1.057
0.4	10.0	2614.2	1.14×10 ⁻⁶	0.617	3.19×10 ⁻⁸	8.45×10 ⁻⁵	2.16×10 ⁻³	1.86×10 ⁻⁴	1.095
0.6	10.9	2347.1	1.11×10 ⁻⁶	0.611	2.51×10 ⁻⁸	5.89×10 ⁻⁵	2.75×10 ⁻³	1.72×10 ⁻⁴	1.017
0.8	10.5	1514.8	9.74×10 ⁻⁷	0.741	-	-	-	-	-
1.0	9.9	1285.4	1.38 ×10 ⁻⁶	0.729	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

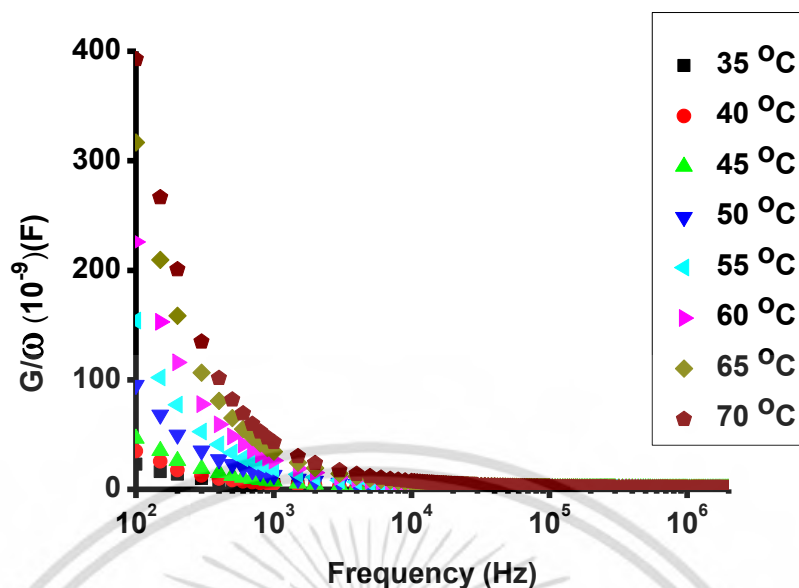


รูปที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

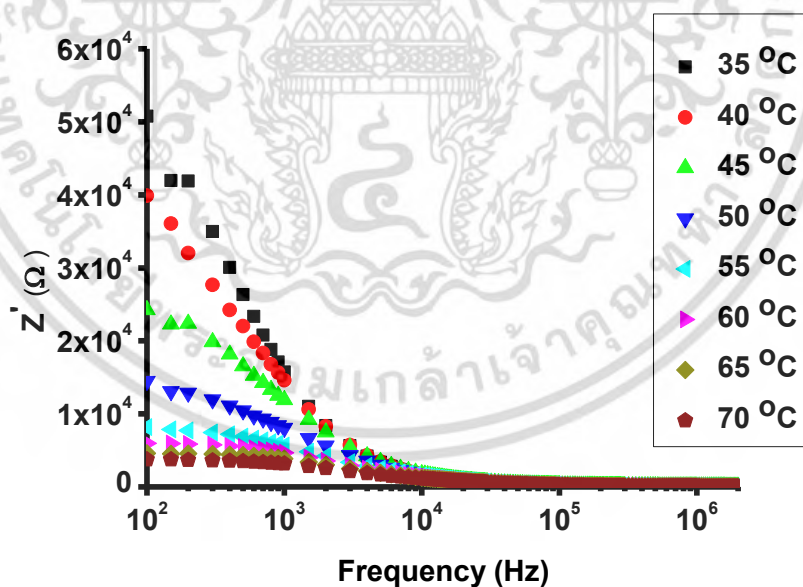


รูปที่ 4.80 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

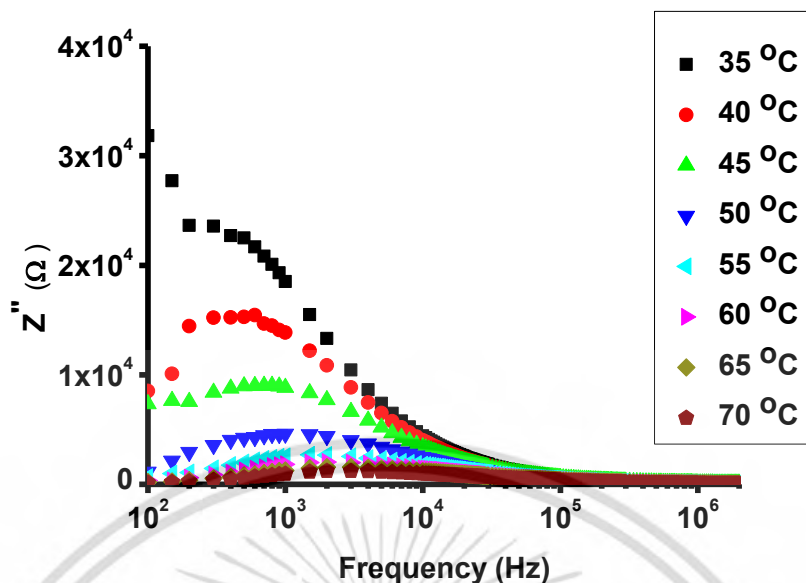


รูปที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

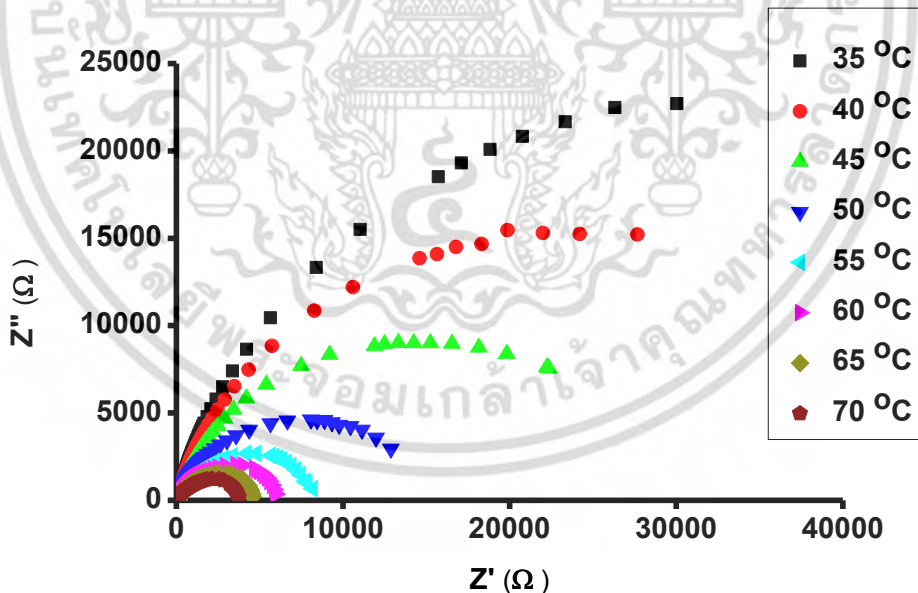


รูปที่ 4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdSe/p-Cu}_2\text{O}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

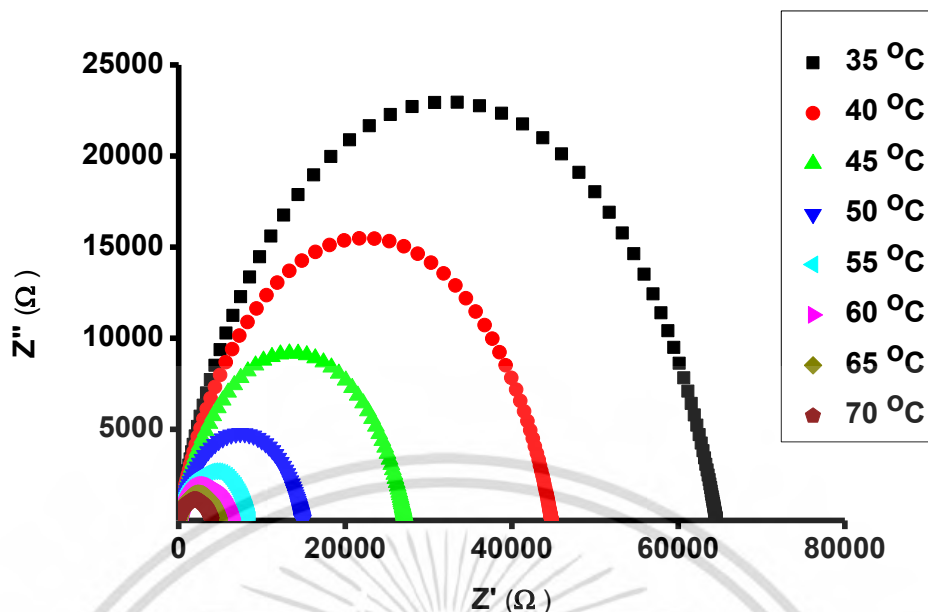


รูปที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.85 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

Temperature (°C)	Extracted Parameters								
	R _s (Ω)	CPE			C _p (F)	τ (s)	f _{max} (Hz)	ω _{max} (rad)	ωτ
		R _p (Ω)	P ₁	n					
35	3.89	6.46×10 ⁴	3.48×10 ⁻⁸	0.7875	6.71×10 ⁻⁹	4.33×10 ⁻⁴	3.98×10 ²	2.50×10 ³	1.083
40	3.34	4.48×10 ⁴	4.51×10 ⁻⁸	0.7706	7.10×10 ⁻⁹	3.18×10 ⁻⁴	5.29×10 ²	3.32×10 ³	1.056
45	3.02	2.72×10 ⁴	6.02×10 ⁻⁸	0.7555	7.56×10 ⁻⁹	2.0 ×10 ⁻⁴	8.09×10 ²	5.08×10 ⁴	1.044
50	2.55	1.49×10 ⁴	1.00×10 ⁻⁷	0.7274	8.78×10 ⁻⁹	1.31×10 ⁻⁴	1.07×10 ³	6.74×10 ⁴	0.882
55	2.01	8.59×10 ³	1.35×10 ⁻⁷	0.7159	9.19×10 ⁻⁹	7.89×10 ⁻⁵	2.08×10 ³	1.31×10 ⁴	1.031
60	1.52	6.32×10 ³	1.63×10 ⁻⁷	0.7067	9.42×10 ⁻⁹	5.95×10 ⁻⁵	2.89×10 ³	1.82×10 ⁴	1.081
65	1.22	4.84×10 ³	2.01×10 ⁻⁷	0.6961	9.77×10 ⁻⁹	4.73×10 ⁻⁵	3.33×10 ³	2.09×10 ⁴	0.991
70	1.00	3.94×10 ³	2.88×10 ⁻⁷	0.6732	1.07×10 ⁻⁸	4.22×10 ⁻⁵	3.84×10 ³	2.41×10 ⁴	1.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานกระตุ้นหาได้จากความสัมพันธ์

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.40)$$

จัดรูปแบบใหม่จะได้ว่า

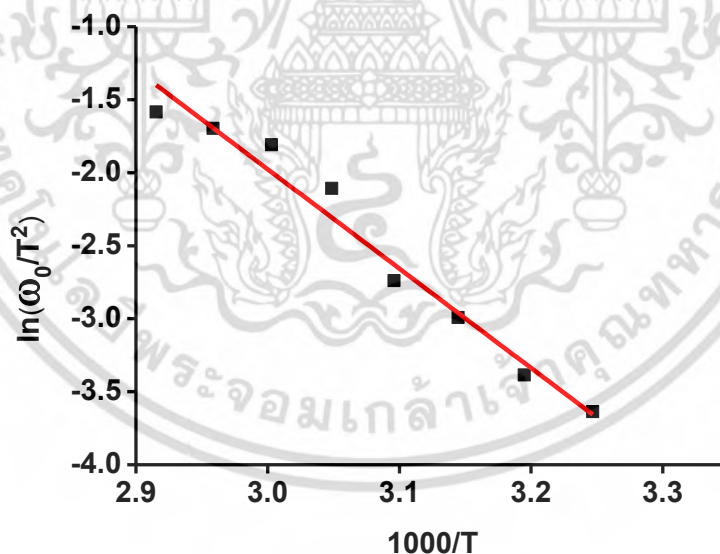
$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.41)$$

และหาค่า σ_T ได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th}N_c} \quad (4.42)$$

เมื่อ ξ_0 คือ พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุ

σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับอิเล็กตรอนของประจุ



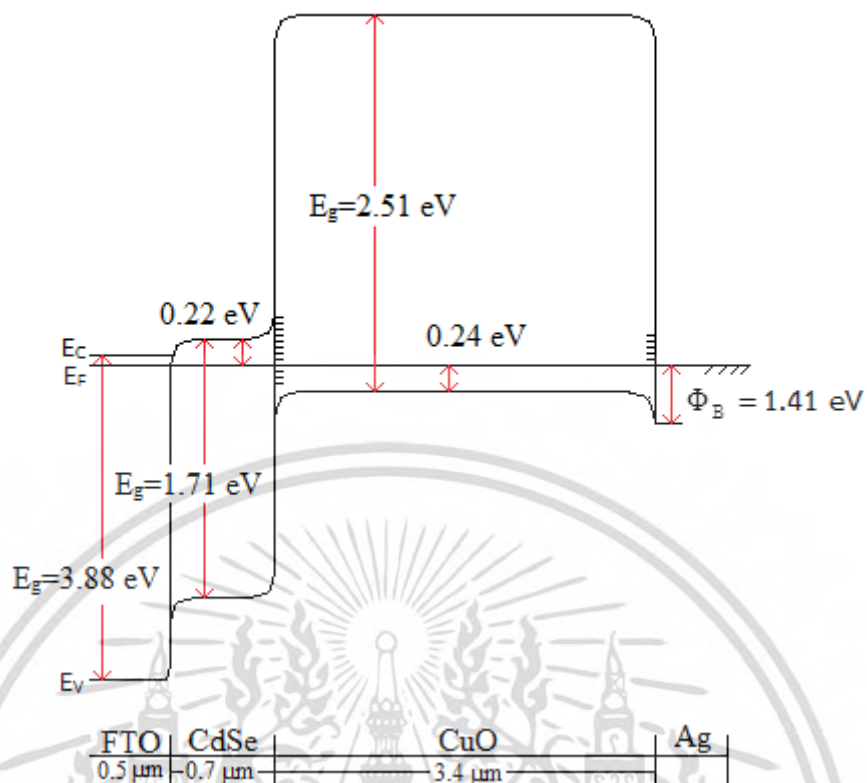
รูปที่ 4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วย ฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

Method	Temperature (°C)	ω_0	E_a (eV)	ξ_0 (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_t (cm ⁻²)
Z'-Z''	35	2.50x10 ³	0.587	1.029x10 ⁸	1.419x10 ⁻¹⁰
	40	3.32x10 ³			
	45	5.08x10 ⁴			
	50	6.74x10 ⁴			
	55	1.31x10 ⁴			
	60	1.82x10 ⁴			
	65	2.09x10 ⁴			
	70	2.41x10 ⁴			

ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct energy gap) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe มีค่าเท่ากับ 1.71 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O มีค่าเท่ากับ 2.51 อิเล็กตรอนโวลต์ จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปเขียนโครงร่างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ได้ดังรูปที่ 4.87 โดยมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) ซึ่งประมาณได้จากจุดตัดแกน x ของกราฟ $1/C^2$ กับ V ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 0.839 โวลต์ โดยสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ดังรูปที่ 4.87



รูปที่ 4.87 โครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ใช้เวลาในการระเหิดนาน 5 นาที โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยในขณะที่ทำการระเหิดได้มีการควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับให้มีความแตกต่างกันประมาณ 100 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอยึดติดแน่นกับแผ่นกระจกสไลด์ ในกรณีที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ฟิล์มบางจะมีสีดำ แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 1.0 ฟิล์มบางจะมีสีเหลือง

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn น้อยกว่า 0.2 ($x < 0.2$) ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเอกซะโกนัลหรือเวิร์ทไซท์ โดยมีระนาบ (002) เป็นระนาบที่โดดเด่น แต่เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn อยู่ในช่วง $0.2 \leq x \leq 0.8$ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบเอกซะโกนัลและคิวบิกอยู่ร่วมกัน กล่าวคือ มีทั้งระบบ (002) และ (101) ของโครงสร้างผลึกแบบเอกซะโกนัลและระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก เกิดขึ้นร่วมกัน และเมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn สูงกว่า 0.8 ($x > 0.8$) จะโครงสร้างแบบคิวบิกแบบซิงค์เบลนด์ โดยมีระนาบ (111) เป็นระนาบที่โดดเด่น

จากการศึกษากราฟ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (a_H) และ (c_H) ของโครงสร้างผลึกแบบเอกซะโกนัล และ (a_C) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก จะมีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น และขนาดของเกรนของฟิล์มบางมีค่าลดลงตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยถ่ายภาพผิวหน้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0 (CdSe) มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 1.0 (ZnSe) และ ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอมที่เพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์ธาตุ ด้วยเทคนิค EDS และ XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า ฟิล์มบางประกอบไปด้วย 3 ธาตุหลักๆ คือ Cd, Zn และ Se ตามลำดับ จากเทคนิค EDS แสดงถึงการลดลงของปริมาณของธาตุ Cd ตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น และ การขาดหายไปธาตุ Se ช่วยยืนยันได้ถึงการมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวชนิดเอ็นของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงในย่านตามองเห็น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะปรากฏที่ความยาวคลื่นที่น้อยลง และ จากการส่งผ่านแสงสามารถนำไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากขึ้นตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงในย่านอินฟราเรด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า ฟิล์มบางแสดงการสั่นแบบยีน-หด ของพันธะเคมีระหว่างอะตอมของ Cd-Se, Zn-Se, C-C, C-H และ O-H ตามลำดับ

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.8 และ 1.0 ฟิล์มบางมีกลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 ฟิล์มบางมีกลไกการนำไฟฟ้า 3 แบบ คือ กฎของโอห์ม กฎของมอตต์-เกอร์นีย์ และกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ที่ไม่คำนึงกับดักพาหะ ตามลำดับ

จากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่า ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.8 และ 1.0 ฟิล์มบางมีการตอบสนองต่อแสงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 ฟิล์มบางมีการตอบสนองต่อแสงที่ช้ากว่า 1 วินาที

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ประมาณ 1.0 โวลต์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ แสดงถึงรอยต่อพี-เอ็น และรอยต่อแบบชอตต์กีที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่มีอิทธิพลต่อความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe/p-Cu₂O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานของรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) อิทธิพลของรอยต่อแบบชอตต์กีที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะหายไปเมื่อสิ่งประดิษฐ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sivaramamoorthy, K. Asath Bahadur, S. Kottaisamy, M. and Murali, K.R. 2010. "Structural, optical and photoconductive properties of electron beam evaporated CdS_xSe_{1-x} films." Cryst. Res. Technol. 45, No. 4, 414 – 420 (2010).
- [2] Sheng, Y. Wei, J. Liu, B. and Peng, L. 2004. "A facile route to synthesize CdZnSe core-shell-like alloyed quantum dots via cation exchange reaction in aqueous system." Materials Research Bulletin 57 (2014) 67–71
- [3] Venugopal, R. Lin, P.I. and Chen, Y.T. 2006. "Photoluminescence and Raman Scattering from Catalytically Grown $Zn_xCd_{1-x}Se$ Alloy Nanowires." J. Phys. Chem. B 2006, 110, 11691-11696.
- [4] T. Mahalingam, T. Dhanasekaran, V. Rajendran, S. Chandramohan, R. Luis, I. and Sebastian, P.J. 2012. "Electrosynthesis and Studies on CdZnSe Thin Films." Journal of New Materials for Electrochemical Systems 15, xxx-xxx (2012).
- [5] Mezrag, F. KaraMohamed, W and Bouarissa, N. 2010. "The effect of zinc concentration upon optical and dielectric properties of $Cd_{1-x}Zn_xSe$." Physica B405(2010)2272–2276.
- [6] Mahmood¹, A. Shaista, R. Shah, A. Aziz¹, U. Ahmed, E. Ali, S. and Raza, Q. 2011. "Ellipsometric analysis of $Cd_{1-x}Zn_xSe$ thin films prepared by a thermal evaporation technique." Phys. Scr. 83 (2011) 065706 (7pp).
- [7] Suthagar, J. Rajesh, S. Perumal, K. Balasubramaniam, T. and Suthan Kissinger, N.J. 2010. "Growth and Characterization of Wide-Gap $Cd_{1-x}Zn_xSe$ Ternary Alloys by Using Electron Beam Evaporation Technique." ACTA PHYSICA POLONICA A-Vol. 117 (2010).
- [8] Ham, S. Jeon, S. Lee, U. Paeng, K.J. and Myung, N. 2008. "Photoelectrochemical Deposition of CdZnSe Thin Films on the Se-Modified Au Electrode." Bull. Korean Chem. Soc. 2008, Vol. 29, No. 5 939.
- [9] Deo, S.R. Singh, A.K. Deshmukh, L. Paliwal, L.J. Singh, R.S. and Adhikari, R. 2014. "Structural, morphological and optical studies on chemically deposited nanocrystalline CdZnSe thin films." Journal of Saudi Chemical Society (2014) 18, 327–339.
- [10] Bayansal, F. Kahraman, S. Cankaya, G. Cetinkara, H.A. Gudera, H.S. and Cakmak, H.M. 2011. "Growth of homogenous CuO nano-structured thin films by a simple solution method." Journal of Alloys and Compounds 509 (2011) 2094–2098.
- [11] Shinde, S.K. Dubal, D.P. Ghodake, G.S. Kim, D.Y. and Fulari, V.J. 2016. "Morphological tuning of CuO nanostructures by simple preparative parameters in SILAR method and their consequent effect on supercapacitors." Nano-Structures & Nano-Objects 6 (2016) 5–13.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Mazhar, M.E. Faglia, G. Comini, E. Zappa, D. Baratto, C. and Sberveglieri, G. 2016. "Kelvin probe as an effective tool to develop sensitive p-type CuO gassensors." *Sensors and Actuators B* 222 (2016) 1257–1263.
- [13] Chang, H. Kao, M.J. Cho, K.C. Chen, S.L. Chu, K.H. and Chen C.C. 2011. "Integration of CuO thin films and dye-sensitized solar cells for thermoelectric generators." *Current Applied Physics* 11 (2011) S19eS22.
- [14] Akaltun, Y. 2015. "Effect of thickness on the structural and optical properties of CuO thin films grown by successive ionic layer adsorption and reaction." *Thin Solid Films* 594 (2015) 30–34.
- [15] Shabu, R. Moses Ezhil Raj, A. Sanjeeviraja, C. and Ravidhas, C. 2015. "Assessment of CuO thin films for its suitability as window absorbing layer in solar cell fabrications." *Materials Research Bulletin* 68 (2015) 1–8.
- [16] Samarasekara, P. and Yapa, N.U.S. 2007. "Effect of sputtering conditions on the gas sensitivity of copper oxide thin films." *Sri Lankan Journal of Physics*, Vol. 8 (2007) 21-27.
- [17] Mukherjee, N. and Mondal, A. 2010. "Chemical bath deposition of thin films of CuO nanorods and their characterisation." *Int. J. Nanomanufacturing*, Vol. 5, Nos. 1/2, 2010.
- [18] Jayaprakash, J. Srinivasan, N. Chandrasekaran, P. and Girija E.K. 2015. "Synthesis and characterization of cluster of grapes like pure and Zinc-doped CuO nanoparticles by sol-gel method." *Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 136 (2015) 1803–1806.
- [19] Al-Ghamdi, A.A. Khedr, M.H. Ansari M.S. Hasan, P.M.Z. Abdel-wahab, M.Sh. and Farghali, A.A. 2016. "RF sputtered CuO thin films: Structural, optical and photocatalytic behavior." *Physica E* 81(2016)83–90.
- [20] Gopalakrishna, D. Vijayalakshmin, K. and Ravidhas, C. 2013. "Effect of annealing on the properties of nanostructured CuO thin films for enhanced ethanol sensitivity." *Ceramics International* 39(2013)7685–7691.
- [21] Guo, L. Zhao, M. Zhuang, D.M. Cao, M. Ouyang, L. Li, X. Sun, R. and Gao, Z. 2015. "Influences of CuO phase on electrical and optical performance of Cu₂O films prepared by middle frequency magnetron sputtering." *Applied Surface Science* 359 (2015) 36–40.
- [22] รัฐินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี Zn ในปริมาณสูง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [23] Adachi, S. 2005. *Properties of Group IV, III-V and II-VI Semiconducting*, John Wiley & Sons, Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Adachi, S. 2009. Properties of Semiconducting Alloys Group IV, III-V and II-VI Semiconducting, John Wiley & Sons, Ltd.
- [25] จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยต่อเสนอคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] Cullity, B.D. 1956. Elements of X-rays Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc.; pp 9-14.
- [27] Kittel, C. 1971. Introduction of Solid State Physics. 4th ed. New York: Jon Wiley & Sons Inc.; pp 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
- [28] Kittel C. 2005. Introduction to Solid State Physics, 8th ed. United States of America:John Wiley & Son, Inc.
- [29] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษาการยอต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [30] งามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [33] งามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง $CdTe$ โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [34] จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [35] งามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] นัฏฐกร แดงสุวรรณ. 2553. “การศึกษาสมบัติบางประการของฟิล์มบาง CdS : Bi.” โครงการงานพิเศษ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ญัฐพร พรหมรส. 2552. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [38] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2557. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [39] เมธิรา ร่วมสุข. 2555. “สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [40] Swanepoel. R. 1983. “Determination on the Thickness and Optical Properties of Amorphous Silicon.” J. Phys. E:Sci. Instrum. 16: 1214-1222.
- [41] Wemple. S.H. and DiDomenico, M. 1971. “Behavior of the Electronic Dielectric Constant in Covalent and Ionic Materials” Phys. Rev. B. 3(4): 1338-1351.
- [42] Wemple. S.H. 1973. “Refractive Index Behavior of Amorphous Semiconductors and Glasses.” Phys. Rev. B. 7(8):3767-3777.
- [43] Jackson, J. D. 1999. Classical Electrodynamics, John Wiley & Son. Inc.
- [44] David J. Griffiths. 1999. Introduction to Electrodynamics, 3rd ed. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey.
- [45] Jiang, F. Shen, H. and Wang, W. 2012. “Optical and Electrical Properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Film Prepared by Sulfurization Method.” J. Elec. Mater. 41(8): 2204-2209.
- [46] Studenikin, S.A. Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. “Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution.” J. Appl. Phys. 83(4): 2104-2111.
- [47] Gu, G. Kane, M.G. Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. “Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors.” Appl. Phys. Lett. 87: 243512-1-243512-3.
- [48] Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. “Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors.” Appl. Phys. Lett. 99: 113301-1-113301-3.
- [49] Johnson, C. Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. “Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN.” Appl. Phys. Lett. 68(13): 1808-1810.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction." *Appl. Phys. Lett.* 90, Lett. 90: 243106-1-243106-3.
- [51] M.A. Lampert and P. Mark. *Current injection in solids*. Academic press, New York and London.
- [52] S. Takeshita. 9-2008. *Modeling of space-charge-limited current injection incorporating an advanced model of the poole-frenkel effect*. Clemson University.
- [53] F.C. Chiu. "A review on conduction mechanisms in dielectric films." *Advances in materials science and engineering*. Volume 2014.
- [54] S. Venkatachalam, D. Soundararajan, P. Peranantham, D. Mangalaraj, Sa.K. Narayandass, S. Velumani and P. Schabes-Retchkiman. 2007. "Spectroscopic ellipsometry (SE) studies on vacuum-evaporated ZnSe thin films." *Materials Characterization* 58 (2007) 715–720.
- [55] B.M. Basol and O.M. Stafsudd. 1981. "Observation of electron traps in electrochemically deposited CdTe films." *Solid-State Electronic Vol.24*, pp.121-125.
- [56] Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. "Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors." *Appl. Phys. Lett.* 97: 143510-1- 143510-3.
- [57] Luo, J. Adler, A.U. Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. "Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis." *J. Appl. Phys.* 113: 153709-1-153709-8.
- [58] Guo, L. Wang, X. Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers." *Appl. Phys. Lett.* 102: 072103-1-072103-3.
- [59] Zakria M, Mahmood A, Shah A, Raza Q, Khan TM, Ahmed E. 2012. "Tunability of physical properties of (Cd:Zn)S thin film by Close Space Sublimation Process (CSSP)." *Progress in Natural Science: Materials International*.;22(4):281–287.
- [60] Gross, E and Zakharchenia, B.P. 1953. *Doklady Akad. Nauk SSSR*, 90, 745 (1953)
- [61] Gross, E. Zakharchenia, B.P. and Reinov, N.M. 1953. *Doklady Akad. Nauk SSSR*, 92, 265.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Pattern : 77-2307		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd Se		2th	l	h	k	l
Cadmium Selenide		23.882	100	1	0	0
		25.391	59	0	0	2
		27.097	76	1	0	1
		35.136	34	1	0	2
		41.999	72	1	1	0
		45.810	68	1	0	3
		48.888	11	2	0	0
		49.718	42	1	1	2
		50.699	10	2	0	1
		52.150	1	0	0	4
		55.879	7	2	0	2
		58.130	1	1	0	4
		63.884	19	2	0	3
		66.379	13	2	1	0
		67.880	7	2	1	1
		69.099	1	1	1	4
		71.902	13	1	0	5
		72.296	5	2	1	2
		74.268	<1	2	0	4
		76.735	7	3	0	0
		79.435	17	2	1	3
		82.365	6	3	0	2
		82.496	2	0	0	6
		86.916	6	2	0	5
		87.422	1	1	0	6
		89.181	<1	2	1	4
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 4.29900 c = 7.01000 Z = 2		Mol. weight = 191.37 Volume [CD] = 112.20 Dx = 5.665 I/cor = 5.78				
ICSD COLLECTION CODE : 060630 REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakineos, Stevenso REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982,35 415 424. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 40, page 530, (1984) : Stevenson, A.W., Barnea, Z.						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Pattern : 5-522		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Zn Se		2th	l	h	k	l
		27.224	100	1	1	1
		31.532	1	2	0	0
		45.234	70	2	2	0
		53.649	44	3	1	1
		56.216	1	2	2	2
		65.912	9	4	0	0
		72.740	13	3	3	1
		74.886	1	4	2	0
		83.563	15	4	2	2
		89.923	8	5	1	1
		100.513	4	4	4	0
		107.090	8	5	3	1
		109.355	1	6	0	0
		118.611	4	6	2	0
		126.085	2	5	3	3
		128.702	1	6	2	2
		140.674	2	4	4	4
Stilleite, syn / Zinc Selenide						
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 144.34				
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 182.00				
a = 5.66700		Dx = 5.268				
		Dm = 5.420				
Z = 4						
<p>OPTICAL DATA : B=2.89 SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Color on specimen from Shinkelobwe, Zaire. ANALYSIS : Spectroscopic analysis: <0.01% Ba, K, Mo, Na; <0.001% Al, Ca, Fe, Mg, Ni, Pd, Si; <0.0001% Ag, Bi, Cd, Cu, Mn. TEMP. OF DATA COLLECTION : X-ray pattern at 25 C. GENERAL COMMENTS : Also hexagonal form. ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-690. DELETED AND REJECTED BY : Deleted by 37-1463.</p>						
<p>*Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 3, page 23, (1954) primary reference : Swanson, Fuyat. *Am. Mineral., volume 56, page 360, (1971) optical data.</p>						
Radiation : CuK α 1		Filter : Beta				
Lambda : 1.54050		d-sp : Not given				
SS/FOM : F17= 29(0.0340,17)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

Pattern : 75-1531		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cu ₂ O		2th	l	h	k	l
Cuprite / Copper Oxide		29.632	5	1	1	0
		36.503	100	1	1	1
		42.402	35	2	0	0
		52.581	1	2	1	1
		61.520	27	2	2	0
		65.703	<1	2	2	1
		69.753	<1	3	1	0
		73.699	20	3	1	1
		77.567	4	2	2	2
		85.153	<1	3	2	1
Lattice : Cubic S.G. : Pn3m (224) a = 4.26000 Z = 2		Mol. weight = 143.09 Volume [CD] = 77.31 Dx = 6.147 I/cor = 8.28				
ICSD COLLECTION CODE : 031057 TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 57, page 253, (1922) : Niggli, P.						
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย นพณัฐ เดชะคำภู
วัน เดือน ปีเกิด	4 ตุลาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	219/32 ถ.นิตโย ต.ธาตุเชิงชุม อ.เมือง จ.สกลนคร
ประวัติการศึกษา	2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	STRUCTURAL, OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $Cd_{1-x}Zn_xSe$ THIN FILMS PREPARED BY CLOSED SPACE SUPLIMATION METHOD.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้