

สมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดแบบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดย
วิธีออบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดย
วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง

HETEROJUNCTION PROPERTIES OF CBD- $Cd_{1-x}Zn_xS$ AND
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERED CuO THIN FILM DIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-030-010

สมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดแบบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดย
วิธีออบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดย
วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์

HETEROJUNCTION PROPERTIES OF CBD- $Cd_{1-x}Zn_xS$ AND
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERED CuO THIN FILM DIODE



จารุวรรณ มีนาง
JARUWAN MEENANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-SC-M-030-010

HETEROJUNCTION PROPERTIES OF CBD-Cd_{1-x}Zn_xS AND
REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERED CuO THIN FILM DIODE



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-SC-M-030-010



COPYRIGHT 2018

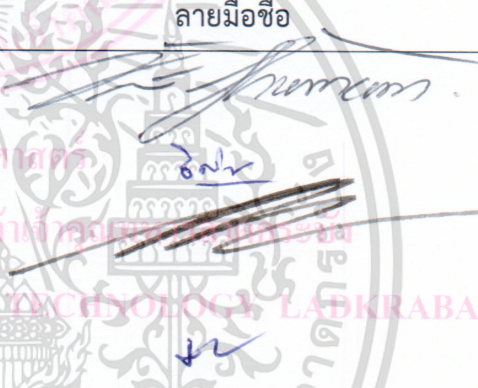
FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “สมบัติรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดแบบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีออบ
สารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์ริง”
“HETEROJUNCTION PROPERTIES OF CBD- $Cd_{1-x}Zn_xS$ AND REACTIVE DC
MAGNETRON SPUTTERED CuO THIN FILM DIODE”

ชื่อนักศึกษา นางสาวจากรุวรรณ มีนาง
รหัสประจำตัว 59605087
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ประธานกรรมการ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) รศ.วิชิต ศิริโชติ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แก้วชัต)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่ 10 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดแบบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟทีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจรรุวรรณ มีนาง
รหัสประจำตัว	59605087
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟทีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ FTO จากนั้นได้ทำการศึกษากลไกการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อที่ได้จากลักษณะเฉพาะของการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ และทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอด ได้แก่ แพกเตอร์อุดมคติ ความสูงของกำแพงศักย์ และความต้านทานอนุกรม ภายใต้สภาวะไบแอสตรงที่อุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิซชัน วิธีของวงและวิธีของนอร์ด พบว่าความสูงของกำแพงศักย์ และแพกเตอร์อุดมคติที่คำนวณได้มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิลดลง ความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์จะมีค่าลดลง แต่แพกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น สมบัติของสถานะผิวเชื่อมต่อของไดโอดดังกล่าวสามารถศึกษาได้โดยการวัดลักษณะเฉพาะของความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ และจากการศึกษาลักษณะเฉพาะของความจุไฟฟ้า-ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้า ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าความจุไฟฟ้ามีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น เมื่อค่าไบแอสกลับทางเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลมาจากการจับพาหะของสถานะผิวเชื่อมต่อ จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วง 25-65 องศาเซลเซียส สามารถนำไปคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ รวมทั้งได้นำเสนอแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ดังกล่าว

คำสำคัญ : ไดโอด $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ วิธีอบสารละลายเคมี วิธีรีแอคทีฟทีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง
สถานะผิวเชื่อมต่อ สมบัติทางไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าเป็นลบ

Thesis Title	Heterojunction Properties of CBD-Cd _{1-x} Zn _x S and Reactive dc Magnetron Sputtered CuO Thin Film Diode
Student Name	Miss Jaruwan Meenang
Student ID	59605087
Degree	Master of Science
Department	Physics
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen

Abstract

In this thesis, the fabrication of Cd_{1-x}Zn_xS/CuO heterojunction thin film diode was presented. Cd_{1-x}Zn_xS thin films layer was deposited by chemical bath deposition (CBD) onto FTO thin film layer covered on slide glass then CuO thin films layer was coated by reactive dc magnetron sputtering technique. The junction barrier height (ϕ_B), ideality factor (n) and series resistance (R_S) values of the obtained diode evaluated by using thermionic emission (TE) method, Chung's method and Norde's method. Evaluation of forward I-V data reveals a decrease in the zero-bias barrier height, but an increases in the ideality factor with decrease in temperature. The interface states properties of Cd_{1-x}Zn_xS/CuO heterojunction diode were performed using C-V-f characteristics. The capacitance-frequency characteristics were also investigated at different bias voltages at room temperature. The negative capacitance is observed under high reverse bias voltage. That is attributed to the difference of the concentration of dipole presented at interface traps between the n-Cd_{1-x}Zn_xS and p⁺-CuO heterojunction. In addition, the activation energy of the Cd_{1-x}Zn_xS/CuO heterojunction evaluated from impedance spectroscopy measurement in a temperature range of 25-65°C. Also a band diagram of Cd_{1-x}Zn_xS/CuO heterojunction was proposed to explain the transport mechanism.

Keywords : Cd_{1-x}Zn_xS/CuO Diode, Chemical bath deposition, Reactive dc magnetron sputtering, Interface state, Electrical properties, Negative capacitance

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงาม ทั้งคุณธรรม จริยธรรม ให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องนักศึกษาทุกคน ในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมอริกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนพี่น้อง ญาติสนิท มิตรสหายทุกท่าน ที่ให้ความสนับสนุน และส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์เสมอมา

จารุวรรณ มีนาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ.....	7
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI.....	7
2.2.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	8
2.2.2 โครงสร้างแบบเวอรัทไซต์	9
2.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์.....	9
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO	10
2.5 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก	12
2.5.1 การระบุตำแหน่ง.....	12
2.5.2 การระบุทิศทาง.....	12
2.5.3 การระบุชื่อระนาบ	12
2.6 ผลึกจริง	14
2.6.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	14
2.6.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น	16
2.6.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	17
2.7 พันระเคมี.....	19
2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.9 พูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	21
2.10 สเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	21
2.11 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	23
2.11.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	23
2.12 สมบัติทางไฟฟ้า.....	24
2.12.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.2 สมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	26
2.13 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อแบบขอตต์กี.....	27
2.13.1 รอยต่อแบบขอตต์กีในอุดมคติ.....	27
2.13.2 รอยต่อแบบขอตต์กีทั่วไป.....	32
2.14 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง.....	33
2.15 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์.....	34
2.16 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ.....	38
2.17 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ.....	40
2.18 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	43
2.18.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม.....	43
2.18.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน.....	44
2.19 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมี.....	50
2.19.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา.....	50
2.19.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์.....	51
2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	57
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	57
3.1.1 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี	57
3.1.2 การทำความสะอาดหน้าฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี	57
3.1.3 การเตรียมฟิล์มบาง CuO ด้วยวิธีรีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง.....	58
3.1.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	58
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n- $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ /p-CuO	59
3.2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ โดยวิธีอบสารละลายเคมี.....	59
3.2.2 การเตรียมชั้น $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.....	59
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง.....	60
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	67
4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟิตซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง.....	67
4.1.1 ลักษณะรอยต่อวิวิธพันธุ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	67
4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของ ฟิล์มบาง CdS/CuO	69
4.1.4 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	70
4.1.5 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชัน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	72
4.1.6 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	75
4.1.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	77
4.1.7.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	78
4.1.7.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	87
4.1.7.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	97
4.1.7.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดัน ไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ ไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	103
4.1.7.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	114
4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของ ฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S ที่เตรียมโดยวิธีออบสาลละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง	124
4.2.1 ลักษณะรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO	124
4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO ..	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นเอกสารฉบับนี้ขอสงวนสิทธิ์ใน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	125
4.2.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	126
4.2.4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	126
4.2.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ช่วงความถี่ 50-2000 กิโลเฮิรตซ์เมื่อทำ การวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของ ฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	135
4.2.4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	143
4.2.4.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ ที่อุณหภูมิในช่วง 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	149
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	153
เอกสารอ้างอิง	157
ภาคผนวก.....	162
ประวัติผู้เขียน.....	165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมีลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก.....	13
2.2 แสดงกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่ A ^{II} B ^{VI}	20
2.3 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่วัดได้จาก XPS.....	56
4.1 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	71
4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	74
4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)	76
4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	79
4.5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	84
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	89
4.7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	91
4.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพูล-เฟรนเคล β_{PF} และค่าไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ ϵ_f ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกพูล-เฟรนเคลแบบปรับปรุงใหม่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	96
4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO).....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก.	108
4.11 แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด G_{max}/ω ที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด (C_m) ความจุไฟฟ้าบริเวณชั้นออกไซด์ (C_{ox}) และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	113
4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	119
4.13 แสดงค่าความถี่กำทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากหลายวิธีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	123
4.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	129
4.15 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชันวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	132
4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	138
4.17 แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด G/ω ที่แรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด (C_m) ความจุไฟฟ้าบริเวณชั้นออกไซด์ (C_{ox}) และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	142
4.18 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	147
4.19 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	151
4.20 แสดงค่าความถี่กำทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากหลายวิธีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	152

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงสภาพหน้าไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ..... 7
2.2	แสดงพันธะสีหน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล..... 8
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์..... 8
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์..... 9
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์..... 10
2.6	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O 10
2.7	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO 11
2.8	แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO 12
2.9	แสดงการบอกระยะขนาดต่างๆของผลึก..... 13
2.10	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่ ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่ ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่..... 15
2.11	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอตติ์และความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล..... 16
2.12	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ..... 16
2.13	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู..... 17
2.14	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน..... 17
2.15	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด..... 18
2.16	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด..... 18
2.17	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 20
2.18	แสดงแผนภาพการทำงานหลักๆ ของเครื่อง XPS..... 22
2.19	แสดงการวิเคราะห์ด้วย XPS ของโพลีสไตรีน $[(C_8H_8)_n]$ ที่ถูกเคลือบด้วยพลาสติกของออกซิเจน..... 22
2.20	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง..... 23
2.21	แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิแรกและความหนาแน่นของพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ก. สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี..... 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.22	แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานเมื่อยังไม่ทำรอยต่อระหว่าง	
ก. โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น		
ข. โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	27	
2.23	แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงาน เมื่อเป็นรอยต่อแบบชอตต์กีระหว่าง	
ก. โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น		
ข. โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	28	
2.24	แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ก. ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่ตรงบริเวณผิวรอยต่อ		
ข. การกระจายของสนามไฟฟ้าตรงบริเวณผิวรอยต่อ		
ค. ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตรงบริเวณผิวรอยต่อ.....	29	
2.25	แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบชอตต์กีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในขณะที่มีการไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ.....	31
2.26	แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบชอตต์กีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่มีการไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ.....	32
2.27	แสดงกราฟการนำไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ.....	33
2.28	แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se ₂ ที่แปรตามอุณหภูมิ.....	35
2.29	แสดงกลไกผลของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะ	
ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน		
ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน.....	36	
2.30	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย CdCl ₂	37
2.31	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล (V=0)	
ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น		
ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	38	
2.32	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด	
ก. ช่วงชุมชนพาหะ		
ข. ช่วงพร่องพาหะ		
ค. ช่วงกลับกลาย.....	39	
2.33	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ ฎ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{it} และ R_{it} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อยู่ด้วย ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง.....	41
2.35 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อกับต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS ข. แสดงการยึดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ Ψ_s	45
2.36 แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย.....	44
2.37 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย.....	44
2.38 แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่ง วงกลมเกิดขึ้น.....	45
2.39 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)	45
2.40 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง ก. กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส ข. กระบวนการโฮโมจีเนียส ค. กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรจีเนียสและโฮโมจีเนียส.....	50
2.41 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส.....	50
2.42 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส.....	51
2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	52
2.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n- CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ.....	53
2.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่ อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศ.....	53
2.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิ ในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.47 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO.....	54
2.48 แสดงสเปกตรัม XPS ของธาตุ Zn ที่อยู่ในออร์บิทัล $2p_{3/2}$, ธาตุ Al อยู่ในออร์บิทัล $2p$ ที่อยู่ในฟิล์มบาง ZnO, AlN และที่รอยต่อ ZnO/AlN ตามลำดับ.....	55
2.49 แสดงขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์และขอบล่างสุดของแถบนำ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnO/AlN ที่อุณหภูมิห้อง.....	56
3.1 แสดงขณะการเคลือบฟิล์มโดยวิธีอบสารละลายเคมี.....	60
3.2 (ก) แสดงภาพ leak valve (ข) แสดงภาพคั่นบังคับ Shutter ที่อยู่ใน.....	61
3.3 (ก.) แสดงภาพตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มพกลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอพุงกระจาย (ข.) แสดงภาพวาล์วในตัวตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	62
3.4 (ก) แสดงภาพ Butterfly valve ในตำแหน่ง open (ข) แสดงภาพ speedy valve.....	62
3.5 (ก) แสดงภาพ Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ (ข) แสดงภาพ power supply.....	63
3.6 (ก) แสดงภาพสวิตช์ของ power supply (ข) แสดงภาพปั๊ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน.....	64
3.7 แสดงภาพพลาสติกที่ติดในครั้งแรก.....	64
3.8 (ก) แสดงภาพวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด (ข) แสดงภาพท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target.....	65
3.9 แสดงภาพการเริ่มเคลือบฟิล์ม.....	65
3.10 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบาง CuO ลงบนชั้นฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO).....	66
4.1 ก) แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี ข) แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	แสดงภาพถ่ายด้านหน้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) 68
4.3	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) 69
4.4	แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ข) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์..... 70
4.5	แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) 70
4.6	แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 450-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบาง CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) 71
4.7	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) 72
4.8	แสดงสเปกตรัม XPS ของแถบวาเลนซ์สูงสุด ก) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ ข) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์..... 73
4.9	แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ ก) ในช่วง 400-416 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ข) ในช่วง 925-975 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO..... 73
4.10	แสดงสเปกตรัม XPS รอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ก) พลังงานยึดเหนี่ยวช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ข) พลังงานยึดเหนี่ยวช่วง 925-975 อิเล็กตรอนโวลต์..... 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO).....	75
4.12	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO).	76
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ก) ความต่างศักย์ V_{24} และ V'_{24} กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก ข) ความต่างศักย์ V_H กับกระแสไฟฟ้า.....	77
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ก) ความต่างศักย์ V_{24} และ V'_{24} กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก ข) ความต่างศักย์ V_H กับกระแสไฟฟ้า.....	77
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้า -1 ถึง 1 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	78
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า $\ln V$ ที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	79
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	80
4.18	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับค่า I ที่อธิบายวิธีของขงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	81
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I โดยวิธีของขงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	81
4.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V โดยวิธีของนอร์ดเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	84
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะที่ฉายแสงและไม่ฉายแสง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	85
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะที่ฉายแสงและไม่ฉายแสง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	86
4.24 แสดงวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	86
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	88
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	88
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	88
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับค่า I ที่อธิบายวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	90
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I โดยวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	90
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V โดยวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	90
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ที่ เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	92
4.32 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	92
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	93
4.35 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln p_n]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	94
4.36 แสดงแผนภาพกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน กลไกเทอร์มิออนิกฟิลด์อิมิสชัน และกลไกฟิลด์อิมิสชัน ที่บริเวณรอยต่อขอตติ์ภายใต้ไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ.....	94
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	95
4.38 แสดงแผนภาพกลไกการนำกระแสของพูล-เฟรนเคิล ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำในขณะที่ไม่มีการไบแอสและมีการไบแอส.....	95
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β_{PF} และ ϵ_r กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO..	97
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	97
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	98
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	98
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	99
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	99
4.45 แสดงวงจรมูลสำหรับใช้จำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	100
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ และค่าความจุของกับดักพาหะ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	102
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้นที่ และค่าความต้านทานกับดักพาหะ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	102
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ และค่าคงตัวของเวลา เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	103
4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	104
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	104
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	105
4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	105
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	106
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W_D และ ϕ_B กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	109
4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_D และ Ψ_s กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	109
4.57 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ox} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	111
4.58 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ ต่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	112
4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO.....	112
4.61 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง D_{it} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO..	114
4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	115
4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	115
4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	116
4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln F$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	116
4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า dG/dF กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	117
4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	117
4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO.....	118
4.69 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	118
4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของ G/ω เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	120
4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของ $-dC/d\ln F$ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO	
ก. ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency)	
ข. ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่สูง (Height Frequency).....	120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.72	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของ dG/dF เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30–70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO
ก.	ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency)
ข.	ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่สูง (Height Frequency)..... 121
4.73	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_i/T^2)$ และ $\ln(\omega_p/T^2)$ กับ $(1000/T)$ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30–70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO
ก.	ได้จากการหา ω_i ในสถานะผิวเชื่อมต่อ
ข.	ได้จากการหา ω_p ในบริเวณพร่องพาหะ..... 121
4.74	แสดงแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO..... 124
4.75	แสดงภาพถ่าย (ก) และการต่อขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (ข) ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 124
4.76	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 125
4.77	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 125
4.78	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E _g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) 126
4.79	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า - 1 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 127
4.80	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 127
4.81	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 128
4.82	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง Cd _{0.5} Zn _{0.5} S/CuO..... 128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/dlnI$ กับค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	130
4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	131
4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	131
4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	134
4.87 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับ อุณหภูมิ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	134
4.88 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด ของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	134
4.89 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับอุณหภูมิ ที่คำนวณ ได้จากวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธ พันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	135
4.90 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	135
4.91 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วง ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ ไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	136
4.92 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของ ฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	137
4.93 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของ ฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	137

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.94 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า w_D กับ Φ_B กับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	138
4.95 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_D กับ Ψ_S กับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	139
4.96 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	140
4.97 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{OX} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	141
4.98 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง R_S กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	141
4.99 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง D_{it} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S /CuO$	142
4.100 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	143
4.101 แสดงแผนภาพกลไกการเกิดค่าความจุไฟฟ้าเป็นลบของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ก) แผนภาพภายใต้การไบแอสย้อนกลับปริมาณสูง ข) แผนภาพภายใต้การไบแอสตรงปริมาณสูง ค) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ขณะไม่มีการไบแอส ง) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ภายใต้การไบแอสย้อนกลับปริมาณสูง จ) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ภายใต้การไบแอสตรงปริมาณสูง.....	144
4.102 แสดงการจับและคายประจุของกัปดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ.....	145
4.103 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	146
4.104 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	146

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง นำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.105 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	146
4.106 แสดงวงจรมูลสำหรับใช้จำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	147
4.107 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	147
4.108 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ (C_D) และค่าความจุของกัปดักพาหะ (C_T) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	148
4.109 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้นที่ (R_p) และค่าความต้านทานกับดักพาหะ (R_T) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	148
4.110 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะ (N_T) และค่าคงตัวของเวลา (τ_T) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	149
4.111 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$...	149
4.112 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$...	150
4.113 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	150
4.114 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	151
4.115 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$	151

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.116	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_i/T^2)$ และ $\ln(\omega_p/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา τ_i และ τ_p ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนตามลำดับ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$ ก. ได้จากการหา ω_i ในสถานะผิวเชื่อมต่อ ข. ได้จากการหา ω_p ในบริเวณพ้องพาหะ.....	152



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด ปลอดภัยและไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่มีสร้างมลภาวะเป็นพิษใด ๆ ขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด สภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน จึงไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ ต่างจากแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้นนั้น เราจำเป็นต้องพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ชีวิตประจำวันในปัจจุบัน ต้องอาศัยพึ่งพาสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ มากมาย โดยอุปกรณ์เหล่านี้มักจะข้องเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยตลอดเวลา สาเหตุที่ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เหล่านี้ต้องอาศัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นหัวใจในการทำงานก็เพราะสารกึ่งตัวนำมีสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญที่สุด คือ สามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ แสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าได้เมื่อมีแสงตกกระทบ ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) หรือ เมื่อมีพลังงานความร้อนมาตกกระทบ ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect) จะแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนและโลหะ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เราสามารถสร้างสิ่งประดิษฐ์ได้มากมาย เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ วงจรรวม ตัวตรวจจับแสง จอคอมพิวเตอร์ชนิดผลึกเหลว และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II-VI เช่น CdTe, CdS ได้ดำเนินไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CdTe ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2515 โดยบอนเน็ต (Bonnet) และราเบนโฮสต์ (Rabenhorst) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6% [1] จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันซึ่งมีประสิทธิภาพสูงถึง 22.5% ในระดับห้องปฏิบัติการ และโมดูลขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 10% [2] และมีแนวโน้มที่จะออกสู่ตลาดได้ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาด ประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธ์ (polycrystal) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) มีช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ณ อุณหภูมิห้อง เท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นฟิล์มที่ได้การยอมรับว่าเหมาะสมกับการสร้างเป็นชั้นหน้าต่าง (windows) สำหรับใช้สร้างประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำเป็นรอยต่อระหว่างหัวต่อ พี-เอ็น (ฟิล์มบาง CdS หนา 0.1 ไมโครเมตร จะดูดกลืนพลังงานที่สูงกว่า 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้ถึง 36%) สำหรับการเตรียมสารกึ่งตัวนำ CdS มีกระบวนการเตรียมให้เลือกหลายวิธี ได้แก่ วิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) และวิธีอาบน้ำสารละลายเคมี (chemical bath deposition: CBD) เป็นต้น [3-7]

แต่ข้อจำกัดประการหนึ่งของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ก็คือมีช่องว่างแถบพลังงานที่ไม่กว้างนัก จึงต้องเพิ่มช่องว่างแถบพลังงานให้กว้างขึ้น ซึ่งทำได้โดยการผสมกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnS ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน 3.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้คือ จะเกิดเป็นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางจะมี 2 แบบ ได้แก่ ซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic) และเวอร์ทไซท์ (wurtzite) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ยังช่วยให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้นอีกด้วย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของอะตอม Cd กับ Zn

$Cd_{1-x}Zn_xS$ เป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำมาทดแทน CdS ได้ดีเพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดีกว่า และสามารถดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต นอกจากนี้ยังมีปริมาณแคดเมียมน้อยลงด้วย การเตรียมฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ นั้นพบว่าการเตรียมโดยวิธีอาบน้ำสารละลายเคมีเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมากนัก เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส มีคุณภาพดี และสามารถทำได้ครั้งละมากๆ ซึ่งฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในสารละลายที่ประกอบด้วย Cd^{2+} , Zn^{2+} และ S^{2-} ซึ่ง Cd^{2+} และ Zn^{2+} อาจได้จากเกลืออะซีเตต ($Cd(CH_3COO)_2$, $Zn(CH_3COO)_2$), เกลือออกไซด์ ($CdCl_2$, $ZnCl_2$) เกลือไฮโอไดด์ (CdI_2 , ZnI_2) หรือเกลือซัลเฟต ($CdSO_4$, $ZnSO_4$) เป็นต้น ส่วน S^{2-} ได้มาจากการแตกตัวของไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) โดยมี NH_3 เป็นตัวแทนความซับซ้อน (complexing agent) นอกจากนี้ยังมีไฮดราซีนไฮดรอกไซด์ (hydrazine hydroxide, N_2H_5OH) เป็นตัวแทนความซับซ้อนเพิ่มขึ้นมาเพื่อช่วยทำให้อัตราการเคลือบ ZnS เพิ่มขึ้น [8-9]

สารกึ่งตัวนำประเภทออกไซด์เป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งที่ใหม่ ซึ่งเหมาะสมกับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่ มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาประหยัด จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิคอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบาง p-Cu₂O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 6% [10] ดังนั้นจึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจมายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ ได้รับการวิจัยและพัฒนากันหลากหลาย เช่น p-Cu₂O/n-ZnO [11], p-Cu₂O/n-CuO [12], CuO/ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] และ p-CuO/n-Si [14] เป็นต้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลโคไซด์ เช่น $\text{CuAlO}_2/\text{CdZnS}$ [15-16], p-Cu_xSn_yS_zO/n-ZnO [17] และ CuO/CdS [18] พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

สารประกอบของโลหะทองแดงที่เสถียรมี 2 เฟส คือ Cu₂O และ CuO คิวปริสออกไซด์ (Cu₂O) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ส่วนคิวปริกออกไซด์ (CuO) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 1.2-1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้จึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ CuO มีข้อดีหลายประการ เช่น โลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ ไม่เป็นสารพิษ ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งพีและเอ็น เป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ CuO มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ผิวเคลือบอิเล็กโตรโครมิก (electrochromic coatings) ประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี เป็นต้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี เช่น วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีอะโนดิกออกซิเจน (anodic oxidation) รีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) วิธีเคลือบจากสถานะพลาสมา (plasma deposition) และวิธีจุ่มในโซลเจล (sol-gel deposition) แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่ได้มักจะมีเฟสของ Cu, Cu₂O ปรากฏร่วมกันเสมอ [19]

การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงมีข้อดีหลายประการคือ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองรับได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางต่ำ ดังนั้นข้อบกพร่องจึงน้อย ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงให้เคลือบบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อให้เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}/\text{CuO}$

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และศึกษาชนิดของการนำไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) จากนั้นจึงได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}/\text{CuO}$ ซึ่งเตรียมจากการเคลือบฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง โดยใช้เป้าเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมได้จากวิธีอบสารละลายเคมีบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) แล้วใช้กาวเงินเป็นขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหลัง โดยจะให้ฟิล์มบางของทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงด้านหน้า ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาศสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีอบสารละลายเคมี และทำเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีแอคทีฟอีพอกซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO
3. เพื่อศึกษาศสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO
4. เพื่อทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS / CuO$ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)
5. เพื่อศึกษาชนิดการนำไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้
6. เพื่อศึกษาศสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{1-x}Zn_xS / CuO$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาศสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuO / Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะเตรียมโดยวิธีแอคทีฟอีพอกซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เป้าเป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ และฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะเตรียมได้จากวิธีอบสารละลายเคมีจากสารตั้งต้นเกลืออะซีเตต ($CdSO_4$, $ZnSO_4$), ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) และไฮดราซีน ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) จากนั้นจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปศึกษาศสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค การศึกษาผลึกเชิงมหภาค ตลอดจนการศึกษาศสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีออบสารละลายเคมี
2. ทำการศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
3. ทำการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ตามลำดับ ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี
4. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
5. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้
6. ทำการศึกษสมบัติการส่งผ่านแสง โดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้
7. ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้
8. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยมีชั้นของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เตรียมด้วยวิธีออบสารละลายเคมีที่เคลือบอยู่ด้านบน เพื่อประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ ด้วยวิธีอีพอกซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
9. ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง
10. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

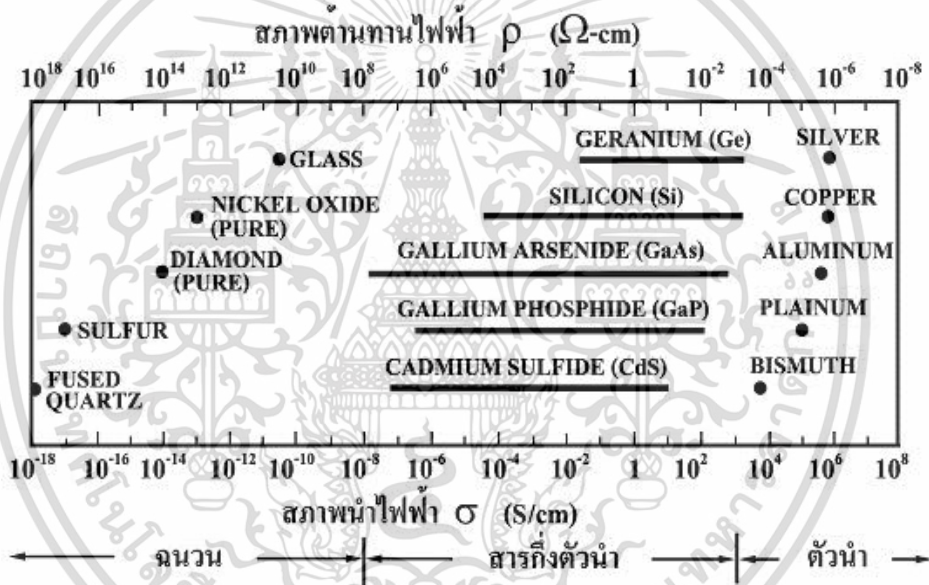
1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมีที่มีคุณภาพดี ข้อบกพร่องน้อย ความต้านทานต่ำ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง ติดแน่น และผิวหน้าเรียบ
2. ทำให้ทราบถึงหลักการ บังจายหรือเงื่อนไข และวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง
3. ทำให้ทราบถึงวิธีการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้จากกระบวนการออบสารละลายเคมีบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกเจือฟลูออรีน
4. ทำให้ทราบถึงการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ คอปเปอร์ออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ ตลอดจนไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Cd_{1-x}Zn_xS/CuO$ ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น
5. ทำให้ได้เรียนรู้วิธีการตรวจสอบสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางและสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อโอห์มมิก และรอยต่อพี-เอ็น
6. นำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [20-23]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทจะมีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่างกัน กล่าวคือ วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น กระจกสไลด์ (slide glass) และผลึกควอตซ์ (fused quartz) จะมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ และวัสดุที่เป็นตัวนำ เช่น อลูมิเนียม และเงิน จะมีสภาพนำไฟฟ้าสูง ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำ ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ดังในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิดที่สำคัญ

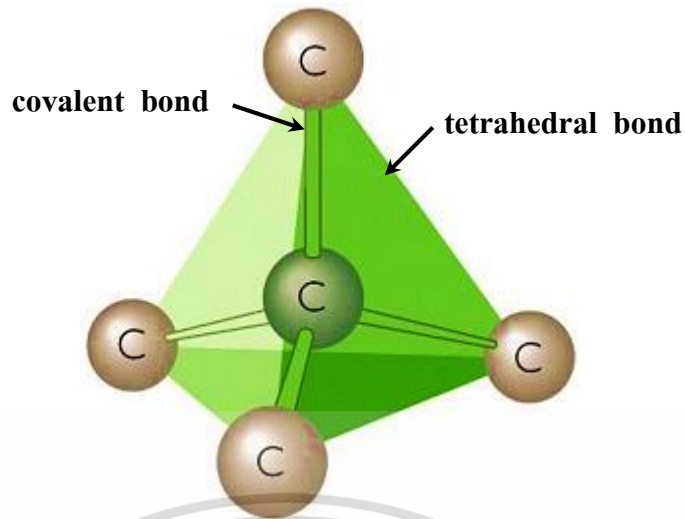


รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI [20-30]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ (wurtzite structure)

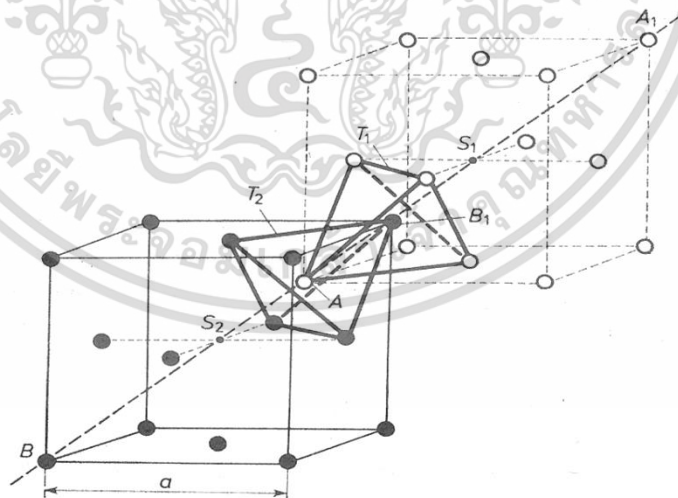
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.2.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

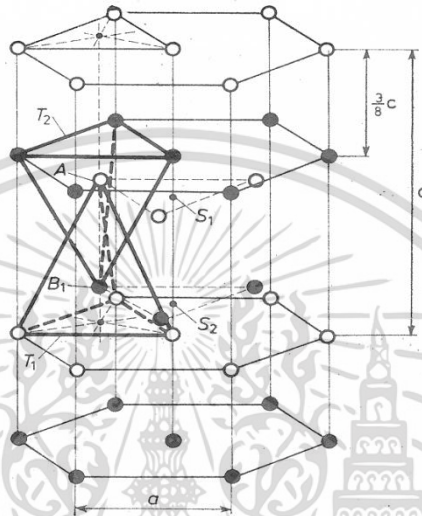
โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงสร้างเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4} AA_1 = \frac{1}{4} BB_1$ ฐานของพันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60° อดรอบแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.2.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์

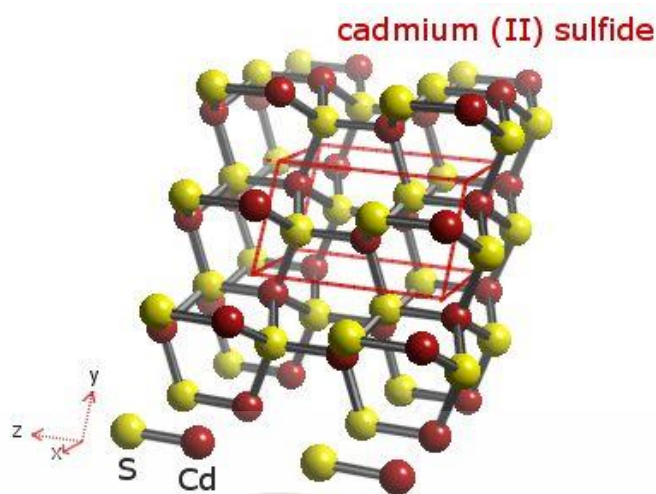
โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์แสดงในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และ c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 และ s_2 เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน c ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$ ฐานพื้นระลีสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน c



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

2.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ [18, 28-30]

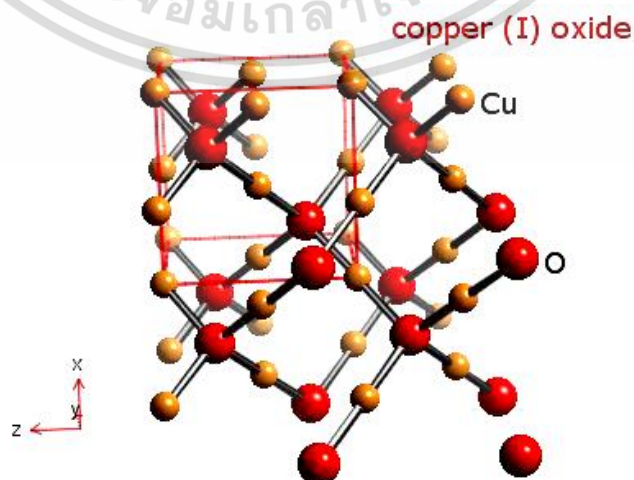
โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่างๆออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซัลไฟด์ หรือแบบเวอร์ทไซท์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์

2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO [35-36]

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากซับแลตทิซของ บอดีเซนเตอร์คิวบิก (BCC) ของอะตอมออกซิเจนกับซับแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ของอะตอมของธาตุ Cu ซับแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกันโดยที่แลตทิซที่สองจะอยู่เอียงไปในแนวทแยงมุมของซับแลตทิซแรกเป็นระยะ $1/4$ ของความยาวเส้นทแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอมรูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ Cu_2O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อราเคยนำไปใช้ทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



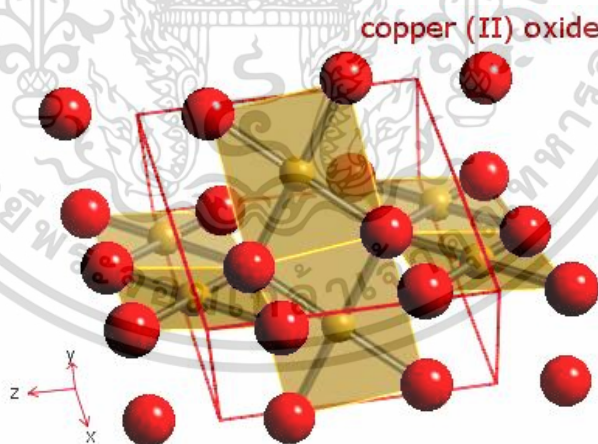
รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

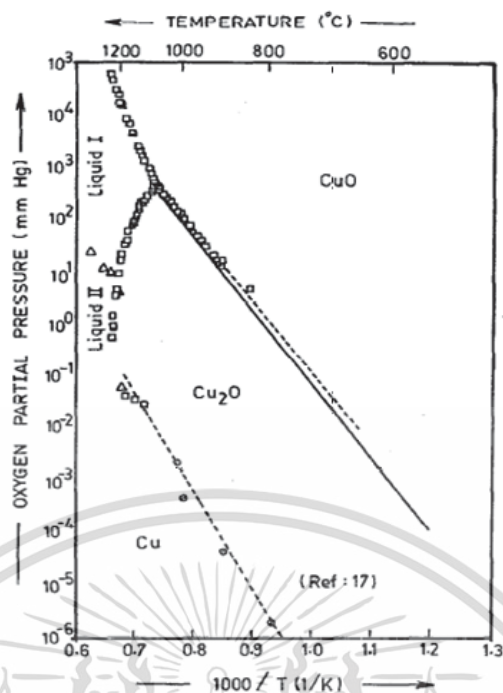
สารประกอบ CuO มีสีดำพบได้ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมนอคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO จะมีลักษณะ โดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็ว ในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ CuO สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสภาวะอากาศความดันต่ำ

ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ CuO ให้เป็นส่วนผสมทำไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจแก๊สรู้ชนิดต่างๆ และปลั๊กสำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือ เพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ $3d^9$ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง [37]

รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu , Cu_2O และ CuO



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO



รูปที่ 2.8 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

2.5 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [30-34]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.5.1 การระบุตำแหน่ง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่าตัวอย่างเช่นจุด $(1,2,3)$ หมายความว่าตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$

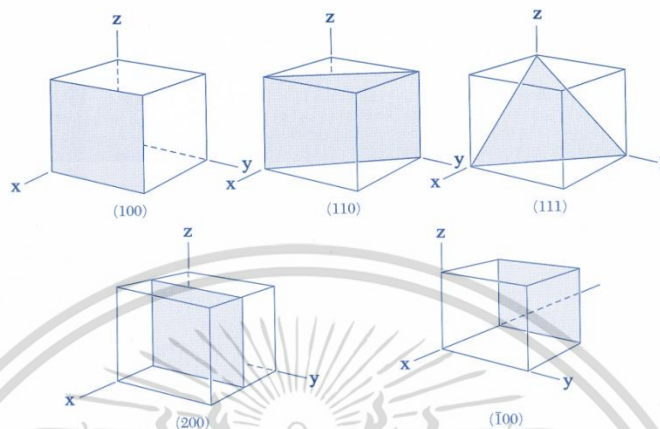
2.5.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[uvw]$ โดยให้สังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยมและไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

2.5.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบแต่ละระนาบจะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง ค่าดัชนีมิลเลอร์มีวิธีการหาได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการกำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนผลึกแต่ละแกนคือค่า (x,y,z) และจึงทำให้เป็นเศษส่วนกลับ ต่อจากนั้นให้หาผลคูณร่วมม่น้อย (ค.ร.น.) ของเศษส่วนกลับเหล่านั้น ก็จะได้พารามิเตอร์ (hkl)

ตามลำดับ นอกจากนี้ระนาบใดขนานกับแกนใดให้ประมาณว่าระนาบนั้นตัดแกนนี้ที่ระยะอนันต์ ส่วนระนาบใดตัดแกนลบ ก็ให้ใส่เครื่องหมาย (-) บนค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวนั้น เช่นระนาบ (010) จะตัดแกนผลึกที่ $(\infty, 1, \infty)$ และระนาบ $(\bar{1}11)$ จะตัดแกนผลึกที่ $(-1, 1, 1)$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.9 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.9 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

จุดที่ระนาบตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$ $h \quad k \quad l$	ดัชนีมิลเลอร์(hkl)หรือระนาบ
$(\infty, 1, \infty)$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$ $0 \quad 1 \quad 0$	(010)
$(-1, 1, 1)$	$-\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$ $\bar{1} \quad 1 \quad 1$	$\bar{1}11$
$(-1, -1, -1)$	$-\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}$ $\bar{1} \quad \bar{1} \quad \bar{1}$	$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$
$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4})$	$\frac{1}{\frac{1}{2}}, \frac{1}{\frac{1}{2}}, \frac{1}{\frac{1}{4}}$ $2 \quad 2 \quad 4$	(224)
$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$	$\frac{1}{\frac{1}{2}}, \frac{1}{\frac{1}{2}}, \frac{1}{0}$ $2 \quad 2 \quad 0$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

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

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

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

2.6 ผลึกจริง [20-29, 38]

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

2.6.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

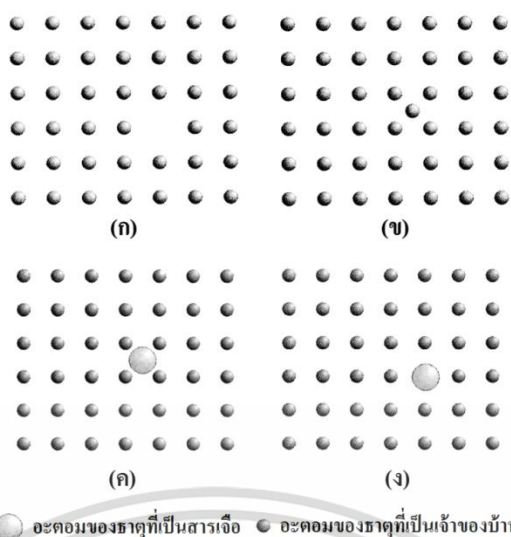
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลตทิซที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

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

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

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



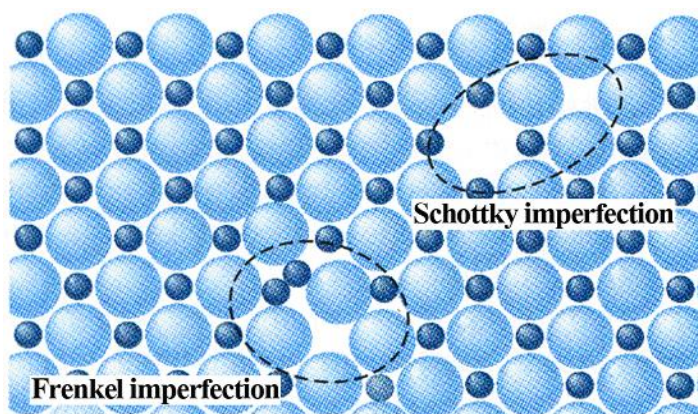
รูปที่ 2.10 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

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

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนี้

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

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



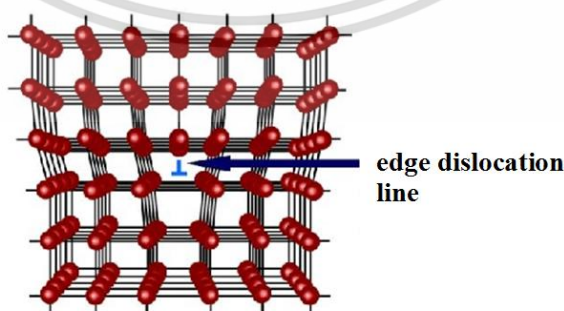
รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอตตักิและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.6.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

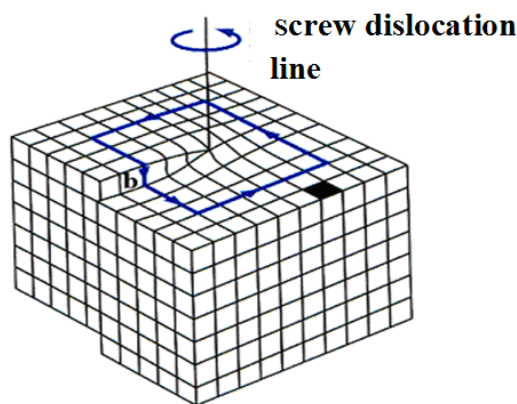
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเชิงเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector : \vec{b}) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



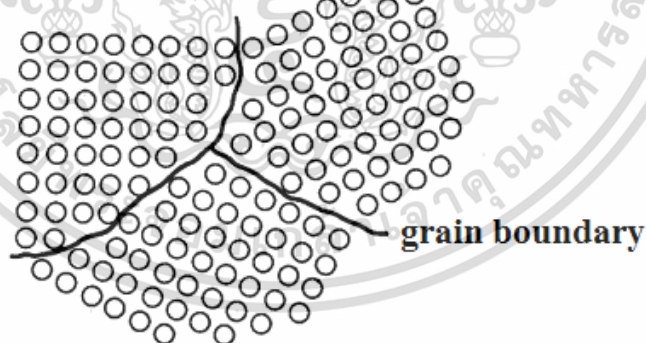
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

2.6.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มักเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface- imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.6.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่าบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

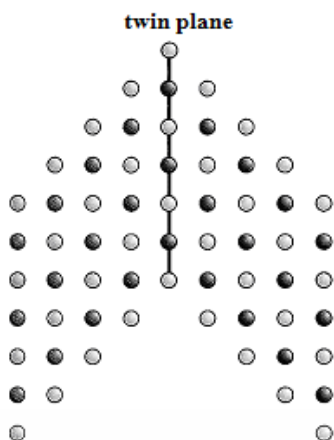


รูปที่ 2.14 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.6.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.15

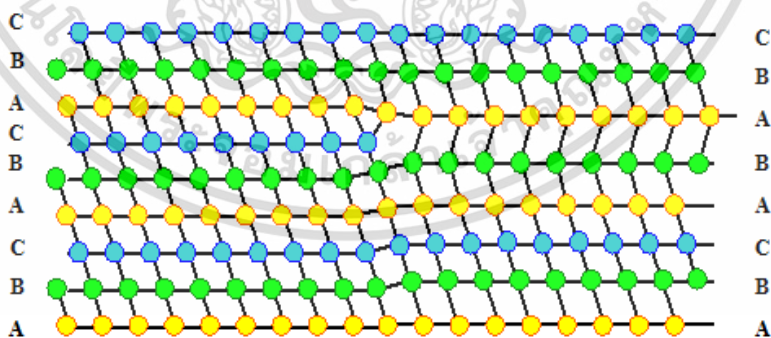
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

2.6.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงสร้างผลึกออคตาฮีดรัลแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดพลาดจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด

2.7 พันธะเคมี

พันธะเคมีระหว่าง 2 อะตอม ขึ้นอยู่กับธาตุที่อยู่ในตารางธาตุ พันธะเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นอยู่ 3 ชนิดคือ พันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ และพันธะโลหะ ทฤษฎีทางพันธะเคมีศึกษาโดย เพาว์ลิง (Pauling) และสเลเตอร์ (Slater) ซึ่งอธิบายถึงปริมาณที่บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางโครงสร้าง ทางกายภาพ และทางเคมีของผลึก จากการทดลองระยะระหว่างอะตอมและพิกัดของอะตอม รวมทั้งการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากความเข้มของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นถึงพันธะเคมีในผลึกสารประกอบกลุ่ม II-VI ทั้งโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์ โดยส่วนมากจะแสดงทั้งพันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์

พันธะไอออนิกประกอบด้วยอันตรกิริยาคูลอมบ์ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ ผลที่ตามมาคือ อิเล็กตรอนวาเลนซ์จะเคลื่อนย้ายจากธาตุโลหะไปยังธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นของพลังงาน $4s^2$ จากอะตอมของธาตุสังกะสี (Zn) ไปยังระดับชั้นพลังงาน sp ของอะตอมของธาตุเทลลูเรียม (Te) ซึ่งทำให้เกิดไอออนของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) และไอออนของธาตุเทลลูเรียม (Te^{2-})

พันธะโควาเลนต์ คือ การสร้างคู่อิเล็กตรอนกับสปินตรงข้ามอิเล็กตรอนหนึ่งตัวของแต่ละอะตอม ก็จะสร้างคู่อิเล็กตรอนด้วยกันทั้งสองอะตอมเป็นพันธะ ในกรณีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ เท่ากับ 8 ($4s^2$ จากอะตอมของธาตุสังกะสี และ $5s^2p^4$ จากอะตอมของธาตุเทลลูเรียม) ก็จะถูกแบ่งเท่าๆ กันระหว่างของธาตุสังกะสี และอะตอมของธาตุเทลลูเรียม และประจุสุทธิของแต่ละอะตอมเท่ากัน Zn^{2+} และ Te^{2-} ประจุสุทธินี้มีความสัมพันธ์กันกับผลึกที่เป็นพันธะไอออนิก

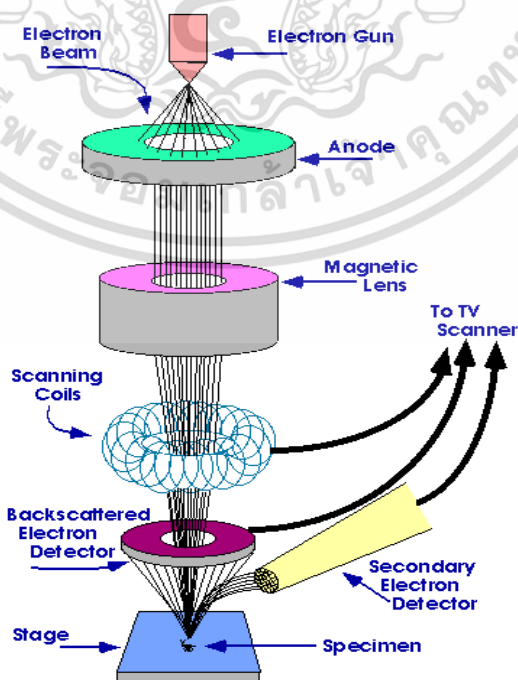
มูเซอร์ (Mooser) และเพียร์สัน (Pearson) ได้พิสูจน์เกี่ยวกับแนวความคิดของพันธะเคมีซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน โดยแสดงให้เห็นถึงสมบัติของพันธะเคมีในสารประกอบกลุ่ม II-VI ดังตารางที่ 2.4 แสดงการกระจายของวาเลนซ์และความเป็นพันธะไอออนิกในสารประกอบกลุ่ม II-VI ถ้าอิเล็กตรอนวาเลนซ์หลุดออกไปจากอะตอม A และอะตอม B เราจะได้ประจุเป็นบวก A^{2+} และ B^{6+} ประจุมรวมของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่หลุดออกไปรวมกันเท่ากับ $8e^-$ การส่งผ่านของประจุไปยังอะตอม B^{6+} ก็จะแทนด้วยไอออน B^{2-} นี่คือนิยามพันธะไอออนิกที่มีประจุสุทธิของแต่ละอะตอม คือ $A^{2+}B^{2-}$ สำหรับกรณีอิเล็กตรอนวาเลนซ์มีการเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างสองอะตอมซึ่งในกรณีนี้ การกระจายของอิเล็กตรอนวาเลนซ์มีค่าเท่ากัน ทำให้พันธะโควาเลนต์นี้มีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมคือ A^{2-} และ B^{2+} และศูนย์กลางการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนอยู่กึ่งกลางระหว่างอะตอม A กับอะตอม B ซึ่งแทนด้วย d_{AB} เมื่อศูนย์กลางของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ใกล้กับไอออน B^{6+} ตัวอย่างเช่นที่ระยะ $\frac{1}{4}d_{AB}$ เมื่อการกระจายอิเล็กตรอนวาเลนซ์ คือ $2e^-$ และ $6e^-$ ในกรณีนี้สามารถแทนได้ด้วยโมเลกุล A^0B^0 ซึ่งมีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมเท่ากับศูนย์ นี่คือนิยามพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมซึ่งทำให้เกิดพันธะไอออนิก

ตารางที่ 2.2 แสดงการกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่ $A^II B^VI$

Effective charge of atoms in the molecule	Distribution of valency electron charge (●—center of “bridge”)	Bond ionicity [%]	
		formal	effective
$A^{2+} B^{2-}$		100	100
$A^{2+} B^{2-}$		75	50
$A^{2+} B^{2-}$		50	0
$A^{2+} B^{2-}$		25	
$A^{2+} B^{2-}$		0	
$A^{2+} B^{2-}$			

2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของ SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1- 40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำ ใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสลำอิเล็กตรอนจะกระดาไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอแคโทด (cathode ray tube : CRT)

2.9 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR)

FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบ โครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอมหรือไอออนของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (wave number) ประมาณ 12800 - 10 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

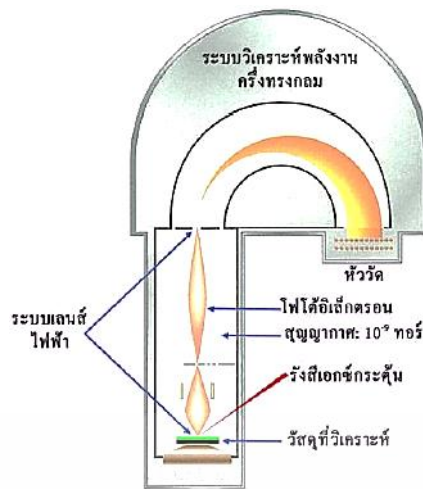
รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงตามองเห็นได้กับคลื่นไมโครเวฟ โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared (12800-4000 ต่อเซนติเมตร)
2. Middle Infrared (4000-200 ต่อเซนติเมตร)
3. Far Infrared (200-10 ต่อเซนติเมตร)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

2.10 สเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS)

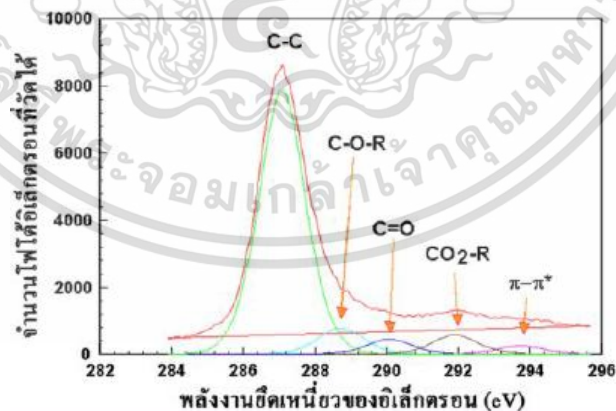
XPS เป็นเทคนิควิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ที่สามารถให้ข้อมูลสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุในหลายแง่มุม เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมี เป็นต้น สามารถวิเคราะห์วัสดุได้หลายชนิด เช่น สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โลหะผสม เซมิคอนดักเตอร์ พอลิเมอร์ เซรามิกส์ เป็นต้น



รูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพการทำงานหลักๆ ของเครื่อง XPS

จากแผนภาพการทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.18 เริ่มจากการยิงรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวใส่วัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ รังสีเอกซ์นี้จะทราบค่าพลังงานอย่างแน่นอน (ถ้าเป้าเป็นอนุภาคนิวเคลียสจะให้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงาน 1486 อิเล็กตรอนโวลต์) ซึ่งรังสีเอกซ์ปลดปล่อยให้อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดเป็นอิสระ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron effect) โดยที่พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนนี้ จะประมาณเท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีเอกซ์กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม

โฟโตอิเล็กตรอนจากผิววัสดุ จะถูกรวบรวมและถูกโฟกัสไปที่รูเปิดเล็กๆ ตรงปากทางเข้าของระบบวิเคราะห์พลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอน ด้วยระบบเลนส์ไฟฟ้า ความยาวของชุดเลนส์ประมาณ 50 เซนติเมตร ระบบวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน ประกอบด้วยโลหะแผ่นคู่ขนานรูปครึ่งวงกลมต่อกับศักย์ไฟฟ้าคงที่ ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งโค้งด้วยรัศมีเฉลี่ย 16.5 เซนติเมตร จนถึงแผงหัววัด ตัวอย่างในการวิเคราะห์ด้วย XPS แสดงในรูปที่ 2.19



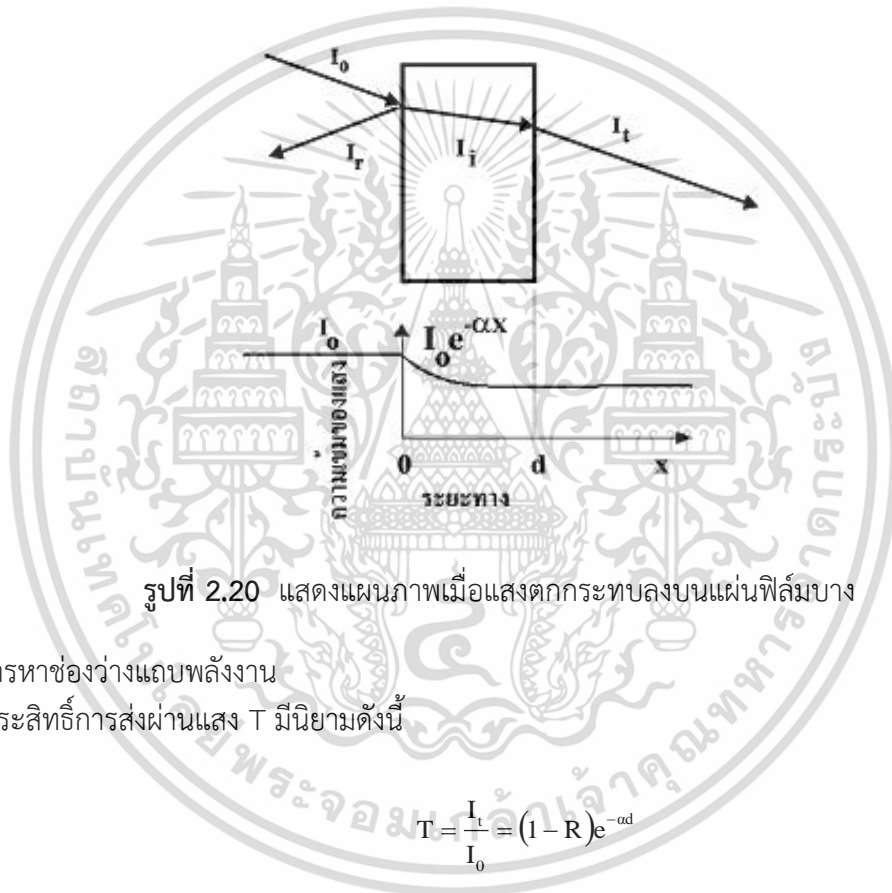
รูปที่ 2.19 แสดงการวิเคราะห์ด้วย XPS ของโพลีสไตรีน $[(C_8H_8)_n]$ ที่ถูกเคลือบด้วยพลาสมาของออกซิเจน

2.11 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [15-34]

เมื่อแสงตกกระทบบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

2.11.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบบนฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.2)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.3)$$

ถ้าแสงตกกระทบบนฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น $T \approx e^{-\alpha d}$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรง คือ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.5)$$

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

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

2.12 สมบัติทางไฟฟ้า [20-33]

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมากเกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงมีค่าน้อย ส่วนใหญ่เป็นพาหะที่ถูกกระตุ้นมาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level) หรือศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ (recombination center) ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) ดังนั้นที่สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.12.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือและอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E/E_F)/kT] + 1} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

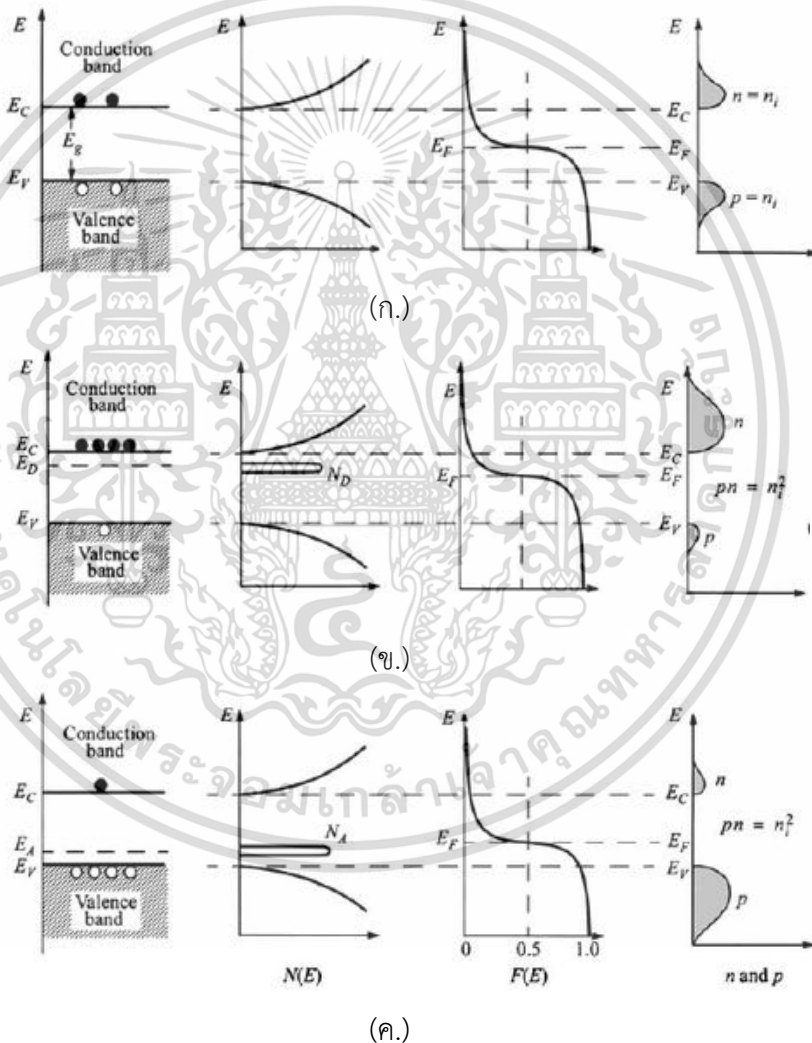
เมื่อ $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี หรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลความร้อนสามารถที่จะแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรกและความหนาแน่นของพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

- ก. สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก
- ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 สมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มระดับพลังงานแถบนำ ทำให้มีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่เหนือแถบนำ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_{FM}) คือ สถานะพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนอยู่ได้ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน โดยโลหะมีฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ (Φ_M) คือ จำนวนพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องการใช้ในการทำให้หลุดจากเฟอร์มิ ออกไปยังผิวหน้าของโลหะ หรือระดับพลังงานสุญญากาศ (vacuum level) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ใช้อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน มีนิยามว่า เป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดอยู่นิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร ฟังก์ชันงานสามารถคำนวณด้วยกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่พิจารณาถึงบ่อศักย์ระบบสามมิติ (volume contribution) โดยพิจารณาพลังงานของอิเล็กตรอน เนื่องจากพบพลังงานศักย์ในบ่อศักย์ของผลึกที่มีลักษณะเป็นคาบ และแรงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกันเอง กับส่วนที่พิจารณาบริเวณผิวหน้าของผลึกในระบบ 2 มิติ (surface contribution) เกิดจากความไม่เป็นไปได้ที่ เกิดชั้นของไดโพลขั้วคู่ (dipole moment layer) ชั้นที่ผิวหน้าผลึก โดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนจะกระจายรอบอะตอมของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของผลึก ซึ่งทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแบบไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับนิวเคลียส ดังนั้นจึงทำให้เกิดเป็นชั้นของไดโพลขั้วคู่ขึ้นมา

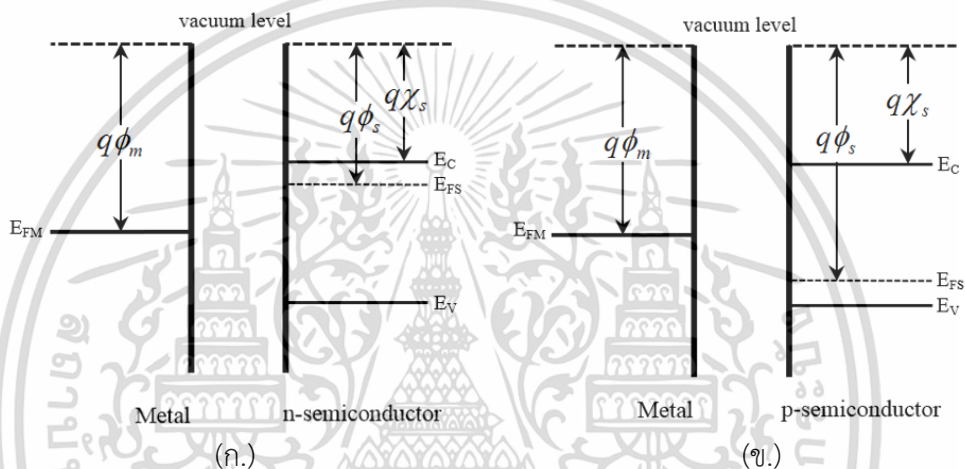
ส่วนสารกึ่งตัวนำมีฟังก์ชันงาน (Φ_S) คือ ความแตกต่างของพลังงานระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ กับระดับพลังงานสุญญากาศ เนื่องจากระดับพลังงานเฟอร์มินั้นอยู่ในช่องว่างของแถบพลังงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่อนุญาตให้มีระดับพลังงานอื่นใดภายในบริเวณนี้ (ฟังก์ชันงานก็เป็นเพียงสถิติ เพื่อแสดงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่อิเล็กตรอนใช้ เพื่อที่จะย้ายจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ) จึงได้มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity: χ_S) ซึ่งคือพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องใช้เพื่อถูกกระตุ้นจากส่วนล่างสุดของแถบนำไปยังผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำคือสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ทั้งไบแอสตรงหรือไบแอสกลับทาง ซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยต่อได้สองทิศทาง รอยต่อนั้นจึงมีลักษณะเหมือนเป็นตัวนำไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยต่อได้สองทิศทาง รอยต่อนั้นจึงมีลักษณะเหมือนเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดาและเป็นไปตามกฎของโอห์ม เรียกรอยต่อนี้ว่า รอยต่อแบบโอห์มมิก (ohmic contact) ซึ่งมีค่าความนำไฟฟ้าสูง และไม่มีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งนิยมใช้โลหะเป็นอะลูมิเนียม ทองคำ เป็นต้น แต่หากรอยต่อที่มีลักษณะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ขณะไบแอสตรงเพียงทิศเดียวเท่านั้น ซึ่งมีลักษณะการเรียงกระแสไฟฟ้าเหมือนกับไดโอด เรียกรอยต่อนี้ว่า รอยต่อแบบชอตต์กี (Schottky contact) หรือ ไดโอดชนิดรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor diode) หรือชอตต์กีไดโอด (Schottky diode) แสดงลักษณะการเปรียบเทียบระหว่างรอยต่อชอตต์กีกับรอยต่อแบบโอห์มมิก

2.13 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อแบบขอตต์กี

2.13.1 รอยต่อแบบขอตต์กีในอุดมคติ

พิจารณาในกรณีที่ยุติรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเป็นรอยต่อแบบขอตต์กีในอุดมคติ คือ ไม่มีสถานะของประจุที่บริเวณผิวรอยต่อ (surface state) และไม่มีคุณสมบัติอื่นๆ ส่วนอิเล็กตรอนของโลหะมีสถานะพลังงานสูงสุดที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน อยู่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_{FM}) และอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีสถานะของพลังงานสูงสุดที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินอยู่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_{FS}) เมื่อโลหะและสารกึ่งตัวนำยังไม่สัมผัสกัน ระดับพลังงานฟังก์ชันงานของโลหะมีขนาดเท่ากับ $q\phi_M$ ซึ่งมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำที่เท่ากับ $q\phi_S$ โดยมีอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ $q\chi_S$



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานเมื่อยังไม่ทำรอยต่อระหว่าง

- โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมาทำรอยต่อกัน อิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะไหลมายังผิวหน้าของโลหะ โดยไม่ได้เข้าไปยังเนื้อโลหะ จึงเรียกประจุที่อยู่บริเวณผิวนี้ว่า ผิวประจุ (surface charge) เมื่ออิเล็กตรอนไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้นตรงบริเวณสถานะพลังงานเดิม ซึ่งมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก ที่เรียกกันว่า โฮล (hole) เกิดขึ้นตรงบริเวณที่ผิวรอยต่อแบบสัมผัสของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ความหนาแน่นของประจุแตกต่างกัน โดยทางด้านสารกึ่งตัวนำที่บริเวณผิวรอยต่อแบบสัมผัสมีประจุบวกเป็นส่วนมาก และทางด้านผิวโลหะที่บริเวณผิวรอยต่อแบบสัมผัสจะมีประจุลบเป็นส่วนมาก จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่ผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ มีทิศจากด้านสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ ประจุที่อยู่ในสนามไฟฟ้าก็จะถูกแรงทางไฟฟ้าแยกออกไปคนละด้าน ทำให้บริเวณนี้ไม่มีพาหะอิสระ เรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณพร่องพาหะ (depletion region: W หรือ χ_d) ซึ่งตอนแรกสนามไฟฟ้านี้มีค่าน้อย อิเล็กตรอนจึงสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ได้ด้วยพลังงานความร้อน $E = kT$ จนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่ซึ่งทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ (E_{FM}) เท่ากับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ (E_{FS}) ก็จะไม่มีการไหลข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในนามของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

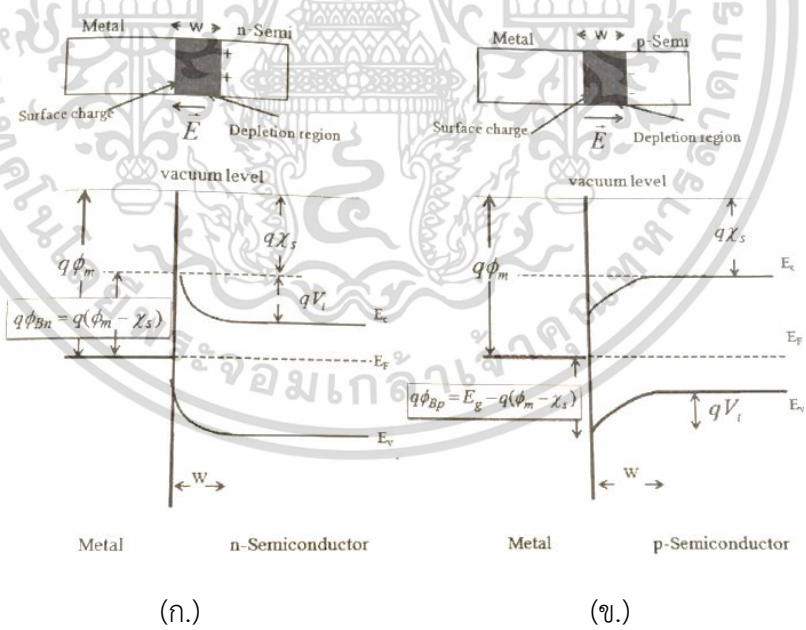
กำแพงศักย์ของรอยต่อ โดยจะมีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ W การที่อิเล็กตรอนในแถบนำของสารกึ่งตัวนำมีจำนวนลดลงทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะลดลงมาซึ่งเท่ากับความแตกต่างของฟังก์ชันงานทั้งสอง ดังนี้

$$qV_i = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.9}$$

แต่ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะยังเท่าเดิม และเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน จะประมาณเป็นระบบเดียวกัน ดังนั้น ระดับพลังงานเฟอร์มิทั้งสองจึงมีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดกำแพงศักย์ขึ้นทั้งสองด้าน คือทางด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับกำแพงศักย์ที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าภายใน (built in voltage : V_{bi}) ทำให้เกิดกำแพงศักย์ที่บริเวณผิวรอยต่อ ซึ่งมีพลังงานศักย์ (built in potential) เป็น qV_{bi} ส่งผลทำให้โครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อด้านสารกึ่งตัวนำ มีลักษณะค่อยๆ โค้งลาดขึ้น จึงทำให้อิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำสามารถไหลข้ามรอยต่อได้อยู่ เมื่อมีการไบแอสตรง ส่วนกำแพงศักย์ทางด้านโลหะจะชันสูง มีค่าเท่ากับ

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{2.10}$$

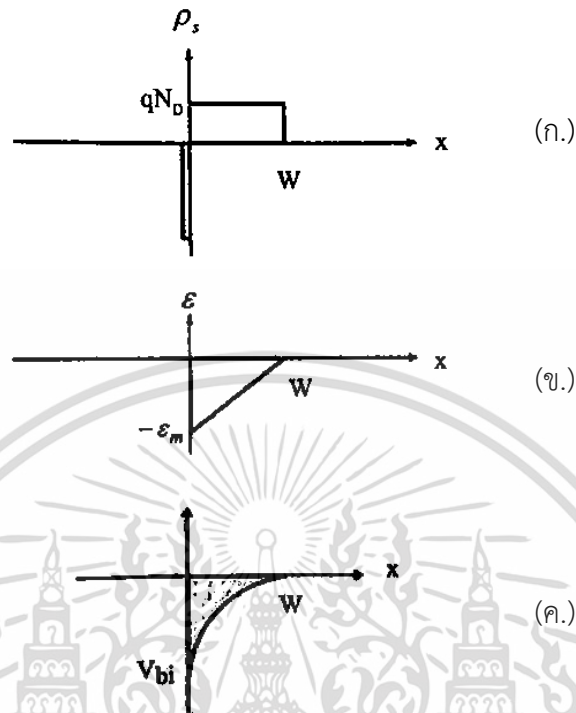
ซึ่งเรียกกำแพงศักย์ด้านนี้ว่า กำแพงศักย์แบบขอตติกี ดังนั้นอิเล็กตรอนทางโลหะจึงไม่สามารถไหลข้ามผิวรอยต่อได้ถึงแม้จะไบแอสย้อนกลับ จึงมีลักษณะเป็นเหมือนไดโอดที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียวเท่านั้น จึงเรียกอีกอย่างได้ว่าเป็น ไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้า (rectifier diode)



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงาน เมื่อเป็นรอยต่อแบบขอตติกีระหว่าง
 ก. โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
 ข. โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการกระจายความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า ที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะแสดงดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก. ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่ตรงบริเวณผิวรอยต่อ
 ข. การกระจายของสนามไฟฟ้าตรงบริเวณผิวรอยต่อ
 ค. ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตรงบริเวณผิวรอยต่อ

2.13.1.1 บริเวณพร่องพาหะ (depletion region) ของรอยต่อแบบขอตต์กีระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การนำโลหะมาทำผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นแบบขอตต์กี จะทำให้เกิดบริเวณพร่องพาหะขึ้นที่ผิวหน้าของรอยต่อ โดยมีความกว้างเท่ากับ x_d หรือ w อะตอมผู้ให้ที่ถูกรื้อออกในสารกึ่งตัวนำจะเป็นประจุบวกที่ฝังตัวอยู่กับที่ (fixed charge) ส่วนพาหะอิสระที่มีประจุเป็นลบ คือ อิเล็กตรอน โดยมีปริมาณเท่ากับประจุบวก จะสะสมอยู่ที่ผิวหน้าโลหะ และลึกลงไปในเนื้อโลหะเป็นระยะทาง x_m ที่เรียกว่า ระยะบดบังของพาหะอิสระในโลหะ ซึ่งจะทำให้เกิดแถบพลังงานโค้งงอเนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะ มีมากกว่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือในสารกึ่งตัวนำ และ $x_m \ll x_d$ สามารถประมาณได้ว่าที่บริเวณรอยต่อมีศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อทางด้านโลหะ (v_m) ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำ (v_s) ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตรงบริเวณผิวรอยต่อหรือศักย์ไฟฟ้าภายใน จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{bi} = \phi_B - (E_C - E_F) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\phi_B = \phi_m - \chi_s$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะสามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นของประจุ $\rho(x)$ โดยใช้สมการปัวซงของเพื่อหาพลังงานศักย์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic potential; ψ) ที่ตำแหน่งใดๆ จะได้ว่า

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{1}{\epsilon_s \epsilon_0} \rho(x) \quad (2.12)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าของ $\rho = qN_D$ ดังนั้นความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ x_d จะมีค่า

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{bi}}{qN_D}} \quad (2.13)$$

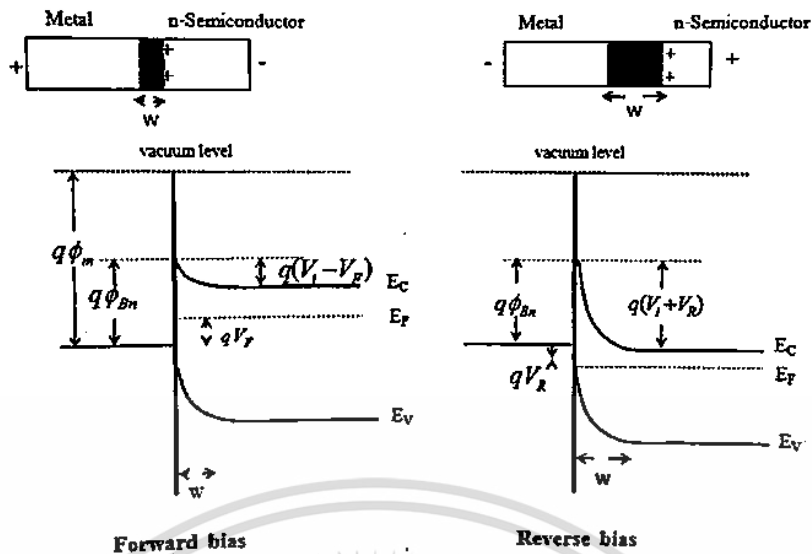
แต่ถ้ามีการไบแอสตรง (forward bias) ให้กับรอยต่อแบบขอตต์กี จะประมาณว่าแรงดันไบแอส V จะตกคร่อมที่รอยต่อทั้งหมด ส่งผลให้ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะมีการเปลี่ยนไปเป็นดังนี้

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (V_{bi} - V)}{qN_D}} \quad (2.14)$$

2.13.1.2 การไบแอสตรงของรอยต่อแบบขอตต์กี

2.13.1.2.1 การไบแอสตรงของรอยต่อแบบขอตต์กี ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

เมื่อทำการไบแอสตรงโดยให้แรงดันไฟบวกแก่โลหะ และให้แรงดันไฟลบกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนรวมตัวกับโฮล (เกิดจากอิเล็กตรอนไหลข้ามรอยต่อไปยังโลหะ) ที่บริเวณผิวรอยต่อและส่วนด้านโลหะเมื่อต่อกับแรงดันไฟบวก ก็จะทำให้มีประจุบวกรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวรอยต่อทำให้บริเวณพร่องพาหะแคบลง ดังนั้นจะมีอิเล็กตรอนจากโลหะสามารถไหลข้ามผิวของรอยต่อแบบสัมผัสไปยังสารกึ่งตัวนำได้ ส่วนอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ได้มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยลงเท่ากับ $V_i - V_A$ แต่ความสูงของกำแพงศักย์ขอตต์กีทางด้านโลหะจะมีขนาดเท่าเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.25 แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงาน ของรอยต่อแบบขอตต์ กิ่งตัวนำชนิดเอ็น ในขณะที่มีการไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ

เมื่อไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) โดยให้แรงดันไฟบวกแก่สารกึ่งตัวนำ และให้แรงดันไฟลบแก่โลหะ เนื่องจากอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำรวมตัวกันกับประจุบวกที่ให้เข้าไป ส่งผลทำให้มีอิเล็กตรอนน้อยลง แต่โฮลเพิ่มมากขึ้น บริเวณพร่องของพาหะจึงขยายกว้างมากขึ้น และสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อสัมผัสมีค่าสูงขึ้น ความสูงของกำแพงศักย์ ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ $V_i + V_A$ ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำก็ไม่สามารถไหลข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านโลหะ แต่อิเล็กตรอนทางด้านโลหะสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตต์ก็ซึ่งมีขนาดเท่าเดิม ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current) ซึ่งกระแสอิ่มตัวย้อนกลับขณะไบแอสย้อนกลับ ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่เกิดขึ้นในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่โดยประมาณ ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันที่ไบแอส

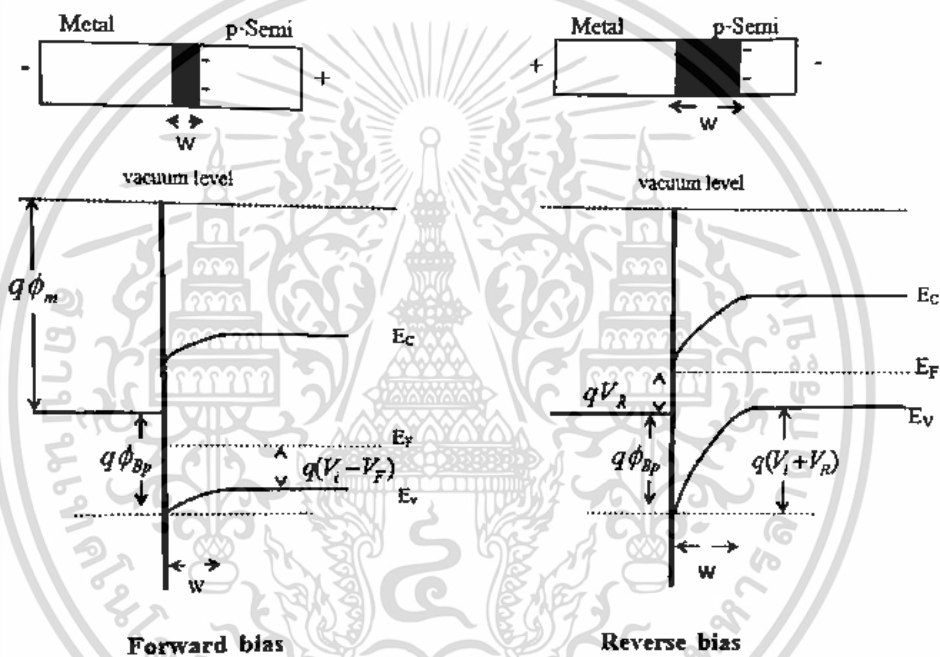
2.13.1.2.2 การไบแอสตรงของรอยต่อแบบขอตต์กึ่งที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นเมื่อนำมาทำให้เกิดรอยต่อแบบสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ จะมีการถ่ายเทประจุโดยอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะ สามารถไหลข้ามรอยต่อไปทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทั้งให้เกิดประจุบวกไว้บริเวณผิวรอยต่อจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ระดับพลังงานเฟอร์มิทั้งสองเท่ากัน และทำให้แถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพียกตัวสูงขึ้น ส่วนอิเล็กตรอนที่ไหลข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเกิดการรวมตัว (recombination) กับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อทำให้ความหนาแน่นของโฮลที่ผิวรอยต่อลดลง จากการที่ความหนาแน่นของประจุทั้งสองด้านไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสนามไฟฟ้าที่เกิดบริเวณนี้จะกวาดต้อนอิเล็กตรอนกับโฮลไปคนละด้าน ดังนั้นที่บริเวณนี้จึงไม่มีพาหะอิสระเหลืออยู่ จึงถือว่าเป็นบริเวณพร่องของพาหะ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผิวรอยต่อ จะมีทิศทางจากด้านโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งต่อต้านการไหลของโฮลจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไม่ให้ไหลข้ามรอยต่อไปยังผิว รอยต่อทางด้านโลหะ ซึ่งก็คือมีกำแพงพลังงานศักย์ของโฮลเกิดขึ้นนั่นเอง

เมื่อทำการไบแอสตรงโดยให้แรงดันโพลบวกแก่โลหะ และให้แรงดันโพลบวกกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี ทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนรวมตัวกับ โฮล (เกิดจากอิเล็กตรอนไหลข้ามรอยต่อไปยังโลหะ) ที่บริเวณผิวรอยต่อและส่วนด้านโลหะเมื่อต่อกับ โพลบวกก็จะทำให้มีประจุรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวรอยต่อทำให้บริเวณพร่องของพาหะแคบลง ดังนั้นจะมีอิเล็กตรอนจากโลหะสามารถไหลข้ามผิวรอยต่อแบบสัมผัสไปยังสารกึ่งตัวนำได้ ส่วน อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ได้มากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากความสูงของ กำแพงศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยลง เท่ากับ $V_i - V_A$ แต่ความสูงของกำแพงศักย์ขอตตกี ทางด้านโลหะจะมีขนาดเท่าเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.26 แสดงแผนภาพแบบบล็อกและแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงาน ของรอยต่อแบบขอตตกี ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่มีการไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ

2.13.2 รอยต่อแบบขอตตกีทั่วไป

การประดิษฐ์รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงการเกิด ข้อบกพร่องผลึกประเภทต่างๆ ตรงบริเวณผิวรอยต่อได้ เช่น การเกิดขึ้นออกไซด์ระหว่างผิวรอยต่อ ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้มีสถานะผิว (surface state) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อ การเกิด กับดักประจุที่บริเวณผิวรอยต่อ ปรากฏการณ์ขอตตกี (schottky effect) ความสูงของกำแพงศักย์เอก พันธ์ (inhomogeneous barrier height) ตลอดทั่วผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อ เป็นต้น

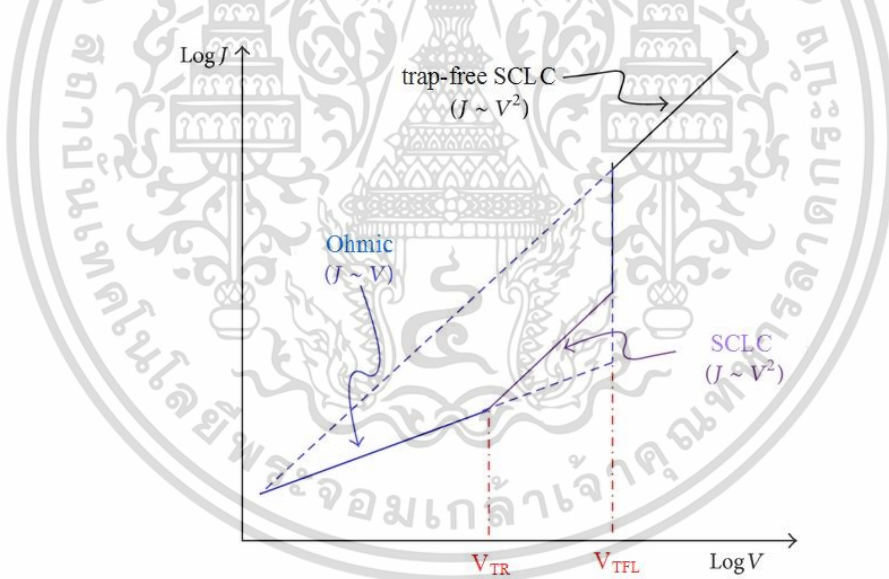
2.14 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำ (Space Charge Limited Current) [34, 40]

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำ เป็นผลมาจากประจุที่อยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำหรือของแข็งที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล ไม่เท่ากับกับดักของอิเล็กตรอนและโฮล สารกึ่งตัวนำหรือของแข็งที่เป็นกลางจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับกับดักประจุ จึงทำให้ความหนาแน่นประจุค้ำเป็นศูนย์ การเจือสารที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วเนื้อสารทำให้บางบริเวณมีความหนาแน่นมาก แต่บางบริเวณมีความหนาแน่นน้อย ดังนั้นประจุจึงเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยเมื่อมีการกระตุ้นภายนอก

สมมุติให้บริเวณพร่องพาหะไม่มีประจุ ดังนั้นประจุค้ำที่อยู่ในเนื้อสารจะเท่ากับจำนวนพาหะข้างมาก เมื่อมีการไบแอสจะทำให้มีความเข้มข้นของประจุเพิ่มขึ้น จากสถานะสมดุลและเกิดผลของประจุค้ำที่เรียกว่า กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำ โดยทั่วไปพบในสารที่เจือปริมาณน้อย หรือมีการไบแอสแรงดันไฟฟ้าสูงๆ และเกิดขึ้นนอกบริเวณพร่องของพาหะ

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำ สามารถเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$J = kV^m \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟการนำไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ

สำหรับกรณี $m = 1.5$ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดถูกจำกัดโดยประจุค้ำ เนื่องมาจากผลของกับดักประจุมีระดับพลังงานเป็นแบบระดับพลังงานเดี่ยว (single level) ซึ่งเป็นไปตามกฎของไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir Law)

สำหรับกรณี $m = 2$ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดจำกัดกระแสโดยประจุค้ำที่สัมพันธ์กับกับดักประจุ ที่มีระดับพลังงานเดี่ยวและความหนาแน่นของกับดักประจุน้อยกว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's Law)

สำหรับกรณี $m > 2$ จะหมายความว่า กักตักประจุมีระดับพลังงานที่ต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ที่ได้มีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับแรงดันไฟฟ้าโดยแลมเพิร์ตและมาร์ก (Lempert and Mark)

2.15 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์ [34]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.28 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสขึ้นขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนี้กระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบแอสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.17)$$

โดยที่

V คือ แรงดันไบแอสตรง

n คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

E_a คือ พลังงานกระตุ้น

k คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์ $= 1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน

J_{00} คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

ซึ่ง J_{00} จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน (V_b) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

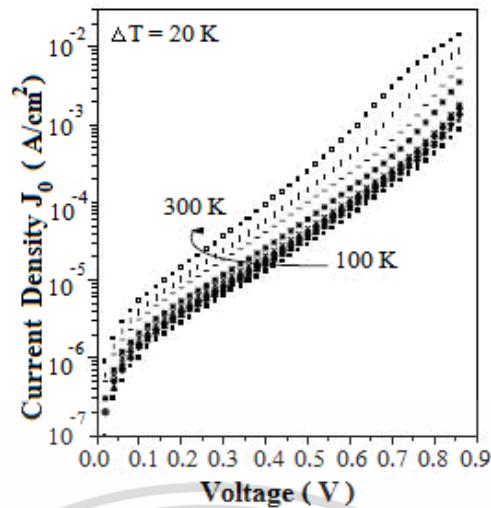
$$J_{00} = qS_p N_v \left[\frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-qV_n}{kT} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.18)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.19)$$

เมื่อ S_p คือ ความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล, N_v คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ (ϕ_b^p) คือ กำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ

ค่า J_0 นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อวิวิธพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแส เนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่คิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่าน กำแพงศักย์) คือแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกักตัก ประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี และ $\ln J_0$ จะแปรผกผันกับ อุณหภูมิ ($\ln J_0 \propto T^{-1}$)

2.15.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

ชอกก์เลย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะใน บริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

จากแบบจำลองของ ชอกก์เลย์-รีด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) มี ค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง J_0 จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น $E_g/2$ สำหรับกรณีที่กัก ตักประจุมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น $p-n^+$) ปริมาณ $N_D > N_A$ กระแสของการรวมตัว ของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะ ขึ้นอยู่กับ $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$ ซึ่ง N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของ อะตอมผู้รับ ส่วนค่า ϵ_n และ ϵ_p คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี ตามลำดับ

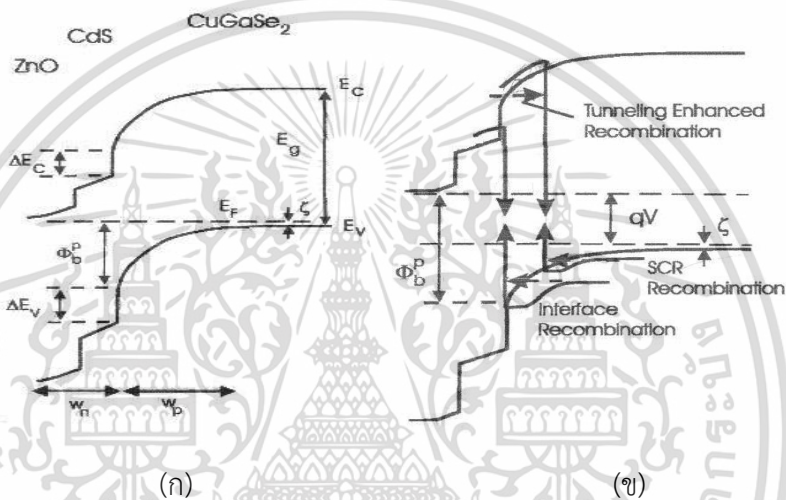
2.15.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความ หนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A คือ ความชันของกราฟระหว่าง $\ln J$ กับ V ซึ่งค่าของ A ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่า แฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น $\ln J_0$ จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง $\ln J_0$ ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อขอตติ์ การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุหลายระดับโฮลจะชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้ J_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.29 แสดงกลไกผลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะ

- ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิธีพันธุของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe₂ และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบแอสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.21) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln(J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (2.21)$$

พลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $n \ln J_0$ กับ $1/T$ พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดการนำกระแสเกิดจากการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ แล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน (E_g) ของตัวดุกกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสงชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แพกเตอร์อุดมคติของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \tag{2.22}$$

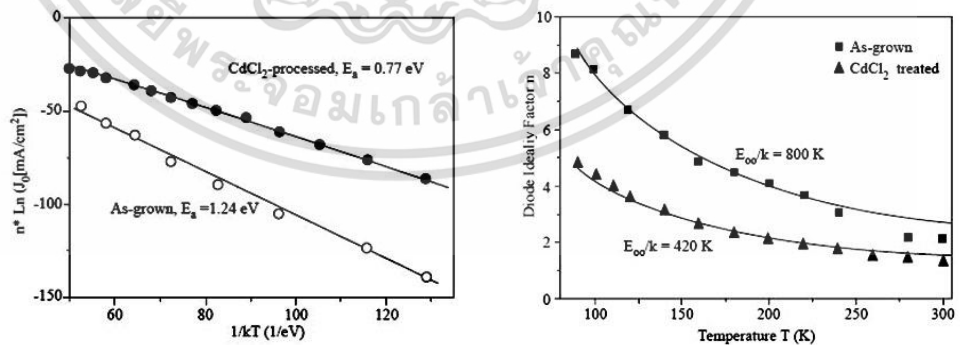
โดย E_{00} คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม E_{00} คือ

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.23}$$

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ ϵ_s คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง แพกเตอร์อุดมคติของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \tag{2.24}$$

ซึ่ง kT^* คือ ลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.30 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และค่าแพกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิจึงตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย CdCl_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [20-34]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีกระแสแสดงรูปที่ 2.31 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอสหรือไม่มีการไบแอส ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.31 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

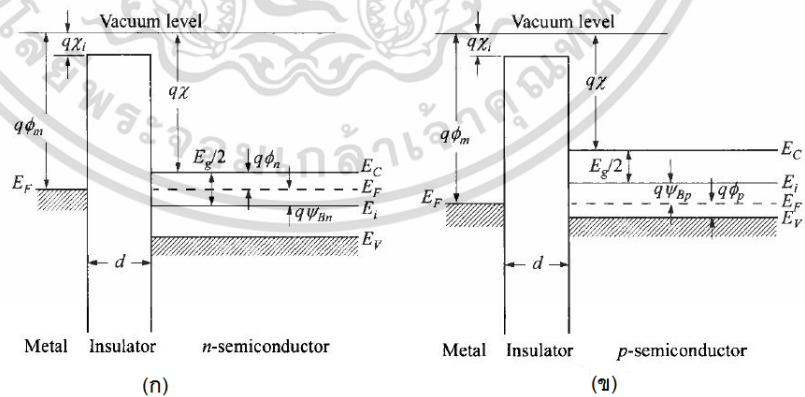
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (2.25ก.)}$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (2.26ข.)}$$

เมื่อ χ, χ_i คือ อิเล็กตรอนออฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

ψ_{Bn}, ψ_{Bp} คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน

ϕ_n, ϕ_p คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน



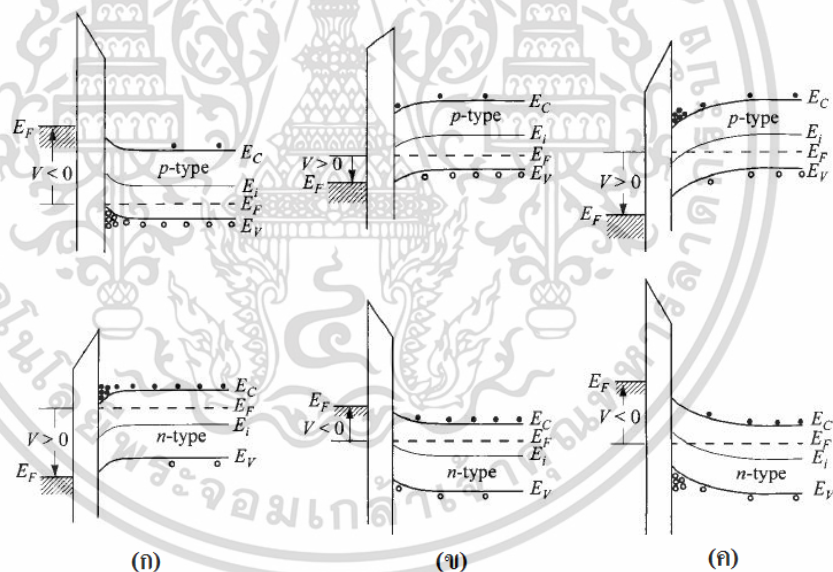
รูปที่ 2.31 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล (V=0)

ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น

ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนชั้นโดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.32 โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งนวิสำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ดูเห็นไปใช้ประโยชน์จากการคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีแรกตามรูปที่ 2.32 (ก.) เมื่อทำการจ่ายแรงดันโพลให้กับขั้วโลหะ ($V < 0$) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการชุมนุมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งขึ้นเนื่องจากการชุมนุมของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อโดยกรณีนี้จะเรียกว่าช่วงชุมนุมพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันโพลที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นโพลบวก ($V > 0$) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาชุมนุมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก (E_i) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าช่วงพร่องพาหะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.32 (ข.) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันโพลบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรีนสิก (E_i) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนชุมนุมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.32 (ค.) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าช่วงกลับกลาย (inversion case)



รูปที่ 2.32 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด

- ก. ช่วงชุมนุมพาหะ
- ข. ช่วงพร่องพาหะ
- ค. ช่วงกลับกลาย

2.17 กับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [16, 18-19, 30-34]

กับดักที่ผิวเชื่อมต่อจะแสดงลักษณะถึงความเป็นผู้ให้ (donor) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุบวก (+) โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกไป และเช่นเดียวกับลักษณะของผู้รับ (accepter) จะมีการรับเอาอิเล็กตรอนเข้ามาจนเปลี่ยนลักษณะทางไฟฟ้าจากเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุลบ (-) ฟังก์ชันการแจกแจงของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อสามารถเขียนได้ 2 กรณี ได้แก่

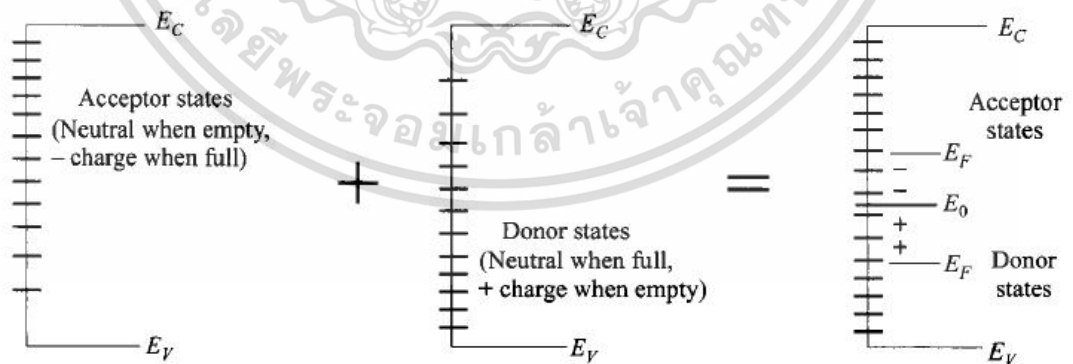
สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบผู้ให้

$$F_{SD}(E_i) = \left[1 - \frac{1}{1 + (1/g_D) \exp[(E_i - E_F)/kT]} \right] = \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_i)/kT]} \tag{2.27 ก.}$$

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบผู้รับ

$$F_{SA}(E_i) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_i - E_F)/kT]} \tag{2.27 ข.}$$

- เมื่อ E_i คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ
- g_D คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของผู้ให้
- g_A คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของผู้รับ



รูปที่ 2.33 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากรูปที่ 2.33 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ E_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

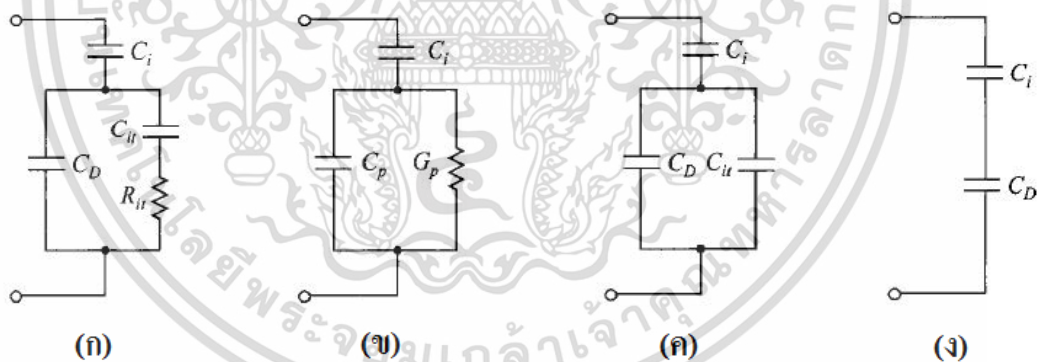
ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิต้อง โอกาส การจับประจุของกัณฑ์ประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุอยู่สูงกว่าและ อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\ &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \end{aligned} \quad (2.28)$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับ พลังงานของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษา ได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (2.29)$$

สมการที่ (2.29) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด Q_{it} ที่ เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (Ψ_s) ที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.34 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{it} และ R_{it} ของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อรวมอยู่ด้วย
ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ
ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับบรรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มีจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับ พลังงานของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกัณฑ์ ประจุนี้จะส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน ($C-V$) ของ MIS แตกต่าง ไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกัณฑ์ประจรรวมอยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.34ก. โดยที่ C_i และ C_D เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ ส่วน C_{it} และ R_{it} คือค่า ความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกัณฑ์ประจุซึ่งกัณฑ์ประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณของ C_{it} R_{it} จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (τ_{it}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก C_p และ G_p จะต่อขนานกันทั้ง C_p และ G_p จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.30)$$

และ

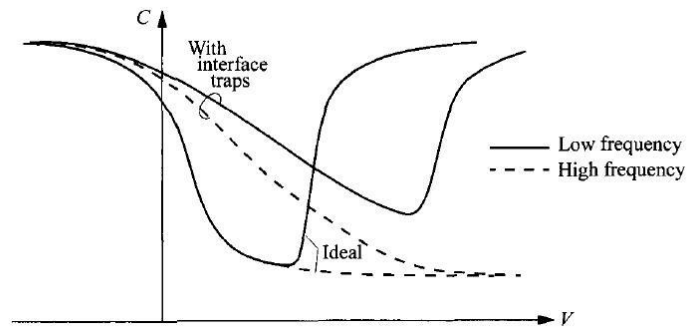
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.31)$$

สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ R_{it} ของวงจรมุมูลในรูปที่ 2.34ข. จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้ว C_D จะขนานกับ C_{it} ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด C_{it} และ R_{it} ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

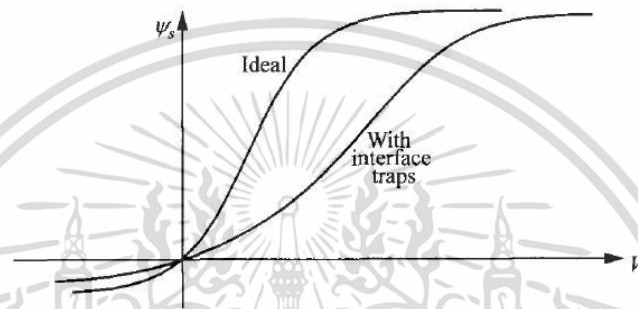
$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{it})}{C_i + C_D + C_{it}} \quad (2.32)$$

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง (C}_{HF}\text{)} \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.33)$$

รูปที่ 2.35ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ $C-V$ ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (Ψ_s) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า (Ψ_s) ในรูปที่ 2.35ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Psi_s - V$ สามารถนำไปคำนวณหา D_{it} ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ D_{it}



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.35 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุ กับ แรงดันของรอยต่อ MIS
 ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s

2.18 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

2.18.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพท์จะเท่ากับ ผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

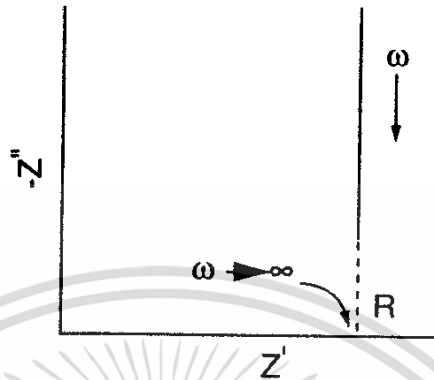
$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.34)$$

อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ ดังนั้น $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$ และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - \frac{j}{\omega C} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ R_S เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน $1/\omega C$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่อค่า R_S จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.18.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

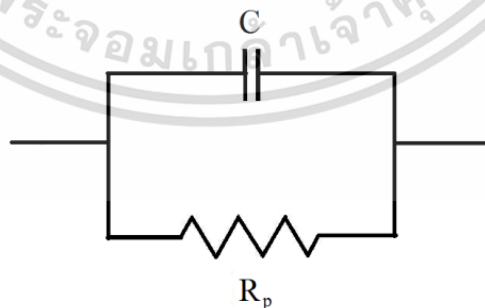
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.37 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.36)$$

ในกรณีนี้ให้ $Z_R = R_P$ ดังรูปที่ 2.37 ดังนั้นสมการ (2.36) จะกลายเป็น

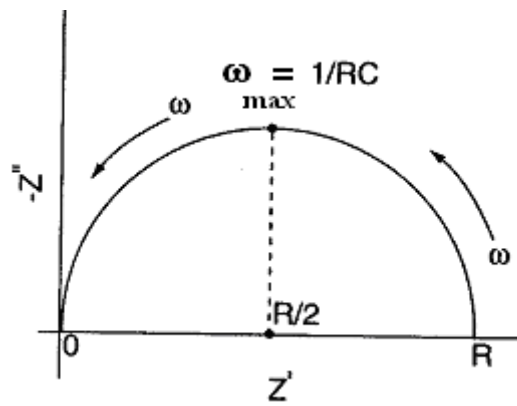
$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_P} + j\omega C \quad (2.37)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_P C)}{R_P} \quad (2.38)$$



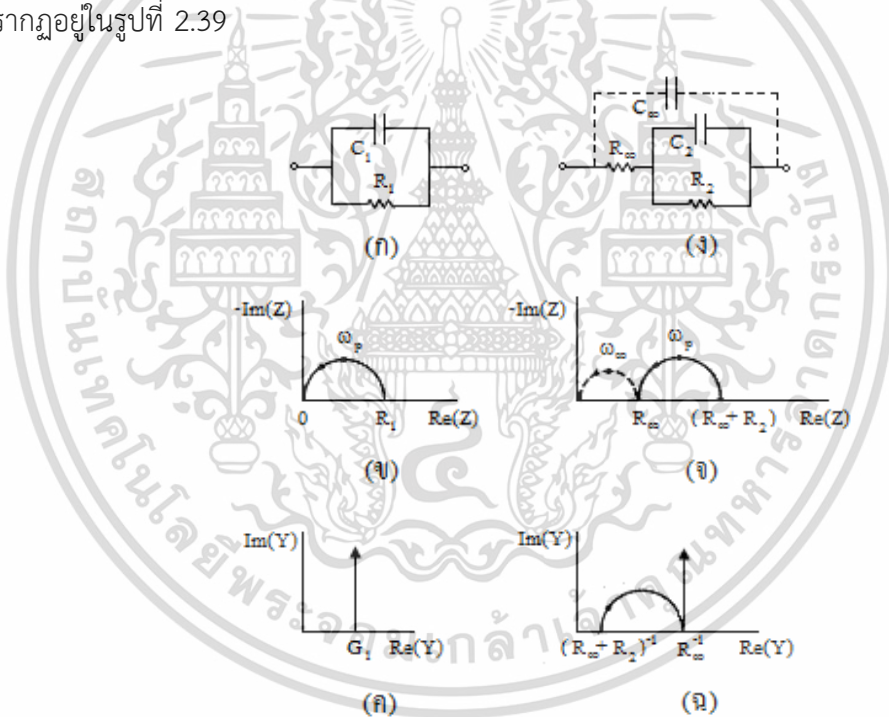
รูปที่ 2.37 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,ฉ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในรูปที่ 2.39 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance: R_b) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ R_{∞} หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาพอนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_p และจะปรากฏอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.39(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_P \tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{\max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{\max} \tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{\max} \tau_D \geq 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีนี้ที่ $R_1 = R_\infty$ และ $C_1 = C_\infty$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.39(ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนรูปที่ 2.39(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไขปลาตั้งรูปที่ 2.40(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแดรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z^* = Z' - jZ''$ และเขียน $\text{Im}(Z^*)$ แทน $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรตั้งรูปที่ 2.39(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพท์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ($j\omega C_1$) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.39)$$

กราฟของสมการที่ (2.39) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.39(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.39(ง) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.40)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.40) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.39(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.39(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมาคือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีทั่วไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่า Z' กับ Z'' มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.41)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.42)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในรูปที่ 2.39 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_S) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.18.3 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่ ω ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.43)$$

เมื่อ $G(\omega)$ คือความนำไฟฟ้า และ $C(\omega)$ คือความจุไฟฟ้า ทั้งค่าจำนวนจริง $G(\omega)$ และจำนวนจินตภาพ $\omega C(\omega)$ จะเกี่ยวข้องกันตามความสัมพันธ์ของ เครมเมอร์-โครนิก (Kramers-Kronig relation)

ในกรณีรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งคิดกรณีเฉพาะที่มีแต่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับต้น ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจากพาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริกดังสมการ

$$\tau_D = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2.44)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้าและ ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แต่ถ้าความถี่สูงกว่าค่า $\frac{1}{\tau_D}$ แล้วพาหะข้าง

มากจะไม่ตอบสนองต่อความถี่และถ้าความถี่ยิ่งสูงขึ้นไปอีก สารกึ่งตัวนำนี้จะประพฤติตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า และ C จะมีค่าลดลงจนกลายเป็นความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่าขึ้นกับรูปทรงของสารตัวอย่างซึ่งเรียกว่า ความจุเรขาคณิต ความถี่การผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (dielectric relaxation frequency) ของความจุเรขาคณิตนี้ จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารตัวอย่างได้ถ้า σ เปลี่ยนตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในสารตัวอย่างที่เป็นสารพหุพันธ์ (polycrystalline materials) พลังงานการกระตุ้น (activation energy) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายพาหะอิสระซึ่งถูกจำกัดโดยกำแพงศักย์ที่อยู่ภายในเกรนหรือที่บริเวณรอยต่อเกรน (grain-boundaries)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อขอตต์ก็ก็เป็นรอยต่อที่ง่ายสุด ความจุของรอยต่อนี้เกิดขึ้นที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วนรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe จะประมาณว่าเป็นรอยต่อ n⁺-p โดยความจุของรอยต่อนี้จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{SCR} = \frac{\epsilon_s}{W} = \left(\frac{\epsilon_s q N_a}{2V_{bi}} \right)^2 \quad (2.45)$$

เมื่อ W คือความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ, N_a คือความหนาแน่นของผู้รับ, ε_s คือคงที่ไดอิเล็กทริก และ V_{bi} คือแรงดันในตัว (built-in voltage) กับดักประจุที่อยู่ในบริเวณพร่องพาหะก็มีผลต่อความจุของรอยต่อด้วยกล่าวคือกับดักประจุที่มีพลังงานเท่ากับระดับเฟอร์มิของอิเล็กตรอน (E_Fⁿ) หรือของโฮล (E_F^p) กับดักประจุนั้นจะมีการให้ประจุและมีการคายประจุ (charging and discharging) สำหรับกับดักประจุชนิดเดี่ยว (single trap) จะส่งผลทำให้ความจुरวมเป็นดังนี้คือ

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{if} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^{*2}} \quad (2.46)$$

เมื่อ C_{if} คือค่าความจุที่ความถี่ต่ำซึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นกับดักประจุ (trap density : N_T) และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) ส่วน τ* คือค่าคงตัวเวลา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ N_T, N_a และ W ของบริเวณพร่องพาหะในกรณี N_T << N_a ค่าคงตัวเวลา τ* จะมีค่าเข้าใกล้ค่า τ_o = $\frac{1}{\omega_o}$

เมื่อ ω_o คือความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\omega_o = 2N_V v_{th} \sigma_p \exp\left(-\frac{E_T - E_V}{kT}\right) \quad (2.47)$$

โดยที่ N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์, v_{th} คือ ความเร็วของโฮลเนื่องจากพลังงานความร้อน, E_T คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ และ σ_p คือ ความน่าจะเป็นหรือ ภาคตัดขวางของการจับโฮล (capture cross section of hole) แต่เนื่องจาก N_V และ v_{th} ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น สมการ (2.47) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_o = \xi_o T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.48)$$

เมื่อ E_T = E_V = E_a ซึ่งก็คือขนาดของระดับพลังงานกับดักประจุเมื่อเทียบกับขอบของแถบวาเลนซ์และนิยมเรียก E_a ว่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นกับดักประจุจะสามารถจับประจุหรือคายประจุได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของการวัด ω มีค่าน้อยกว่า ω_o นั่นคือ ω_o จะสัมพันธ์กับอัตราการคายประจุของกับดักประจุนั่นเอง ส่วน ξ_o เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการคายโฮลออกจากกับดักประจุซึ่ง ξ_o จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ξ_o คงยังขึ้นกับ E_a ดังความสัมพันธ์

$$\xi_o = \xi_{o_o} \exp\left(\frac{E_a}{E_{o_o}}\right) \quad (2.49)$$

เมื่อ ξ_{o_o} และ E_{o_o} คือค่าคงที่ของกลไกการหลุดของโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์

ในกรณีที่กักประจุไม่เป็นกักประจุชนิดเดียว แต่จะเป็นกักประจุชนิดที่มีระดับพลังงานจำนวนมาก การแจกแจง (distribution of trap) กักประจุ (N_T) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$N_T(\omega) = c(E_\omega) \frac{\omega}{kT} \frac{dC(\omega)}{d \ln \omega} = \frac{c(E) dC(\omega)}{kT d \ln \omega} \quad (2.50)$$

ฟังก์ชัน $C(E_\omega)$ จะครอบคลุมการแจกแจงความหนาแน่นของกักประจุ ซึ่งจะขึ้นกับตำแหน่งของระดับพลังงานของกักประจุ ถ้าแทนสมการ (2.50) ลงในสมการ (2.49) และเปลี่ยนตัวแปร E_a เป็น E_ω จะได้ว่า

$$E_\omega = \frac{kTE_{o_o}}{E_{o_o} - kT} \ln\left(\frac{\xi_{o_o} T^2}{\omega}\right) \quad (2.51)$$

ซึ่ง E_ω ของสมการที่ (2.51) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน E_a จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกักประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงที่เวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ (E_F^n) หรือ (E_F^p) จะหาได้จากความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง ω_o สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ $C(\omega)$ ค่าพลังงานกระตุ้นของ ω_o จะขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยที่แรงดันไบแอสจะเป็นตัวกำหนดระดับเฟอร์มิ (E_F^n) หรือ (E_F^p) เว้นเสียแต่ระดับเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะพลังงานระหว่างผิวรอยต่อที่สูงมาก จากแอดมิทแตนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากสมการ (2.44) ความถี่เชิงมุม ω_D ที่สอดคล้องกับ τ_D จะแสดงได้ดังสมการ

$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

พิจารณาที่อุณหภูมิ ω_D ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ความถี่เชิงมุม ω ที่ใช้ในการวัด ω มีค่ามากกว่า ω_D ($\omega > \omega_D$) พาหะอิสระไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุเรขาคณิตคือ

$$C_{geo} = \frac{\epsilon_s}{d} \quad (2.52)$$

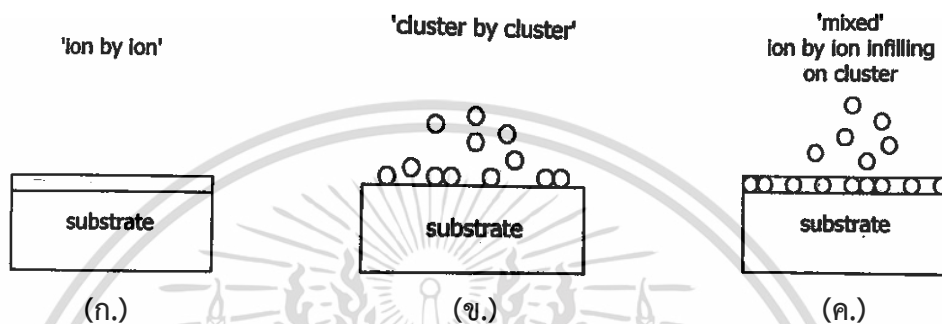
เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.19 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมี [31, 38]

2.19.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา

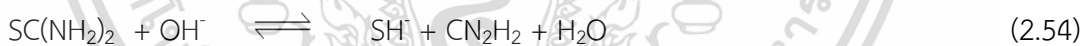
ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สามารถทำได้ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี โดยการจุ่มแผ่นฐานรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ ซึ่งสารละลายที่ใช้ประกอบไปด้วย ไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) เกลือแคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) ไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) ตามลำดับ โดยในการเตรียมฟิล์มนี้จะมีค่า pH ของสารละลายในอ่างอบสารละลายเคมีประมาณ 10.6-11.8 ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางจะเกิด Cd^{2+} อย่างช้าๆ โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



รูปที่ 2.40 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง

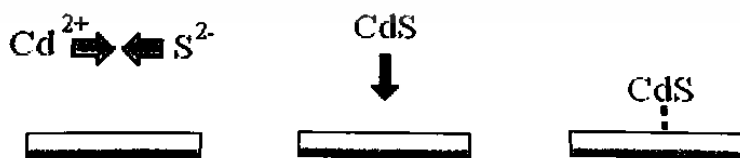
- กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส
- กระบวนการโฮโมจีเนียส
- กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรจีเนียสและโฮโมจีเนียส

2.19.1.1 กระบวนการโฮโมจีเนียส (Homogeneous reaction)



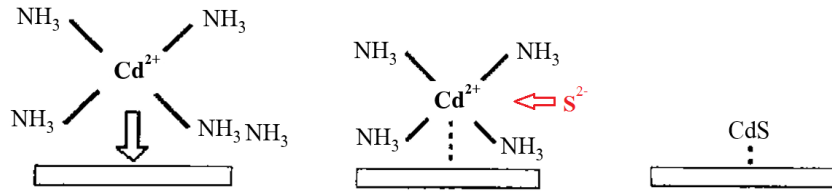
เมื่อ K_e คือ ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant)

K_{sp} คือ ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product)



รูปที่ 2.41 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมจีเนียส

2.19.1.2 กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous reaction)



รูปที่ 2.42 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรจีเนียส

2.19.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์

ในการตกผลึกของ CdS ค่าผลผลิตการละลาย (solubility product ; K_{sp}) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant ; K_c) ในการตกผลึกจึงเกิดกลไกได้ 2 แบบ ดังนี้คือ

1. กลไกการตกผลึกภายในเนื้อสาร โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบเอกพันธ์ (homogeneous precipitation) หรือกลไกการจับตัวกันแบบกลุ่มก้อนต่อกลุ่มก้อน (cluster by cluster) ซึ่งจะมาจับตัวกันอยู่บนผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับดังรูป 2.41
2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับ เรียกว่า ไอออนต่อไอออน (ion by ion) หรือการตกผลึกแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous precipitation) ซึ่ง Cd^{2+} จะไปจับกับ NH_3 กลายเป็น $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ แล้วจะเคลื่อนที่มายังตำแหน่งบนผิวแผ่นฐานรองรับเกิดการดูดซับ (absorption) อิเล็กตรอนทำให้โมเลกุลของแอมโมเนียหลุดออกมาในขณะนั้นเอง ไอออน S^{2-} ที่อยู่บริเวณนั้นจะสร้างพันธะรวมตัวกับแคตไอออน หรือซิงค์ไอออนกลายเป็น CdS ดังรูปที่ 2.42

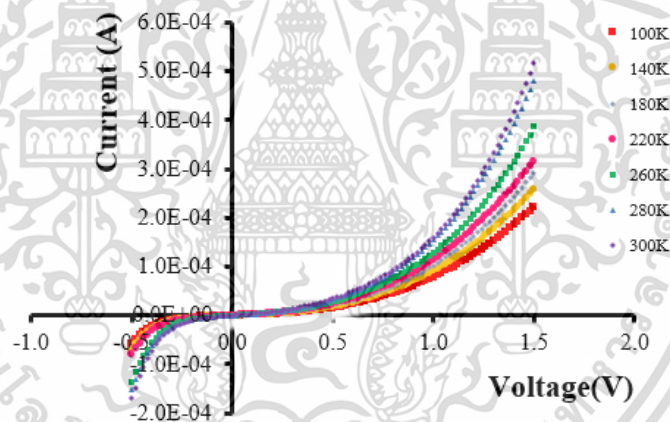
เนื่องจากผลของความสามารถในการละลาย CdS มีค่าต่ำมาก ดังนั้นการควบคุมการตกผลึกสามารถทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของไอออนอิสระ Cd^{2+} กล่าวคือต้องเลือกตัวแทนเชิงซ้อน (complexing agent) ที่เหมาะสมเพื่อที่จะปล่อยไอออน Cd^{2+} กลายเป็นไอออนเชิงซ้อน (complexing ions) ลดกระบวนการเกิดฟิล์มแบบโฮโมจีเนียส ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมคุณภาพและอัตราการเกิด นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของ NH_3 ยังช่วยลดคลอไรด์ $\text{Cd}(\text{HO})_2$ ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการในปฏิกิริยาอีกด้วย

2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [41-43]

ฐิตินัยและงานนิตย [41] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเมตเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังปรากฏในรูปที่ 2.43 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ CuO และของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ 10^{16} และ 10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ p⁺-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อขอตต์ก็โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS

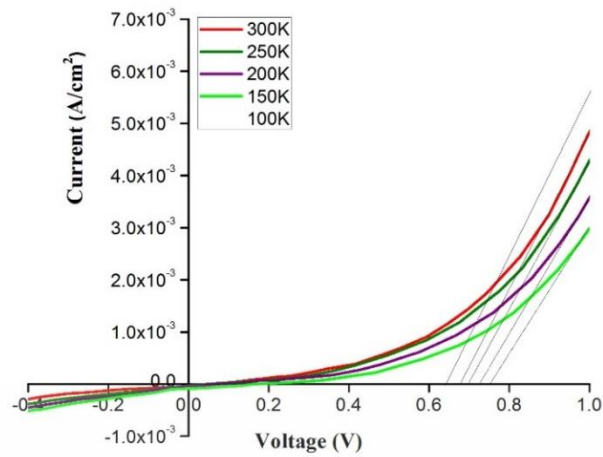
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์



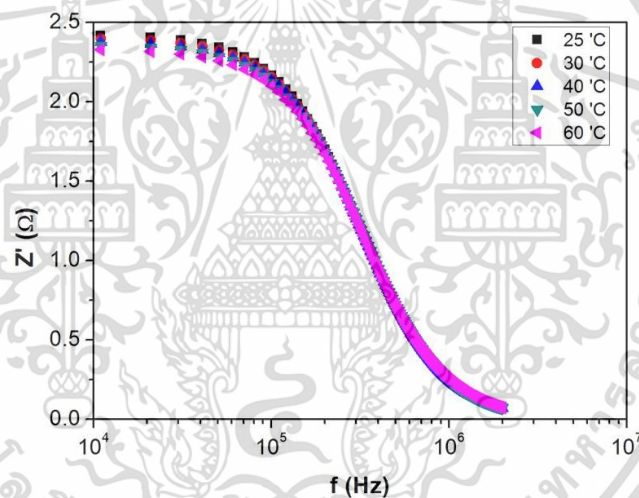
รูปที่ 2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากนั้นได้มีการรายงานสมบัติทางไฟฟ้า ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และฟิล์มบาง CuO เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [42] ด้วยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10 - 300 เคลวิน และวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 25 - 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกับดักพาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS กับ p-CuO

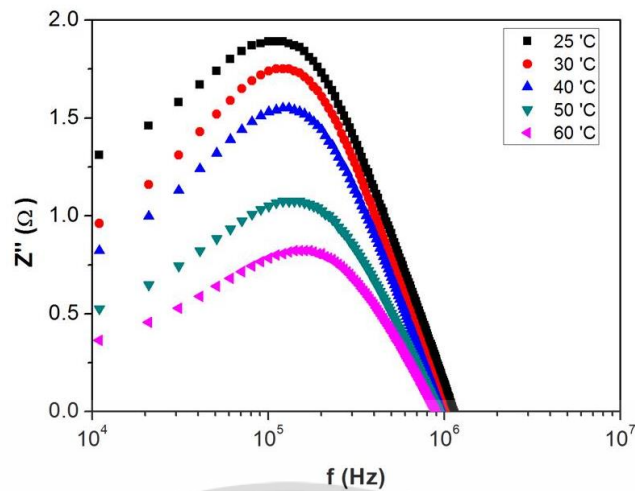
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

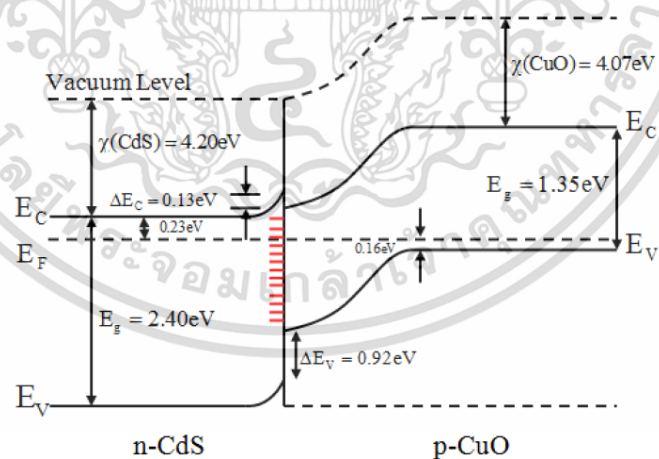


รูปที่ 2.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



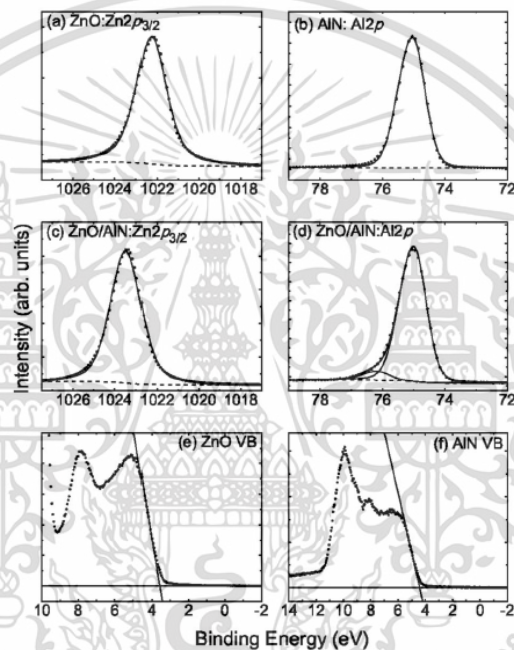
รูปที่ 2.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากข้อมูลการทดลองที่ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และพลังงานกระตุ้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้ดังรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

เวียล และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ (valence band offset) ของรอยต่อวิวิธพันธ์ ZnO/AlN ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการวัดสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray photoemission spectroscopy : XPS) พบว่าแถบวาเลนซ์ (valence band) ของ ZnO อยู่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ของ AlN โดยที่ผลต่างมีค่า 0.43 ± 0.17 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผลให้แถบนำ ZnO จะอยู่ต่ำกว่าแถบนำของ AlN ผลต่างของแถบนำทั้งสองนี้มีค่า 3.29 ± 0.20 อิเล็กตรอนโวลต์ รอยต่อวิวิธพันธ์ ZnO/AlN เป็นชนิดที่ II (type II) กล่าวคือ ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ZnO กับ AlN จะไม่สมทับกัน แต่จะเป็นสถานะที่เกยกัน (staggered) สำหรับความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ ZnO/GaN มีขนาด 1.37 อิเล็กตรอนโวลต์ และ ZnO/AlN มีขนาด 1.95 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.48 แสดงสเปกตรัม XPS ของธาตุ Zn ที่อยู่ในออร์บิทัล 2p_{3/2}, ธาตุ Al อยู่ในออร์บิทัล 2p ที่อยู่ในฟิล์มบาง ZnO, AlN และที่รอยต่อ ZnO/AlN ตามลำดับ

รูปที่ 2.48(a)-(d) แสดงสเปกตรัมของธาตุ Zn ที่อยู่ในออร์บิทัล 2p_{3/2} และสเปกตรัมของธาตุ Al อยู่ในออร์บิทัล 2p ที่ฟิตด้วยสมการ Shirley background & Voigt (mixed Lorentzian-Gaussian) โดยพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 2.3 ZnO และ ZnO/AlN แสดงสเปกตรัมธาตุ Zn ออร์บิทัล 2p_{3/2} ประกอบด้วยพันธะของ Zn-O และสำหรับ AlN แสดงสเปกตรัมธาตุ Al ออร์บิทัล 2p ประกอบด้วยพันธะ Al-N แต่อย่างไรก็ตามสเปกตรัมธาตุ Al ออร์บิทัล 2p ของ ZnO/AlN (รูปที่ 2.43(d)) จะแสดงส่วนประกอบของพลังงานยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้นจะมีความเข้มพลังงานที่ต่ำ ส่วนประกอบที่พิเศษของพันธะ Al-O ที่มีวงนักรอยต่อของ ZnO-AlN และ/หรือ สูญเสียความไม่ยึดหยุ่น จนกลายเป็นพาหะอิสระในชั้น ZnO

แถบวาเลนซ์ของสเปกตรัม XPS สำหรับความหนาของชั้น ZnO และความหนาของชั้น AlN แสดงในรูปที่ 2.48(e) และ (f) ตำแหน่งของค่ามากที่สุดของแถบวาเลนซ์ พิจารณาเทียบกับพื้นผิวระดับชั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงวิธีการเตรียมและวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ โดยการเคลือบฟิล์มบาง CuO ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เตรียมด้วยวิธีออบสารละลายเคมี ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย [18-19, 25-34]

3.1.1 การเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี

1. แผ่นกระจกสไลด์ 12x12 ตารางมิลลิเมตร
2. ปีกเกอร์ขนาด 200 ซีซี
3. อ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. เครื่องชั่งดิจิตอล
6. แทนยัด (Teflon holder)
7. แท่งแก้ว
8. ปากคีบ
9. กระจาดชลิทมัส
10. เครื่องกวนสารละลายเคมี (magnetic stirrer)
11. สารตั้งต้น
 - แคลเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$)
 - แกลลิอุมซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$)
 - ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$)
 - แอมโมเนีย (NH_3)
 - ไฮดราซีน (Hydrazine)
 - น้ำปลอดประจุ (Deionized water)

3.1.2 การทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี

1. ฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ทั้งที่เคลือบบนกระจกสไลด์และบนกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่เตรียมได้จากวิธีออบสารละลายเคมี
2. เครื่องอัลตราโซนิก
3. น้ำปลอดประจุ
4. แก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การเตรียมฟิล์มบาง CuO ด้วยวิธีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

1. กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
2. อะซิโตน (CH_3COOH)
3. สำลีสำหรับการเช็ดทำความสะอาด
4. เป้าคอปเปอร์ (Cu)
5. เครื่องสปัตเตอร์

3.1.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์

3.1.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

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

3.1.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope : FESEM) รุ่น JSM-7001F เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้

3.1.4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ HITACHI U-2900 Spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร

3.1.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

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

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/p-CuO

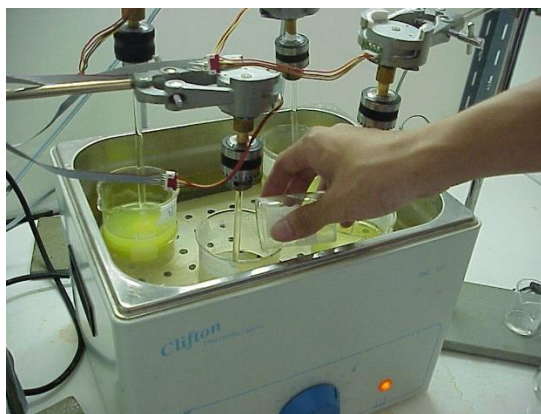
3.2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง Cd_{0.5}Zn_{0.5}S โดยวิธีออบสารละลายเคมี

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที 3 รอบ
5. นำแผ่นกระจกสไลด์เป่าให้แห้ง แล้วนำไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
6. นำแผ่นกระจกมาเก็บไว้ในภาชนะที่สามารถควบคุมความชื้นได้

หลังจากทำความสะอาดกระจกสไลด์ที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานรองรับเรียบร้อยแล้ว จึงนำแผ่นกระจกสไลด์นี้ไปทำการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลาย ซึ่งขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลาย มีขั้นตอนดังนี้

3.2.2 การเตรียมชั้น Cd_{0.5}Zn_{0.5}S ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานรองรับมาตัดออกให้ได้ขนาด 12x26 ตารางมิลลิเมตร
2. นำแผ่นฐานรองรับติดตั้งกับเครื่องกวนสารละลายเคมี แล้วจึงนำมาวางในบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปอดประจุบรรจุอยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางลงในอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ถึง 80 องศา และปรับความเร็วในการหมุนเครื่องกวนสารละลายเคมีให้มีความเร็วช้าที่สุด
3. เมื่ออุณหภูมิของน้ำปอดประจุที่อยู่ในบีกเกอร์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส เทสารแคดเมียมซัลเฟตจำนวน 0.3847 กรัม ที่ละลายในน้ำปอดประจุปริมาตร 10 มิลลิลิตร เทแอมโมเนีย 17 มิลลิลิตร เทสารโซเดียมซัลไฟด์จำนวน 0.5709 กรัม ที่ละลายในน้ำปอดประจุ 10 มิลลิลิตร แล้วจึงเทน้ำปอดประจุให้ท่วมแผ่นฐานรองรับตามลำดับ วัด pH ได้ประมาณ 11.6 ใช้เวลาในการออบสารละลายเคมี 60 นาที
4. นำแผ่นฐานรองรับไปเขย่าตะกอน (colloid) ออกด้วยน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที 3 รอบ โดยเปลี่ยนน้ำปอดประจุทุกรอบ
5. ออบสารละลายเคมีรอบที่ 2 และ 3 โดยทำตามขั้นตอน 2-4



รูปที่ 3.1 แสดงขณะเคลือบฟิล์มโดยวิธีออบสารละลายเคมี

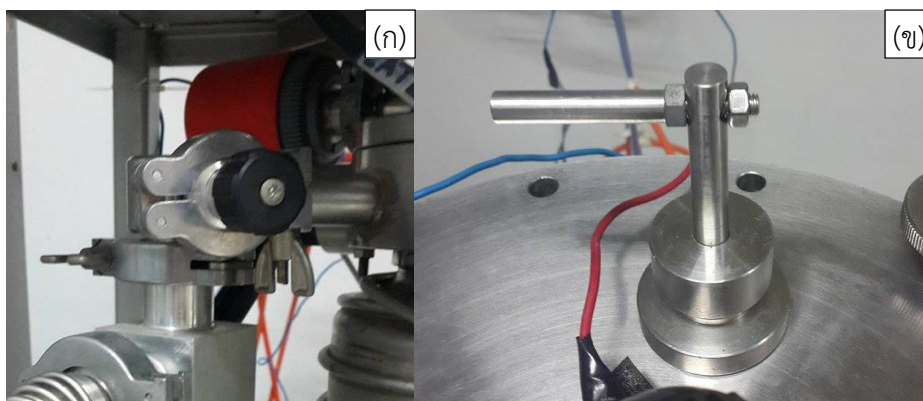
เมื่อเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ บนกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานรองรับแล้วจึงนำไปเคลือบฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงต่อไป ซึ่งขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง มีขั้นตอนดังนี้

3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิตช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้นเพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิตช์ปั้มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชิลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชิลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างชัตเตอร์และกราวด์ชิลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชั้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมุนน็อตทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)

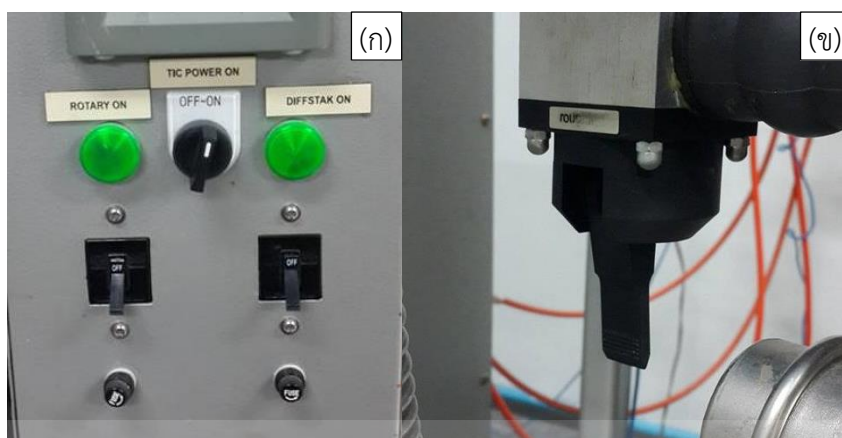
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 (ก) แสดงภาพ leak valve

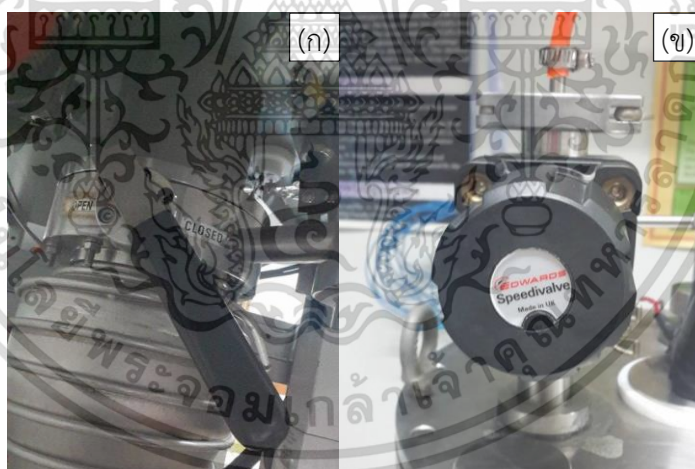
(ข) แสดงภาพคั่นบังคับ Shutter ที่อยู่ภายใน

8. ปิดชัตเตอร์ (คั่นบังคับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป้าเอาไว้
9. เปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงาน มาตราวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคั่นโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวก่อน Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน
13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)



- รูปที่ 3.3 (ก.) แสดงภาพตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอพ่นกระจาย)
 (ข.) แสดงภาพวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

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



รูปที่ 3.4 (ก) แสดงภาพ Butterfly valve ในตำแหน่ง open
 (ข) แสดงภาพ speedy valve

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
 -พิรานิกเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 -เพนนิงเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก 10^{-3} – 10^{-6} ทอร์ การป้อนอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. การป้อนอาร์กอนแล้วสูบออกจำนวน 3 ครั้ง เรียก กระบวนการนี้ว่า การฟลัชอาร์กอน มีขั้นตอนดังนี้

-เปิดวาล์วที่หัวถังอาร์กอน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดวาล์วรูเข็ม (needle valve) ปิดวาล์วผีเสื้อ และเปิดสปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์

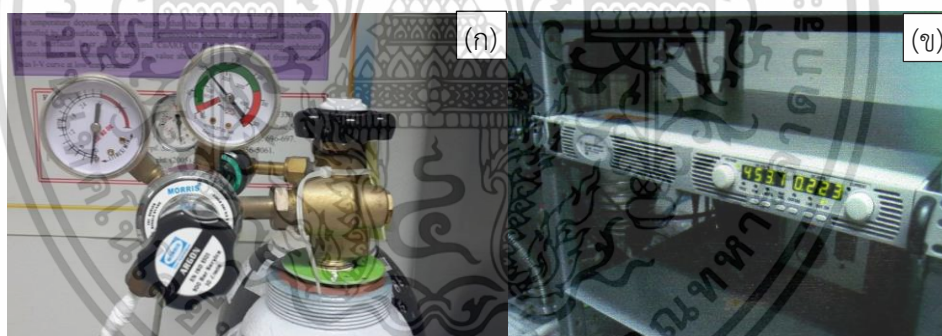
-ปิดสปีดวาล์ว เปิดวาล์วผีเสื้อ ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 1)

-ปิดวาล์วผีเสื้อ และเปิดสปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์

-ปิดสปีดวาล์ว และเปิดวาล์วผีเสื้อ ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 2)

-ปิดวาล์วผีเสื้อ และเปิดสปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์

-ปิดสปีดวาล์ว และเปิดวาล์วผีเสื้อ ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



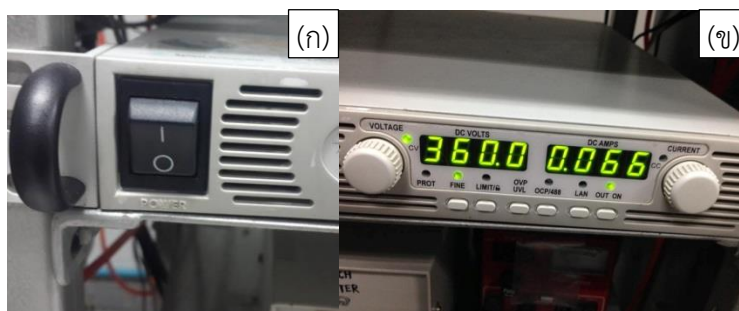
รูปที่ 3.5 (ก) แสดงภาพ Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ
(ข) แสดงภาพ power supply

17. ปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-5} ทอร์

18. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

19. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม cut on เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)

20. ในเบื้องต้นหมุนปุ่มเพิ่มกระแสไปก่อน เมื่อเพิ่มไปถึงปริมาณหนึ่ง เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงจะสลับไปสู่โหมดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเองอัตโนมัติ ซึ่งจะสังเกตเห็นถึงแม้ว่าจะหมุนเพิ่มกระแสเข้าไปแต่จะไม่มีกระแสเพิ่มขึ้น นั่นคือเครื่องสลับเข้าสู่โหมดต้องการเพิ่มแรงดัน จึงต้องเปลี่ยนไปหมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแทน



รูปที่ 3.6 (ก) แสดงภาพสวิตช์ของ power supply
(ข) แสดงภาพปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

21. หลังจากมาใช้ปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแล้วให้หมุนเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ช้าจนกระทั่งพลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรก ชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสถานะยังไม่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป่ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมามีพลังงานและสถานะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก

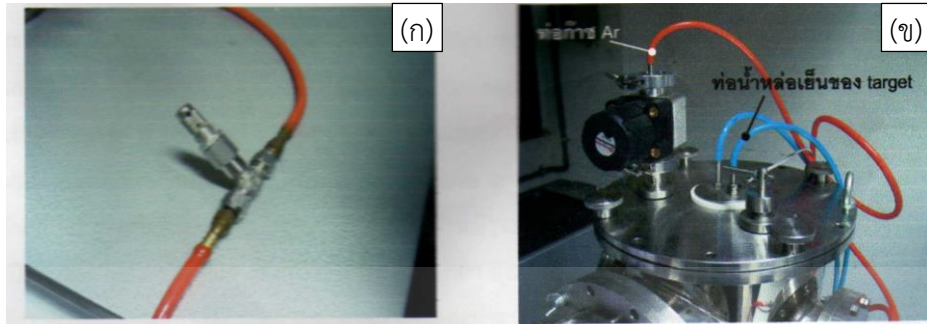


รูปที่ 3.7 แสดงภาพพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

22. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกิวเลเตอร์ (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 แปรตามค่าสปีดเตอริงยิลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป่าบางส่วนชนกันเองจนไปตกบนฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



รูปที่ 3.8 (ก) แสดงภาพวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด
(ข) แสดงภาพท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

24. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการสputtering จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาด เรียกขั้นตอนนี้ว่าการเตรียมตัวสputtering (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชุดเตอร้ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่าง เช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆดังนี้



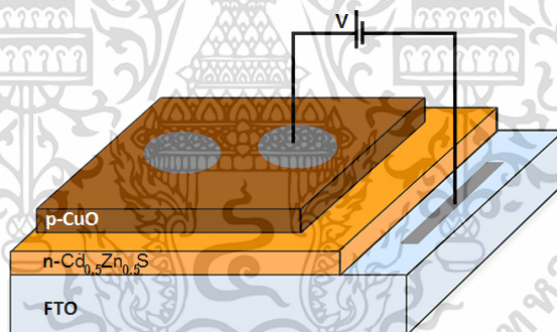
แรงดันไฟฟ้า : 370 โวลต์
กระแส : 0.06 แอมแปร์
ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ : 3×10^{-4} ทอร์
ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร
เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 40 นาที

รูปที่ 3.9 แสดงภาพเริ่มเคลือบฟิล์ม

25. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชุดเตอร้อมาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสวิตช์เล็กๆทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิตช์สีดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปีดวาล์วตามด้วยเรกูลเลเตอร์วาล์ว และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
27. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ตั้งคั้นโยกเข้าตัว)
28. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
29. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
30. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิตช์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตทางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตทางปลาออกก่อน เกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนปล่อยลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะตั้งออกมาเอง
30. เปิดฝาน้ำออกนำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ (ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $n\text{-Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบาง CuO ลงบนชั้นฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$ ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ที่เคลือบชั้นสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $n\text{-Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/p\text{-CuO}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมี และวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ในการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งมีแนวความคิดเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ทั้งนี้การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์จะมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษากลไกการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามผิวรอยต่อที่ได้จากการวัดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงของกำแพงศักย์ (ϕ_b) ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) และค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และการศึกษาพฤติกรรมกระแสของกระแสไฟฟ้า โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และแรงดันไฟฟ้า รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่ได้จากการวัดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถนำไปหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_b) ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_d) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์นี้ได้อีกด้วย

4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

4.1.1 ลักษณะรอยต่อวิวิธพันธุ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากวิธีอบสารละลายเคมี พบว่ามีสีเหลืองเข้ม ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ดังรูปที่ 4.1ก) แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ สำหรับรูปที่ 4.1ข) แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง พบว่ามีสีดำ ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน



(ก)



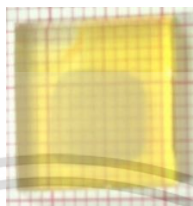
(ข)

รูปที่ 4.1 ก) แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี

ข) แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

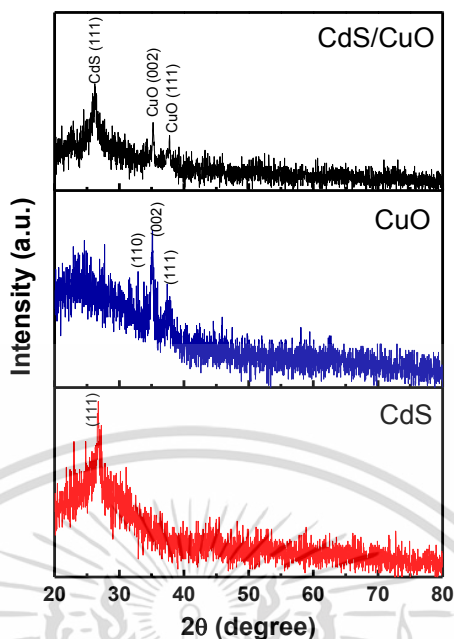
ภาพถ่ายด้านหน้าของรอยต่อวิธีพันธู์ของไดโอดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ที่เตรียมจากเคลือบชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี ซึ่งมีสีเหลืองเข้ม จากนั้นนำไปเคลือบชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยส่วนที่ฟิล์มบาง CuO เคลือบอยู่จะมีสีดำ เกาะติดบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ได้ดี ไม่หลุดร่อนง่าย และสังเกตเห็นได้ว่ามีชั้นฟิล์มบางซ้อนกันอยู่สองชั้น แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายด้านหน้าของรอยต่อวิธีพันธู์ของไดโอดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีของรอยต่อวิธีพันธู์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

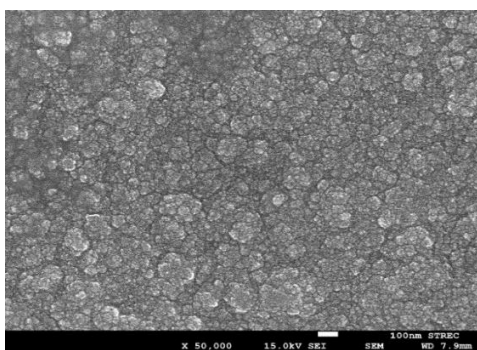
รูปที่ 4.3 แสดงผลการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค สำหรับฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ได้จากวิธีอบสารละลายเคมี พบว่ามีโครงสร้างของผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ [5] มีระนาบผลึก (111) ปรากฏพีคอย่างโดดเด่นที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 26.50 องศา ส่วนฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่ามีโครงสร้างของผลึกเป็นแบบโมนอคลินิก [44] ซึ่งมีระนาบผลึก (002) ปรากฏพีคอย่างโดดเด่นที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 35.38 องศา และรอยต่อวิธีพันธู์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) พบว่าเป็นเฟสผสมระหว่างโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ที่ได้จาก CdS ตรงกับระนาบผลึก (111) ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 26.50 องศา เมื่อเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 41-1049 และโมนอคลินิกที่ได้จาก CuO ที่ตรงกับระนาบผลึก (022) ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 35.61 องศา และ (111) ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 38.92 องศา เมื่อเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 74-1021



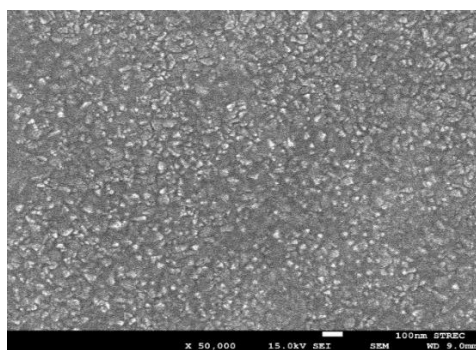
รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบาง CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.4ก) แสดงภาพถ่ายพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากวิธีอบสารละลายเคมี สังเกตได้ว่าพื้นผิวหน้ามีลักษณะกลม รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ไม่มีรอยแตก สำหรับลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ได้จากวิธีอีพิตอกซ์แมกนีตรอนสปีดเตอริง แสดงดังรูปที่ 4.4ข) พบว่ามีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมใดๆ และไม่มีรอยแยก และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



(ก)

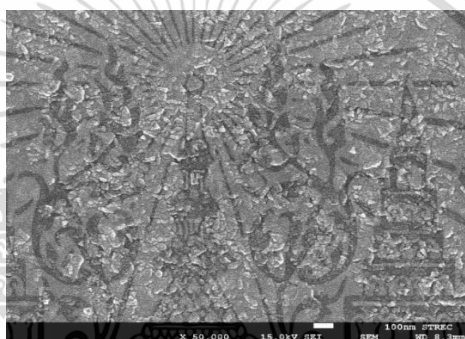


(ข)

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ก) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

ข) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

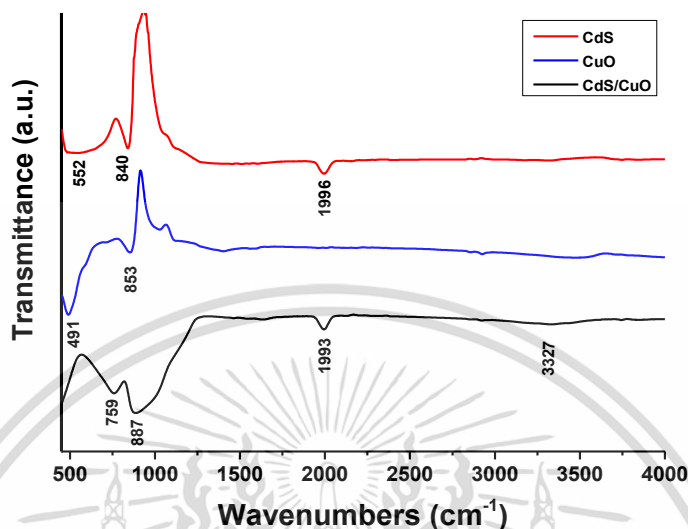


รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

4.1.4 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

สเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ (เส้นสีแดง) ฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ (เส้นสีน้ำเงิน) และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) (เส้นสีดำ) แสดงดังรูปที่ 4.6 สามารถอธิบายได้ว่า การที่สารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบเท่านั้น จากกราฟรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านกับเลขคลื่นในช่วงความถี่ 450-4000 ต่อเซนติเมตร กรณีของฟิล์มบาง CdS ปรากฏแถบการสั่นของสารประกอบ Cd-S ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 552 และ 840 สำหรับกรณีของฟิล์มบาง CuO ปรากฏแถบการสั่นแบบยืดของสารประกอบ Cu-O และ C-O ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 491 และ 853 ตามลำดับ และสำหรับกรณีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ปรากฏแถบการสั่นแบบยืดของสารประกอบ Cd-S ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 759 และแถบการสั่นแบบยืดของสารประกอบ Cu-O ที่ค่า

เลขคลื่นเท่ากับ 887 นอกจากนี้ยังพบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างโดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ O-H และ C-N เนื่องจากการใช้สารประกอบไทโอยูเรีย และแอมโมเนียในการเตรียมฟิล์มบาง [45-49]



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 450-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบาง CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

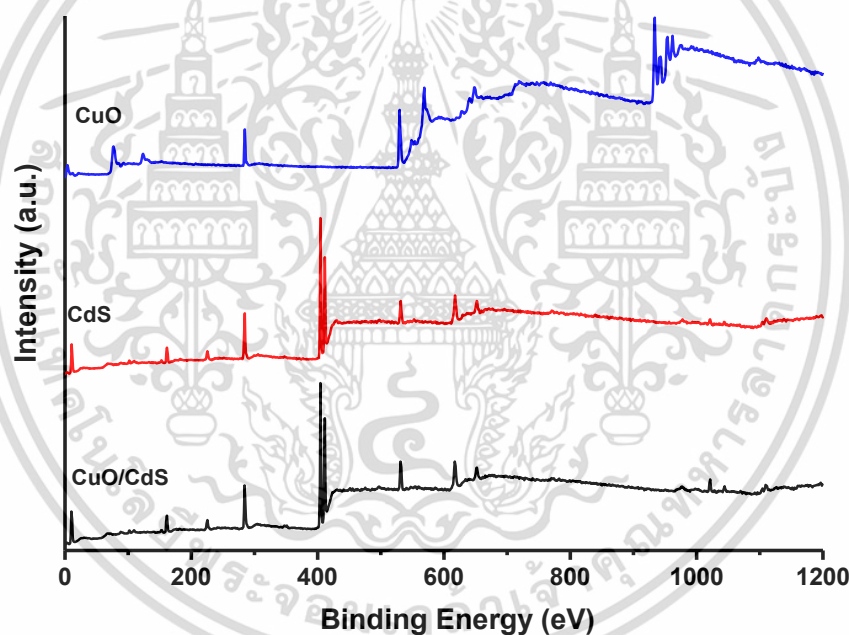
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

Sample	FTIR Peaks	Assignment	References
CdS	552	Stretching mode of Cd-S	[45]
	840	Bending vibration of s-triazine ring	[46]
	1996	C-N stretching vibration	[45]
CuO	491	Cu-O stretching vibration	[47]
	853	C-O stretching vibration	[48]
CdS/CuO	759	Bending vibration of CdS	[49]
	887	C-O stretching vibration	[48]
	1993	C-N stretching vibration	[45]
	3327	O-H stretching vibration of H ₂ O	[45]

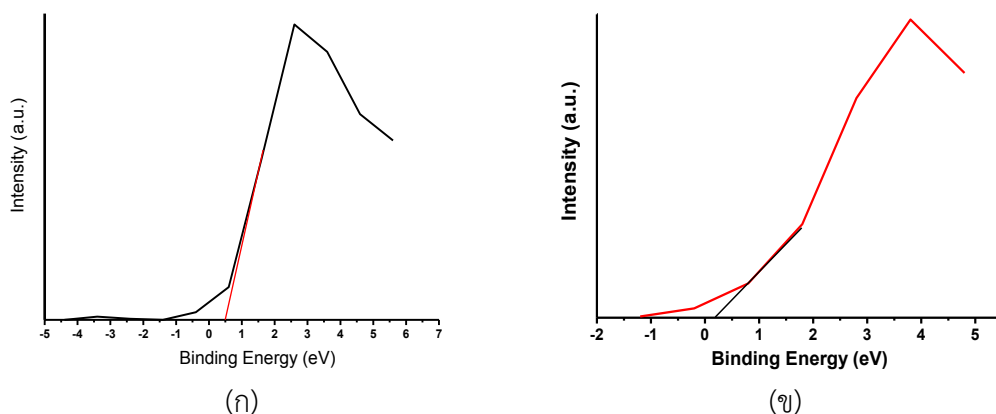
4.1.5 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

จากผลการวัดสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray photoemission spectroscopy : XPS) เพื่อศึกษาจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนได้แล้ว ยังสามารถนำไปหาความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ (valence band offset; ΔE_V) ที่อยู่ระหว่างรอยต่อได้

สเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ (เส้นแดง) สเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ (เส้นสีน้ำเงิน) และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำติบูกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) (เส้นสีดำ) แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งสามารถนำไปหาค่าแถบวาเลนซ์สูงสุดได้ (valence band maximum; VBM) จากการลากเส้นตรงตัดกับเส้นแกนนอนจะได้ค่า VBM ดังรูปที่ 4.8ก) และ 4.8ข) ซึ่งจากการลากเส้นตรงนี้พบว่า สารกึ่งตัวนำ CdS และสารกึ่งตัวนำ CuO มีค่าแถบวาเลนซ์สูงสุดเท่ากับ 0.5 และ 0.2 eV ตามลำดับ [50-51]



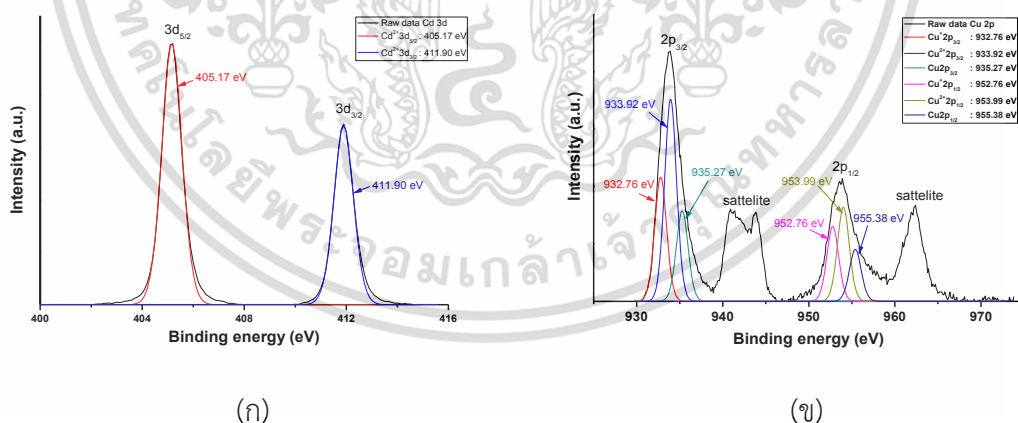
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำติบูกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม XPS ของแถบวาเลนซ์สูงสุด

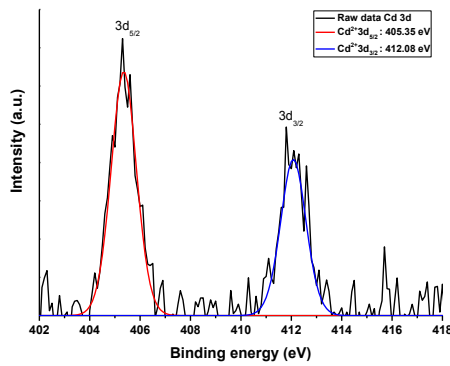
- ก) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์
 ข) फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์

ผลการตรวจสอบ XPS สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS พบธาตุ Cd ได้แก่ Cd $3d_{3/2}$ และ Cd $3d_{5/2}$ ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 411.90 และ 405.17 อิเล็กตรอนโวลต์ [52-53] ดังแสดงในรูปที่ 4.9ก) และสำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO พบธาตุ Cu ได้แก่ Cu $2p_{1/2}$ และ Cu $2p_{3/2}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.9ข) พบว่าพีคที่ปรากฏอยู่ภายในจะบ่งบอกถึงเฟสของ Cu นั้นหมายความว่า เฟสของ Cu จะประกอบไปด้วย 3 เฟสได้แก่ Cu^{2+} , Cu^+ และ Cu จากการศึกษาคพบว่า Cu^{2+} จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่าง Cu^+ กับ Cu จากรูปที่ 4.13 Cu^{2+} ที่ออร์บิทัล $2p_{1/2}$ มีพลังงานยึดเหนี่ยว 953.99 อิเล็กตรอนโวลต์และ Cu^{2+} ที่ออร์บิทัล $2p_{3/2}$ ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 953.99 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ [54-55] ซึ่งพลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุดังกล่าวข้างต้นแสดงดังตารางที่ 4.2

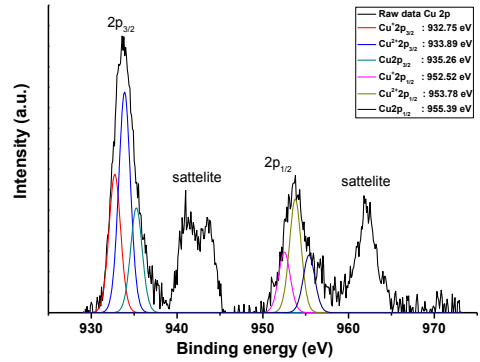


รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์

- ก) ในช่วง 400-416 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS
 ข) ในช่วง 925-975 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัม XPS รอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุก ออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

ก) พลังงานยึดเหนี่ยวช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์

ข) พลังงานยึดเหนี่ยวช่วง 925-975 อิเล็กตรอนโวลต์

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

Core level	Binding energy (eV)		
	CdS	CuO	CdS/CuO
Cd 3d _{3/2}	411.90	-	412.08
Cd 3d _{5/2}	405.17	-	405.35
Cu 2p _{1/2}	-	955.38	955.39
Cu ⁺ 2p _{1/2}	-	952.76	952.52
Cu ²⁺ 2p _{1/2}	-	953.99	953.78
Cu 2p _{3/2}	-	935.27	935.26
Cu ⁺ 2p _{3/2}	-	932.76	932.75
Cu ²⁺ 2p _{3/2}	-	933.92	933.89

ค่าความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ (valence band offset; ΔE_{VBO}) ที่อยู่ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ CdS กับสารกึ่งตัวนำ CuO สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้ [43]

$$\Delta E_{\text{VBO}} = E_{\text{VBM}}^{\text{CuO}} - E_{\text{VBM}}^{\text{CdS}} \quad (4.1)$$

$$= (E_{\text{VBM}}^{\text{CuO}} - E_{\text{Cu}2\text{p}_{3/2}}^{\text{CuO}}) - (E_{\text{VBM}}^{\text{CdS}} - E_{\text{Cd}3\text{d}_{5/2}}^{\text{CdS}})_{\text{bulk}} + (E_{\text{Cu}2\text{p}_{3/2}}^{\text{CdS/CuO}} - E_{\text{Cd}3\text{d}_{5/2}}^{\text{CdS/CuO}})_{\text{interface}} \quad (4.2)$$

จากการศึกษาสเปกตรัม XPS ข้างต้นพบว่า $E_{\text{Cu}2\text{p}_{3/2}}^{\text{CdS/CuO}}$, $E_{\text{Cd}3\text{d}_{5/2}}^{\text{CdS/CuO}}$, $E_{\text{Cu}2\text{p}_{3/2}}^{\text{CuO}}$, $E_{\text{Cd}3\text{d}_{5/2}}^{\text{CdS}}$, $E_{\text{VBM}}^{\text{CdS}}$ และ $E_{\text{VBM}}^{\text{CuO}}$ มีค่าเท่ากับ 933.89, 405.35, 933.92, 405.17, 0.2 และ 0.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 0.51 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับความไม่ต่อเนื่องของแถบนำ (ΔE_{CBO}) ที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ CdS กับสารกึ่งตัวนำ CuO จะแสดงถึงความสัมพันธ์ [50]

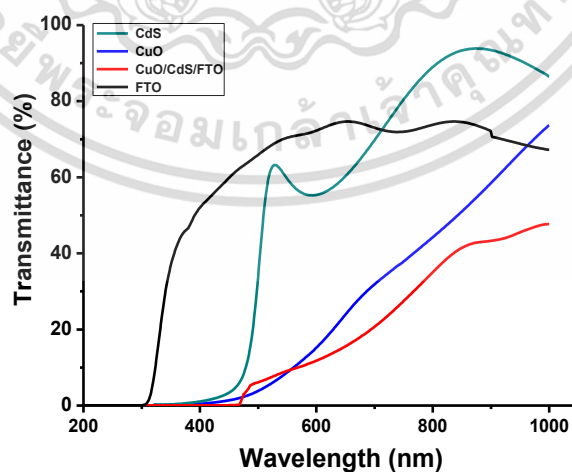
$$\Delta E_{\text{CBO}} = E_{\text{g}}^{\text{CdS}} - (E_{\text{g}}^{\text{CuO}} - \Delta E_{\text{VBO}}) \quad (4.3)$$

เมื่อ $E_{\text{g}}^{\text{CuO}}$ และ $E_{\text{g}}^{\text{CdS}}$ คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.30 และ 2.48 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ความไม่ต่อเนื่องของแถบนำเท่ากับ 0.33 อิเล็กตรอนโวลต์

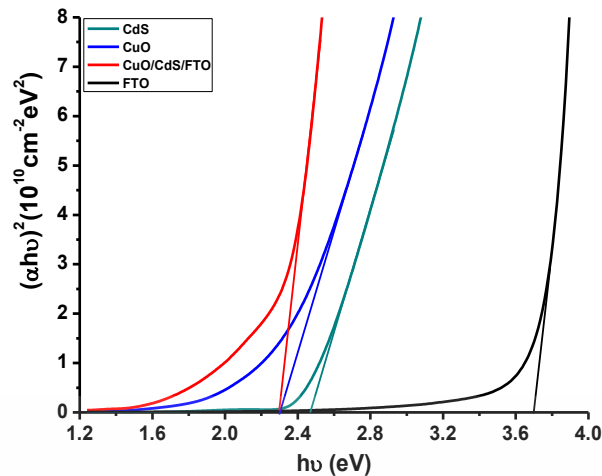
4.1.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร สังเกตได้ว่าฟิล์มบาง CdS จะมีสีเหลือง-ส้ม ส่วนสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 600 นาโนเมตร และสำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของ CdS/CuO พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 600 นาโนเมตร ที่แสดงดังรูปที่ 4.11

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ แล้วลากเส้นตรงตัดกับแกนพลังงานโฟตอน โดยที่จุดตัดแกนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_{g}) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS ฟิล์มบาง CuO และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO มีค่า 2.48, 2.30 และ 2.30 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ [50, 53, 55] ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



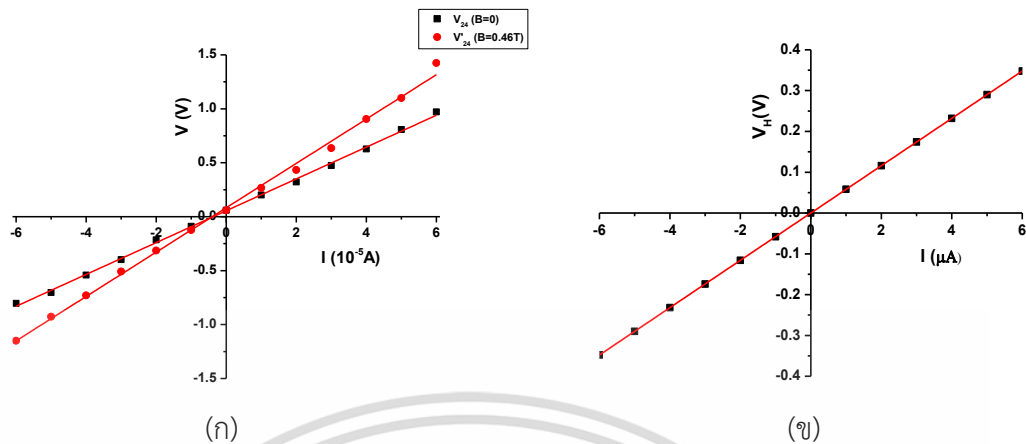
รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS, CuO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

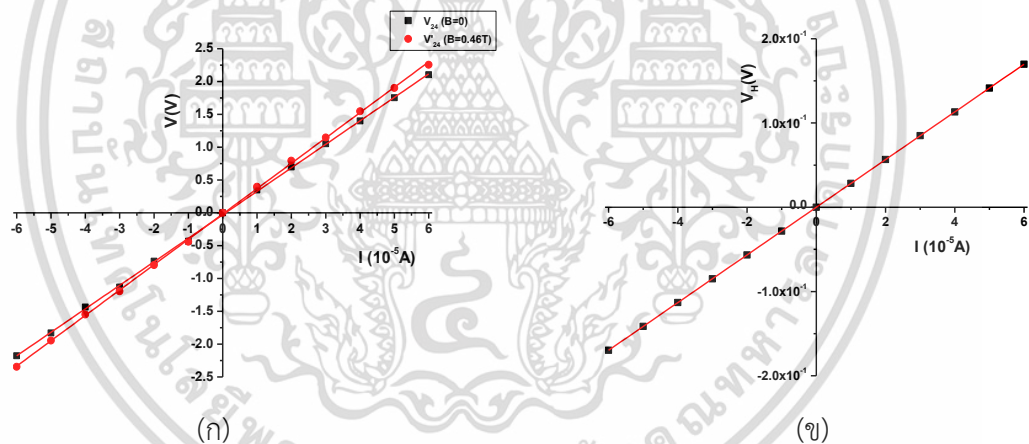
Sample	Energy gap (eV)
CdS	2.48
CuO	2.30
FTO	3.70
FTO/CdS/CuO	2.30

สังเกตค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CuO และค่าช่องว่างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO มีขนาดเท่ากัน เท่ากับ 2.30 อิเล็กตรอนโวลต์ นั้นแสดงให้เห็นว่าสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO เมื่อฉายแสงตกกระทบชั้น CdS แสงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน (ทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่าง สำหรับการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์) เมื่อส่งผ่านไปยังชั้น CuO (ทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง สำหรับการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์) แสงจะถูกดูดกลืนส่วนหนึ่ง ทำให้แสงสามารถส่งผ่านไปได้ 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

4.1.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
 ก) ความต่างศักย์ V_{24} และ V'_{24} กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก
 ข) ความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า

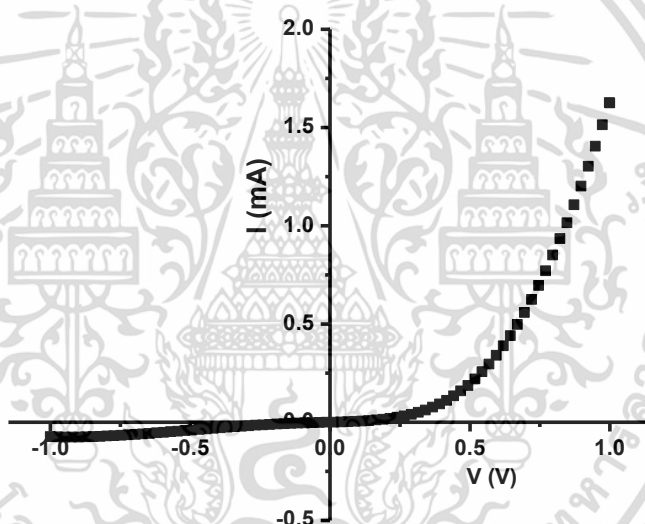


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
 ก) ความต่างศักย์ V_{24} และ V'_{24} กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก
 ข) ความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า

จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แสดงดังรูปที่ 4.13 และฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แสดงดังรูป 4.14 เมื่อนำไปคำนวณ พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลมีค่า 2.64×10^{16} ต่อตารางเซนติเมตร และ 5.28×10^{17} ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

4.1.7.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO กรณีไบแอสตรง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 ถึง 1 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.5 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ CuO และของสารกึ่งตัวนำ CdS (ที่ได้จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์) อยู่ในระดับ 10^{17} และ 10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO เป็นแบบรอยต่อ p^+-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อขอตติ์กี โดยบริเวณพร่องพาหะตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -1 ถึง 1 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

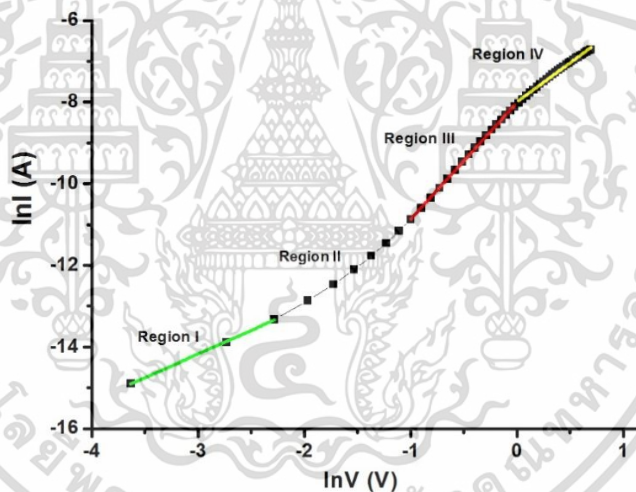
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าสามารถแบ่งช่วงแรงดันไบแอสออกเป็น 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ I ($0 < V < 0.1$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ II ($0.1 < V < 0.35$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ส่วนบริเวณที่ III ($0.35 < V < 1$) และบริเวณที่ IV ($1.0 < V < 2.0$) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

$$I = kV^m \quad (4.4)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.5)$$

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไซด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ แสดงดังรูปที่ 4.16 สำหรับค่าความชันของแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า ที่บริเวณ III ได้ค่า m เท่ากับ 2.86 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งบอกเป็นนัยว่ามีสถานะผิวเชื่อมต่อกันอยู่ ส่วนบริเวณที่ IV ค่า $m=1.91$ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของมอตต์-เกอร์นีย์ แสดงว่า ในเนื้อสารของฟิล์มบาง CuO มีระดับพลังงานลึก (deep state) ปรากฏอยู่



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า $\ln V$ ที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

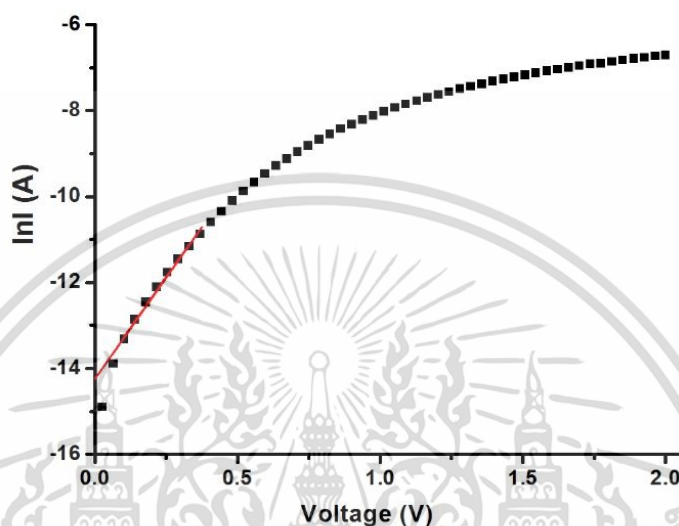
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแสแรงดันไฟฟ้าช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

Temperature (K)	Region I ($0 < V < 0.10$) Ohm's law	Region II ($0.10 < V < 0.35$) Ideality Factor (n)	Region III ($0.35 < V < 1.00$) Exponent Value (m)	Region IV ($1.00 < V < 2.00$) Exponent Value (m)
300	1.16	4.11	2.86	1.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต

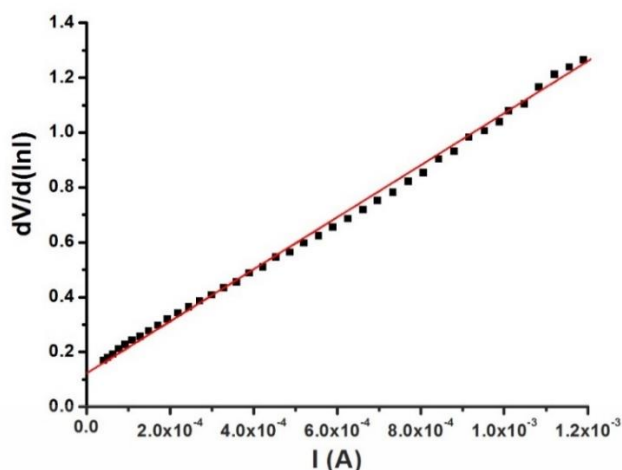
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เพื่อหาค่าความสูงของกัมพาศักย์ (ϕ_b) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เพื่อช่วยหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

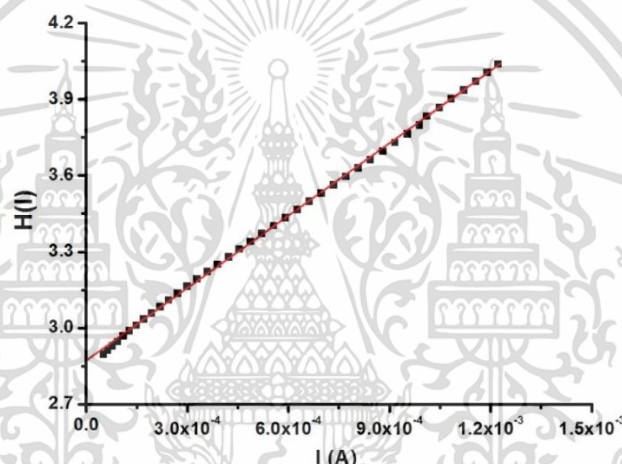


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออิมิตชันของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)

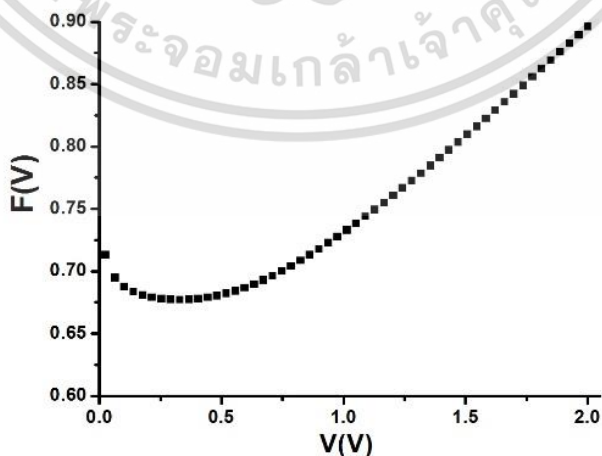
การหาค่าความต้านทานอนุกรมโดยใช้วิธีของชวง จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงของกัมพาศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ วิธีของนอร์ดจะเขียนกราฟได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกัมพาศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานอนุกรม โดยค่าความสูงกัมพาศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ดแสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d(\ln I)$ กับค่า I ที่อธิบายวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I โดยวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V โดยวิธีของนอร์ดเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของกระแส และแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงของช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังสมการ

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.6)$$

เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (4.7)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ตัดแกน $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ได้ และจากสมการที่ 4.7 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ คือ

$$\phi_{Bo} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_s}\right) \quad (4.8)$$

ความสูงของกำแพงศักย์ (ϕ_{Bo}) ของสมการที่ (4.8) จะเป็นค่าในขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ ที่อุณหภูมิใดๆ และ $A^*(CuO)$ เท่ากับ 40.8 แอมแปร์ต่อ(ตารางเซนติเมตร-เคลวินยกกำลังสอง)

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.9)$$

ในความเป็นจริงแล้วสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s)\right) - 1 \right\} \quad (4.10)$$

เมื่อ I_s คือกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (4.11)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจ (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสตรง โดยการแทนสมการที่ (4.11) ลงในสมการที่ (4.10) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.12)$$

หาอนุพันธ์ของค่า V เทียบกับ ค่า $\ln I$ เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.12) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.13)$$

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.18 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจ (R_s) และจุดตัดแกนของค่า $dV/d\ln I$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.13) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า $H(I)$ ดังนี้

$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.14)$$

แล้วสมการที่ (4.14) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (4.15)$$

เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ก็จะได้ดังรูปที่ 4.19 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า $(n\phi_B)$ ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า $H(I)$ นั้นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.13) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม โดยวิธีของนอร์ด (Norde's Method) ดังสมการ

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.16)$$

แทนค่า I จากสมการที่ (4.6) จะได้ว่า

$$F(V) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)V + \frac{IR_s}{n} + \phi_{BO} \quad (4.17)$$

เมื่อทำการคำนวณหาค่า $F(V)$ จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า $V(V)$ ก็จะได้ดังรูปที่ 4.20 ที่แรงดัน V_{\min} จะทำให้ฟังก์ชัน $F(V)$ มีค่าต่ำสุด และที่ $F(V)_{\min}$ นี้จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานอนุกรมได้ ดังนี้

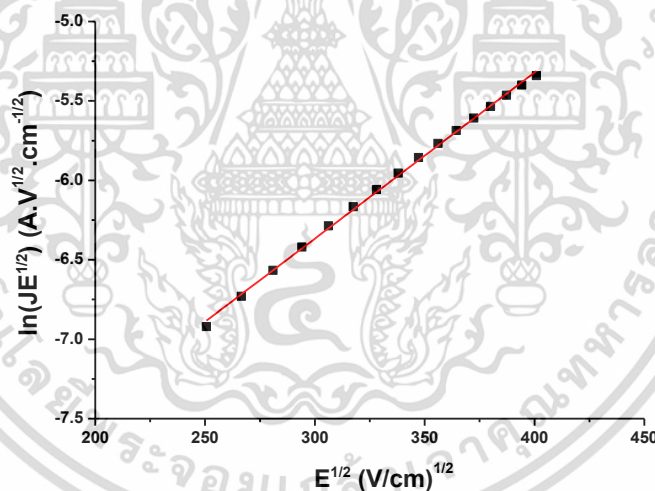
$$R_s = \frac{2-n}{I_{\min}} \left(\frac{kT}{q} \right) \quad (4.18)$$

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

ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มออิเล็กทริกมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

Temperature (K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, ϕ_b (eV)			Series Resistance, R_s (k Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	dV/d(lnI)-I	F(V)-V
300	6.95×10^{-7}	4.11	4.28	0.69	0.70	0.74	0.95	0.95	1.21

กรณีไบแอสกลับทาง



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

ในกรณีไบแอสกลับทางสามารถอธิบายการนำกระแสไฟฟ้าได้ด้วยกลไกการนำกระแสพูลเฟรนเคิล แบบปรับปรุงใหม่ (Modified Poole-Frenkel conduction) [56] ซึ่งกลไกนี้อธิบายถึงการนำกระแสที่อยู่ในกับดักของสารกึ่งตัวนำ ก่อนที่พาหะกำลังเคลื่อนที่จะถูกกับดักจับไว้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสูงของกำแพงศักย์ในกับดักลดลง ทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปได้ง่ายขึ้น จากสมการความสัมพันธ์

$$J \propto J_0 \left[\frac{kT}{q\beta_{PF}E^{1/2}} \right] \exp \left[\frac{\beta_{PF}E^{1/2}}{kT} \right] \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

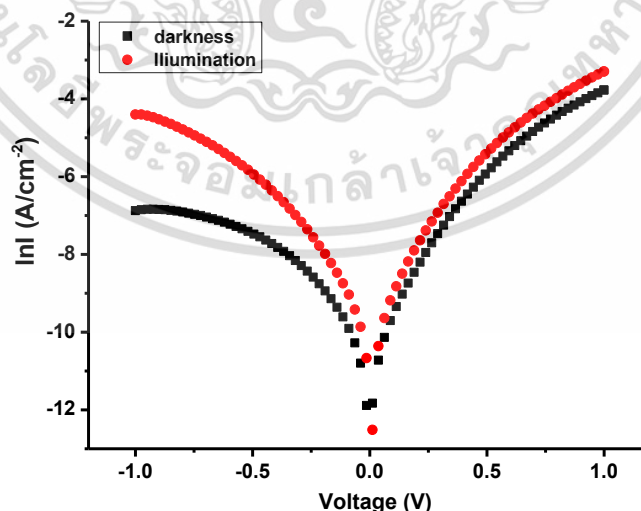
สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(JE^{1/2})$ กับค่า $E^{1/2}$ โดย E คือ V/W_D เมื่อ $W_D = [2\epsilon_s(V_{bi} + V)/qN_D]^{1/2}$ ดังรูปที่ 4.22 โดยจุดตัดกราฟมีค่าเท่ากับ β_{PF}/kT โดยค่าสัมประสิทธิ์ของกลไกพูล-เฟรนเคิล (Poole-Frenkel coefficient : β_{PF}) นำไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ ϵ_r ได้จากความสัมพันธ์

$$\beta_{PF} = \left[\frac{q^3}{\pi\epsilon_r\epsilon_0} \right]^2 \quad (4.20)$$

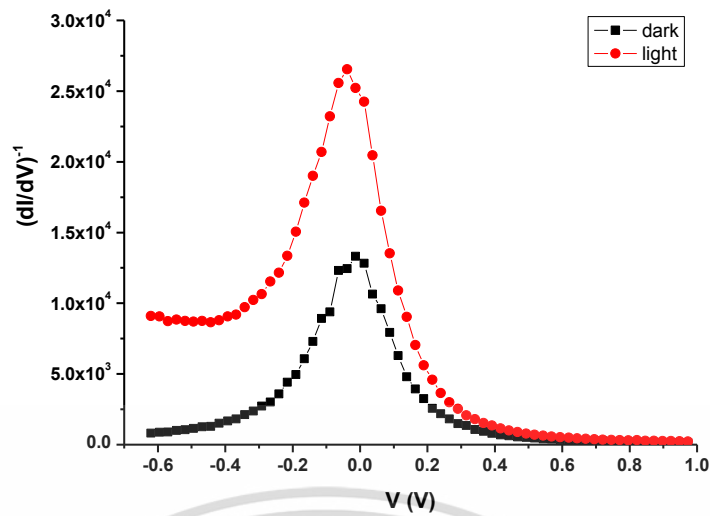
จากกราฟที่ 4.21 β_{PF} และ ϵ_r มีค่า $2.60 \times 10^{-4} \text{ eV.cm}^{1/2} \cdot \text{V}^{-1/2}$ และ 8.50 ตามลำดับ ซึ่งค่า ϵ_r ที่ได้จากการคำนวณเป็น 0.93 เท่าของค่าทางทฤษฎี ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมาก [20]

จากการนำรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) ไปศึกษาสมบัติไฟฟ้าภายใต้การฉายแสง แสดงดังรูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับแรงดันไฟฟ้า สังเกตได้ว่ากรณีที่แสงตกกระทบไม่ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้า I_{SC} ($V=0$) แต่พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำๆ กระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่ากระแสไฟฟ้าของกรณีที่ไม่ฉายแสง แสดงให้เห็นว่าสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงได้ (photo detector)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีความต้านทานอนุกรม R_s (series resistance) น้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติความต้านทานอนุกรมนี้อาจเกิดขึ้นหลายสาเหตุ เช่น ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานของขั้วไฟฟ้า หรือชั้นตอนการเคลือบฟิล์ม เป็นต้น ส่วนความต้านทานขนาน R_{sh} (shunt resistance) ควรมีค่ามากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติอาจทำให้ค่าความต้านทานขนานนี้ลดลง อาจมีสาเหตุมาจากการรั่วของกระแสไฟฟ้า หรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก และข้อบกพร่องผลึกบริเวณขอบของเกรนของฟิล์มบาง เป็นต้น



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะที่ฉายแสงและไม่ฉายแสง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

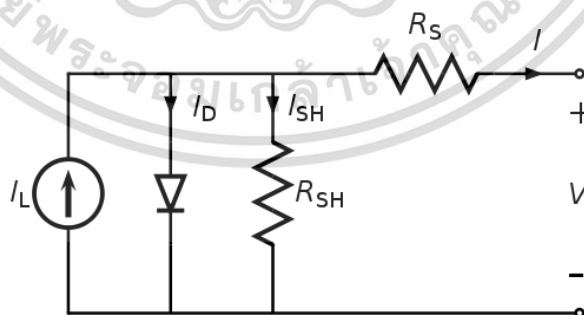


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า ทั้งขณะที่ฉายแสงและไม่ฉายแสง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

พิจารณาค่าความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งได้แก่ R_s กับ R_{sh} ฉะนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{out} จะมีค่าดังนี้

$$I_{out} = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_L \quad (4.21)$$

สามารถหาค่า R_s และ R_{sh} ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับแรงดันไฟฟ้า โดยที่ R_{sh} จะพิจารณาที่ค่าสูงสุดของ $(dI/dV)^{-1}$ แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าในกรณีไม่ฉายแสง R_{sh} มีค่า 13.31 กิโลโอห์ม ส่วนกรณีฉายแสง R_{sh} มีค่า 26.54 กิโลโอห์ม สำหรับค่า R_s จะพิจารณาที่ค่าต่ำสุดของ $(dI/dV)^{-1}$ ซึ่ง R_s ทั้งไม่ฉายแสงและฉายแสงมีค่าเท่ากับ 200 โอห์ม



รูปที่ 4.24 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

4.1.7.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

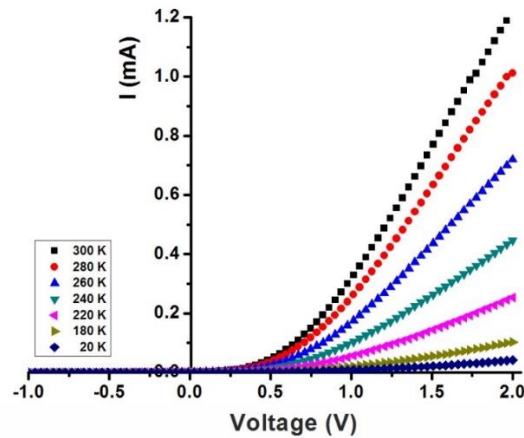
กรณีไบแอสตรง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -1 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากันเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้น ตั้งแต่ 0.5-1.0 โวลต์

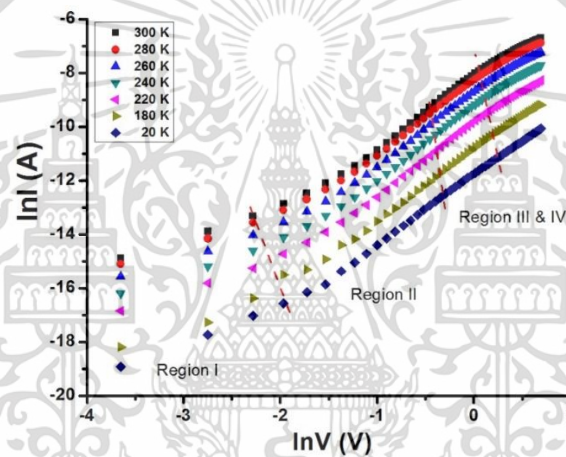
การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่ช่วงแรงดัน 0-2.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ ที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณที่ I ($0 < V < 0.1$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ II ($0.1 < V < 0.35$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มออิเล็กทริกนิคิมิสชัน ส่วนบริเวณที่ III ($0.35 < V < 1$) และบริเวณที่ IV ($1.0 < V < 2.0$) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และพารามิเตอร์ที่แสดงถึงกลไกการนำกระแสทั้ง 4 บริเวณ แสดงดังตารางที่ 4.6

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทริกนิคิมิสชัน ที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เพื่อช่วยหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

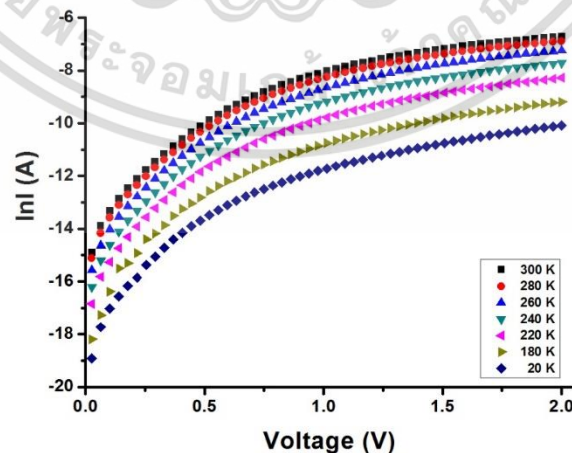
การหาค่าความต้านทานอนุกรมโดยใช้วิธีของชวง จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ วิธีของนอร์ดจะเขียนกราฟได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานอนุกรม โดยค่าความสูงกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกนิคิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด แสดงดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln|I|$ กับค่า $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



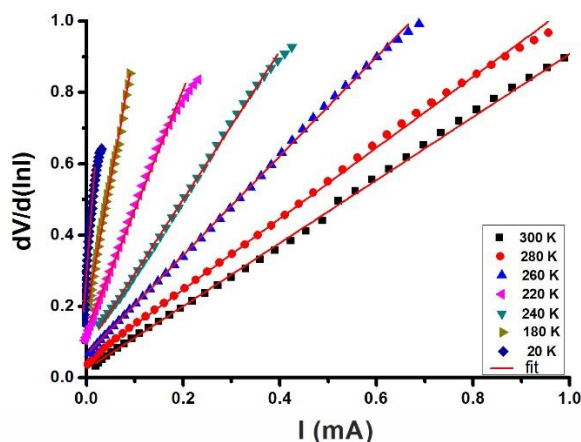
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln|I|$ กับค่า V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

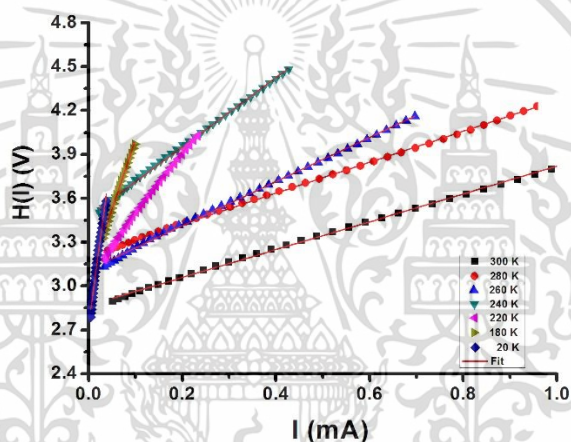
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่ของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

Temperature (K)	Region I ($0 < V < 0.10$) Ohm's law	Region II ($0.10 < V < 0.35$) Ideality Factor (n)	Region III ($0.35 < V < 1.00$) Exponent Value (m)	Region IV ($1.00 < V < 2.00$) Exponent Value (m)
300	1.16	4.11	2.86	1.91
290	1.14	4.99	2.89	1.98
280	1.11	5.14	2.87	2.04
270	1.18	4.93	2.84	2.03
260	1.12	5.30	2.79	2.01
250	1.22	5.45	2.80	2.06
240	1.16	6.07	2.83	2.12
230	1.14	5.46	2.82	2.19
220	1.16	5.69	2.83	2.24
210	1.24	5.43	2.81	2.31
200	1.04	6.19	2.78	2.29
190	1.28	6.10	2.76	2.36
180	1.28	6.46	2.75	2.40
170	0.99	6.61	2.68	2.40
160	1.18	7.16	2.68	2.39
150	1.52	7.78	2.71	2.37
140	1.22	8.31	2.69	2.37
130	1.18	8.96	2.70	2.37
120	0.85	10.02	2.72	2.41
110	1.48	10.92	2.72	2.39
100	1.40	11.40	2.69	2.37
90	1.10	13.18	2.72	2.39
80	0.75	11.51	2.71	2.41
70	0.97	16.52	2.71	2.39
60	0.54	19.08	2.69	2.38
50	1.14	22.89	2.74	2.40
40	0.99	23.16	2.73	2.43
30	1.05	40.45	2.67	2.41
20	1.02	62.22	2.71	2.42

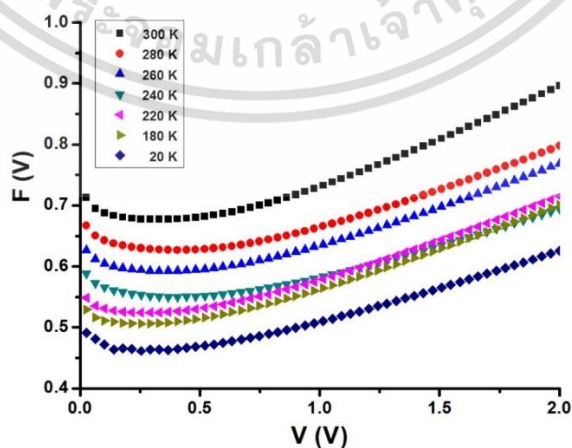
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d(\ln I)$ กับค่า I ที่อธิบายวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I โดยวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

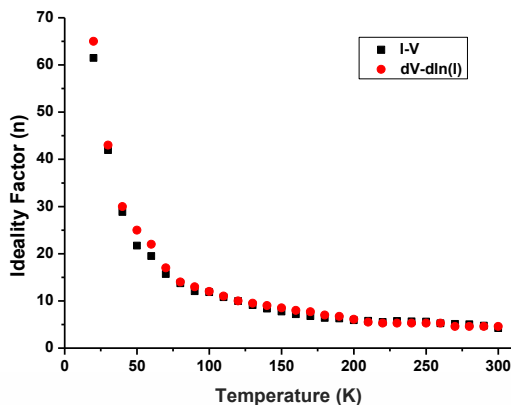


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V โดยวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

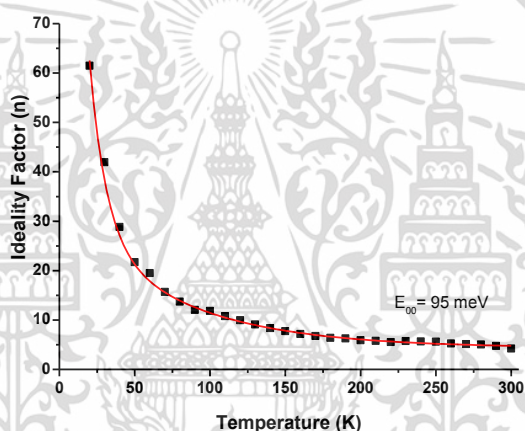
ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

T (K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, ϕ_b (eV)			Series Resistance, R_s (k Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	$dV/d(\ln I)-I$	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	$dV/d(\ln I)-I$	F(V)-V
300	6.95×10^{-7}	4.11	4.28	0.69	0.70	0.74	0.95	0.99	1.21
290	8.96×10^{-7}	4.99	4.47	0.66	0.65	0.71	1.30	1.08	1.53
280	7.44×10^{-7}	5.14	4.60	0.64	0.64	0.68	1.47	1.25	1.76
270	4.87×10^{-7}	4.93	4.74	0.62	0.63	0.67	1.50	1.43	1.86
260	4.45×10^{-7}	5.30	5.21	0.60	0.60	0.65	1.78	1.62	2.30
250	3.34×10^{-7}	5.45	5.59	0.58	0.59	0.64	2.20	1.97	2.51
240	3.03×10^{-7}	6.07	5.70	0.56	0.56	0.61	2.46	2.43	3.34
230	1.64×10^{-7}	5.46	5.74	0.55	0.57	0.59	3.05	3.03	4.91
220	1.17×10^{-7}	5.69	5.80	0.53	0.55	0.57	3.78	3.94	5.89
210	6.92×10^{-8}	5.43	5.99	0.51	0.55	0.55	4.65	4.88	7.55
200	6.05×10^{-8}	6.19	6.28	0.49	0.51	0.52	5.66	5.84	8.02
190	3.79×10^{-8}	6.10	6.31	0.47	0.51	0.50	6.79	7.03	9.17
180	2.74×10^{-8}	6.46	7.40	0.45	0.48	0.48	8.03	7.98	9.29
170	1.86×10^{-8}	6.61	7.51	0.43	0.47	0.46	8.32	8.46	9.53
160	2.05×10^{-8}	7.16	8.20	0.40	0.43	0.43	9.04	8.80	9.74
150	2.40×10^{-8}	7.78	8.27	0.37	0.39	0.40	9.20	9.00	9.87
140	2.29×10^{-8}	8.31	9.72	0.34	0.37	0.37	9.31	8.87	9.90
130	2.29×10^{-8}	8.96	9.35	0.32	0.34	0.34	9.43	8.88	9.98
120	2.30×10^{-8}	10.02	10.18	0.29	0.31	0.32	9.54	8.92	9.99
110	2.3×10^{-8}	10.92	11.52	0.27	0.28	0.29	9.67	9.04	9.98
100	2.08×10^{-8}	11.40	12.30	0.24	0.26	0.26	9.50	9.22	9.99
90	2.26×10^{-8}	13.18	13.26	0.21	0.23	0.23	9.53	9.44	10.03
80	1.25×10^{-8}	11.51	14.38	0.19	0.22	0.21	9.58	9.48	10.10
70	1.97×10^{-8}	16.52	17.44	0.16	0.18	0.18	9.88	9.68	10.20
60	1.72×10^{-8}	19.08	22.17	0.14	0.15	0.15	9.97	9.92	10.39
50	1.69×10^{-8}	22.89	25.48	0.12	0.13	0.13	10.09	10.04	10.33
40	9.73×10^{-9}	23.16	30.22	0.09	0.11	0.10	10.11	10.01	10.58
30	1.72×10^{-8}	40.45	43.11	0.07	0.02	0.07	10.45	10.02	10.92
20	1.79×10^{-8}	62.22	65.04	0.04	0.05	0.04	10.50	10.03	11.00

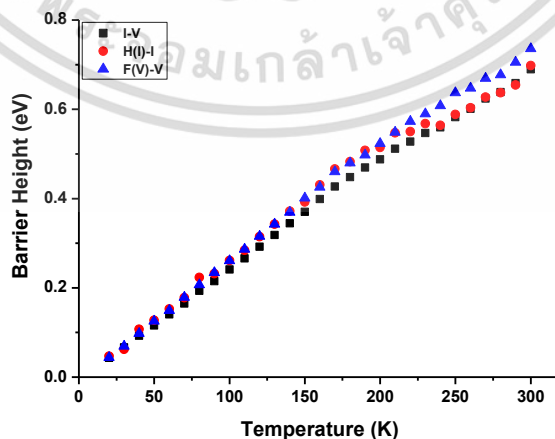
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

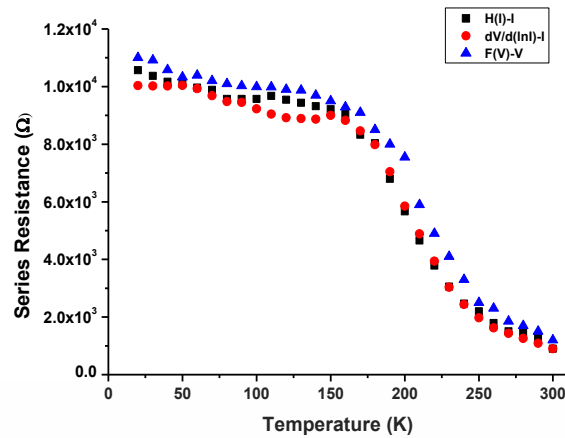


รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

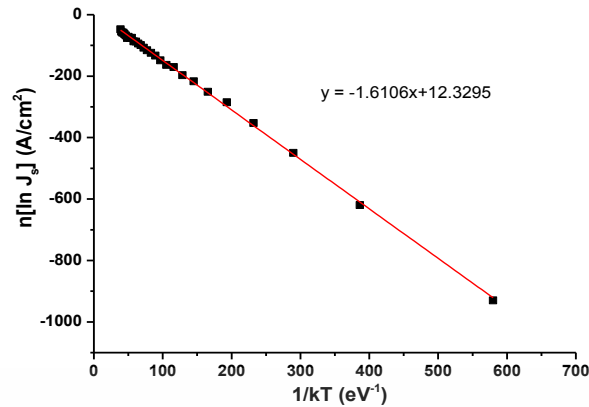
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับมีค่าลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และวิธีของชวงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และวิธีของชวง กับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน กราฟจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด มีค่าลดลงตามอุณหภูมิลดลงแสดงดังรูปที่ 4.33 และสังเกตได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งการที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้มีการใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตติ์ มาคำนวณค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสตรงหรือพลังงานกระตุ้นเพียงจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และค่าแฟกเตอร์อุดมคติเข้าใกล้ 1 แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานอิสระของพาหะมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ได้ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อย เนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจะพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อย และค่าแฟกเตอร์อุดมคติมีค่ามาก และที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวงและวิธีของนอร์ด พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.34 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงนี้ มีสาเหตุมาจากการที่ความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระ เอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อ และการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลง เมื่ออุณหภูมิลดลง จึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze - out - carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ p⁺ - n ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

จากรูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับค่าอุณหภูมิ สามารถนำไปหาค่า E_{00} ได้จากความสัมพันธ์

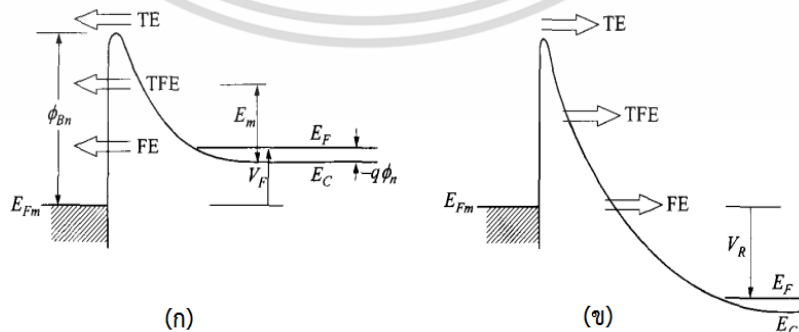
$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \tag{4.22}$$

โดย E_{00} คือ ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.32 จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 0.095 อิเล็กตรอนโวลต์

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.35 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.18)

$$n \ln(J_s) = -E_a \left(\frac{1}{kT}\right) + n \ln(J_0) \tag{4.23}$$

พลังงานกระตุ้น (E_a) หาได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.35 ดังนั้น ความชัน = พลังงานกระตุ้น (E_a) และหาค่าพลังงานกระตุ้นได้เท่ากับ 1.6106 อิเล็กตรอนโวลต์

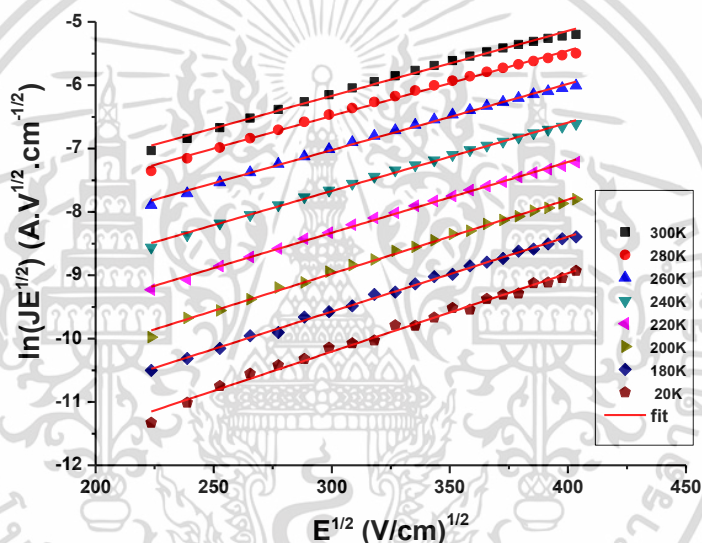


รูปที่ 4.36 แสดงแผนภาพกลไกเทอร์มออิเล็กทริก (TE) กลไกเทอร์มออิเล็กทริกฟิล์มดีอิเล็กทริก (TFE) และกลไกฟิล์มดีอิเล็กทริก (FE) ที่บริเวณรอยต่อขอตติ์ภายใต้ไบแอสตรงและไบแอสกลับทาง

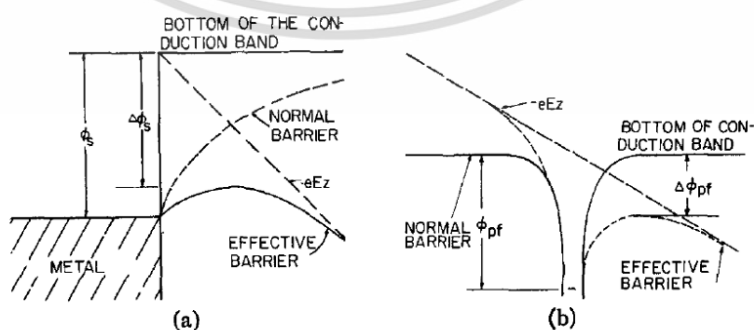
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีไบแอสกลับทาง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{1/2})$ กับ $E^{1/2}$ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสของพูล-เฟรนเคิลแบบปรับปรุงใหม่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ β_{PF} และ ϵ_r แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงค่า β_{PF} มีขนาดลดลงและ ϵ_r มีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณได้จากอุณหภูมิห้อง อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากที่อุณหภูมิต่ำกระแสที่วัดได้อาจเกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากกักตัก ทำให้พื้นที่ที่อิเล็กตรอนหลุดออกประพฤติตัวเป็นโอส แต่อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากกักตักและโอสยังมีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างกันอยู่ซึ่งเป็นแรงคูลอมบ์ ที่อุณหภูมิต่ำจึงส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะเคลื่อนที่ออกนอกกักตักไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำ เสมือนว่าความสูงของกำแพงศักย์ที่พาหะในอุณหภูมิต่ำเคลื่อนที่ได้ลดลง หรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะสามารถข้ามกำแพงศักย์ออกไปได้ ดังรูปที่ 4.38 [57]



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(JE^{1/2})$ กับ $E^{1/2}$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



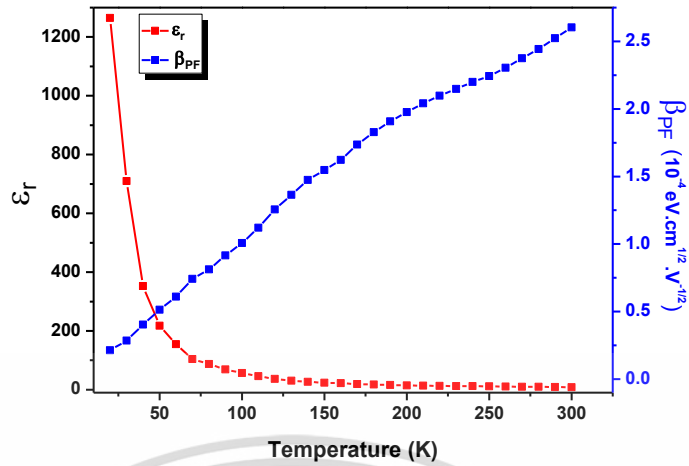
รูปที่ 4.38 แสดงแผนภาพกลไกการนำกระแสของพูล-เฟรนเคิล ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำในขณะที่ไม่มีการไบแอสและมีการไบแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพูล-เฟรนเคิล β_{PF} และค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ ϵ_r ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกพูล-เฟรนเคิลแบบปรับปรุงใหม่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

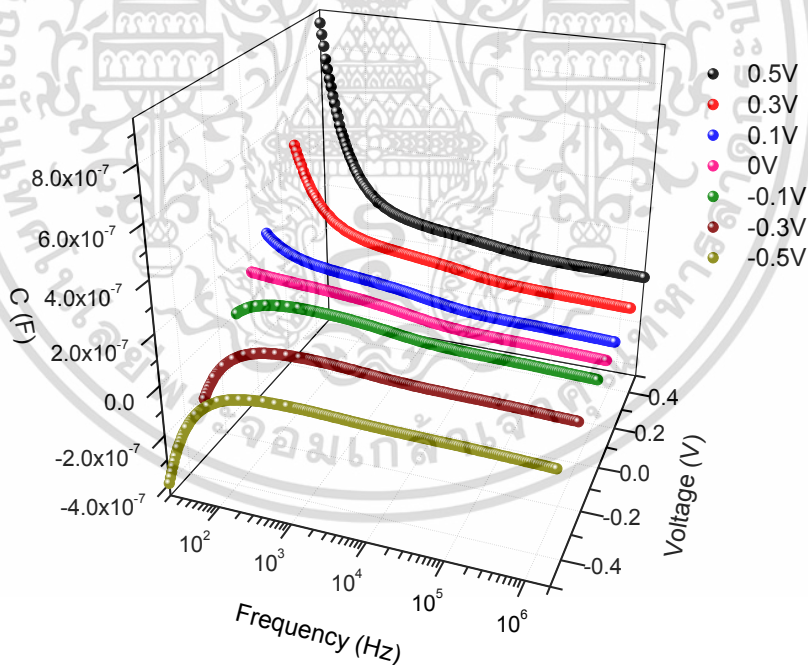
Temperature (K)	β_{PF} ($A.V^{1/2}.cm^{-1/2}$)	ϵ_r
300	2.60×10^{-4}	8.50
290	2.52×10^{-4}	9.04
280	2.44×10^{-4}	9.64
270	2.38×10^{-4}	10.20
260	2.31×10^{-4}	10.83
250	2.24×10^{-4}	11.45
240	2.20×10^{-4}	11.89
230	2.15×10^{-4}	12.47
220	2.10×10^{-4}	13.07
210	2.04×10^{-4}	13.82
200	1.98×10^{-4}	14.73
190	1.91×10^{-4}	15.82
180	1.83×10^{-4}	17.24
170	1.74×10^{-4}	19.10
160	1.62×10^{-4}	21.86
150	1.55×10^{-4}	24.05
140	1.47×10^{-4}	26.49
130	1.36×10^{-4}	30.92
120	1.26×10^{-4}	36.47
110	1.12×10^{-4}	45.78
100	1.01×10^{-4}	56.73
90	9.16×10^{-5}	68.62
80	8.12×10^{-5}	87.30
70	7.43×10^{-5}	104.41
60	6.10×10^{-5}	154.93
50	5.14×10^{-5}	217.89
40	4.04×10^{-5}	352.77
30	2.85×10^{-5}	709.43
20	2.13×10^{-5}	1264.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

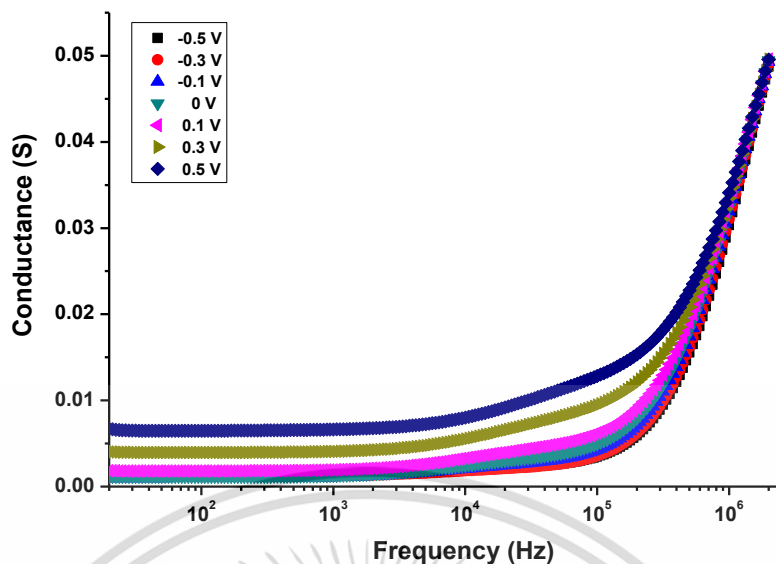


รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง β_{PF} และ ϵ_r กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

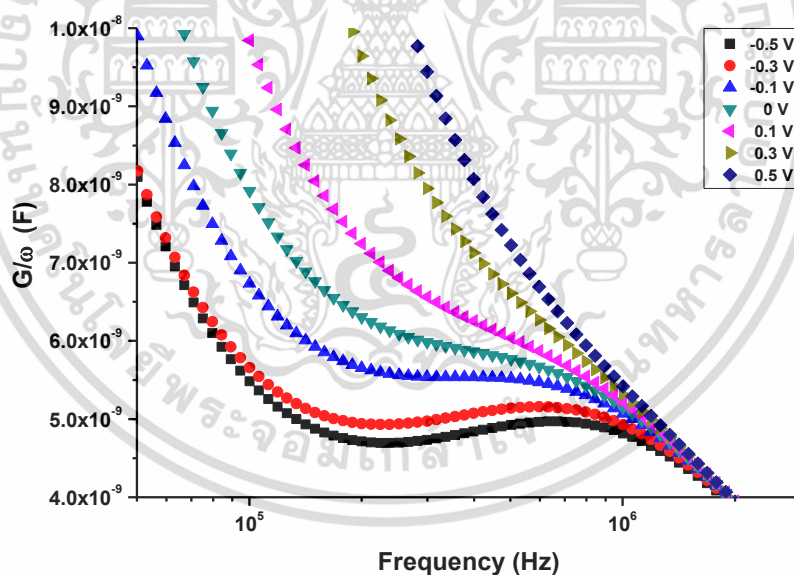
4.1.7.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

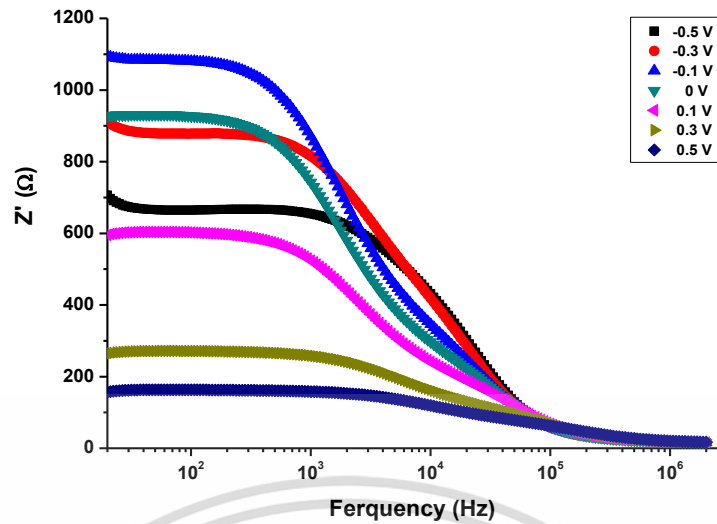


รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

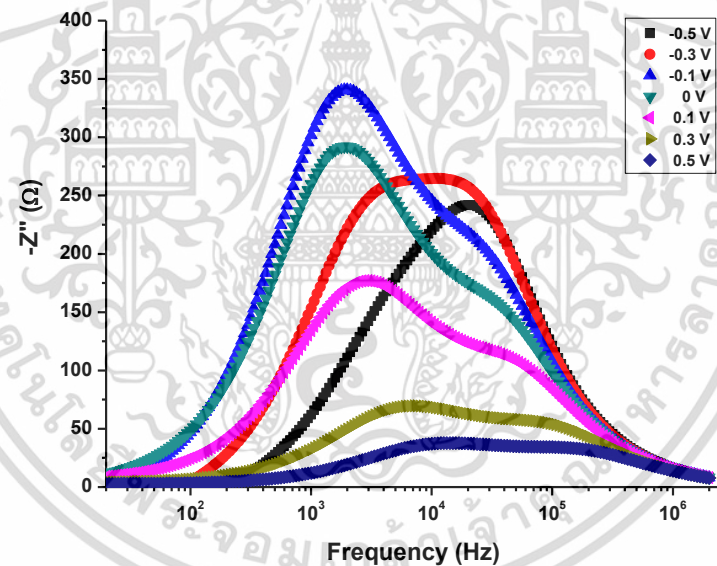


รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

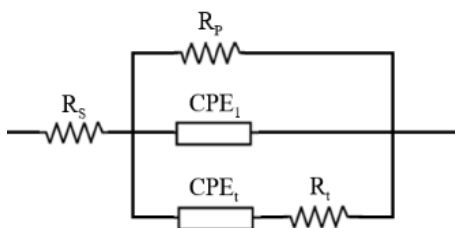
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

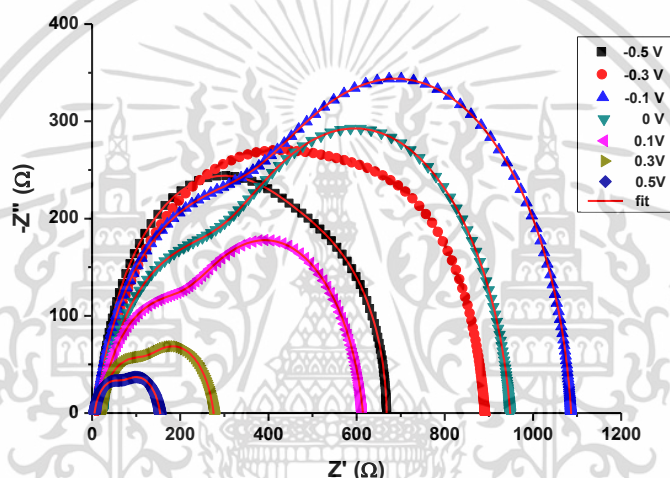


รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.45 แสดงวงจรสมมูลสำหรับใช้จำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

สำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 4.45 CPE_1 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ของความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อ R_p คือ ความต้านทานชั้นของรอยต่อ CPE_t คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ของกัณฑ์พาหะ และ R_t คือ ความต้านทานของกัณฑ์พาหะ



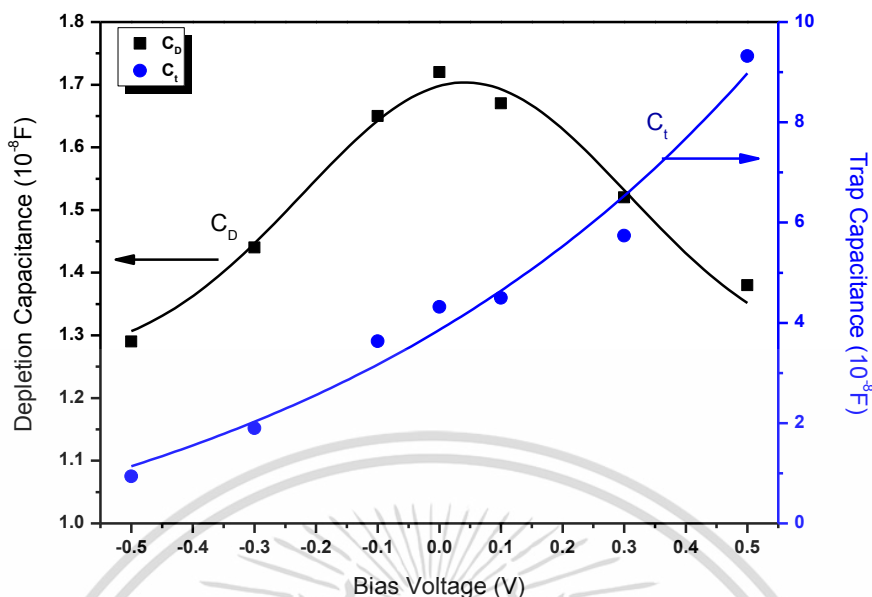
รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

จากรูปที่ 4.46 แสดงกราฟรวมที่ได้จากการจำลองของกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญ แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า เงื่อนไขขุมพาหะของค่าความจุของกัณฑ์พาหะ (C_t) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ (C_p) มีค่าลดลง ดังแสดงรูปที่ 4.47 โดยที่การลดลงของค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะนี้ สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของรอยต่อ p-n (เมื่อไบแอสตรงมากขึ้น ค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะจะมีค่าลดลง เนื่องจากบริเวณพร่องพาหะแคบลง) และเงื่อนไขขุมพาหะของค่าความต้านทานชั้น (R_p) มีค่าลดลง และค่าความต้านทานกัณฑ์พาหะ (R_t) ก็มีค่าลดลงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.48 ซึ่งการลดลงของความต้านทานชั้นนี้ สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของรอยต่อ p-n (จากกราฟระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับค่าแรงดันไฟฟ้า (V)) นอกจากนี้ ในกรณีที่ค่าความต้านทานชั้นมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานกัณฑ์พาหะ อาจมีสาเหตุมาจากผลของค่าความจุที่เป็นลบดังที่กล่าวข้างต้น

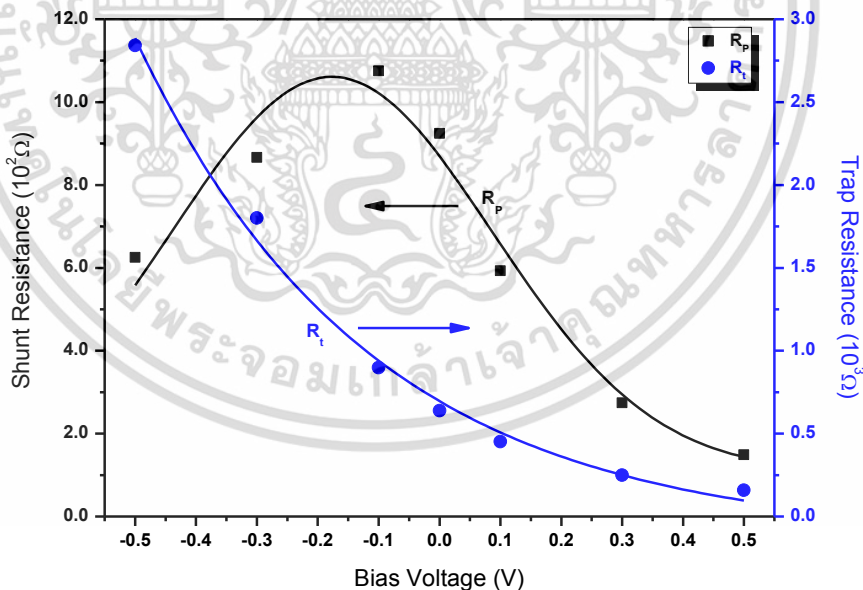
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bias Voltage (V)	CPE ₁			CPE ₂			C _p (F)	$\tau_p = R_p C_p$	C _t (F)	$\tau_t = R_p C_p$	N _t (cm ⁻² .eV ⁻¹)
	R _p (Ω)	P ₁	n ₁	R _t (Ω)	P _t	n _t					
-0.5	625.06	2.7432×10 ⁻⁸	0.9354	2841.80	9.3648×10 ⁻⁹	1	1.29×10 ⁻⁸	8.03×10 ⁻⁶	9.36×10 ⁻⁹	2.66 ×10 ⁻⁵	8.28×10 ¹¹
-0.3	866.49	3.8710×10 ⁻⁸	0.9122	1800.90	2.4639×10 ⁻⁸	0.9749	1.44×10 ⁻⁸	1.24×10 ⁻⁵	1.90×10 ⁻⁸	3.43×10 ⁻⁵	1.68×10 ¹²
-0.1	1075.60	5.3636×10 ⁻⁸	0.8925	898.09	8.8341×10 ⁻⁸	0.9195	1.65×10 ⁻⁸	1.78×10 ⁻⁵	3.63×10 ⁻⁸	3.26×10 ⁻⁵	3.21×10 ¹²
0	924.19	6.1996×10 ⁻⁸	0.8838	639.15	1.3397×10 ⁻⁷	0.8923	1.72×10 ⁻⁸	1.59×10 ⁻⁵	4.32×10 ⁻⁸	2.76×10 ⁻⁵	3.82×10 ¹²
0.1	593.19	6.6936×10 ⁻⁸	0.8796	451.99	1.8683×10 ⁻⁷	0.8686	1.67×10 ⁻⁸	9.91×10 ⁻⁶	4.50×10 ⁻⁸	2.03×10 ⁻⁵	3.98×10 ¹²
0.3	274.53	4.4881×10 ⁻⁸	0.9122	250.44	2.3816×10 ⁻⁷	0.8724	1.51×10 ⁻⁸	4.15×10 ⁻⁶	5.74×10 ⁻⁸	1.60 ×10 ⁻⁵	5.20×10 ¹²
0.5	148.88	7.7177×10 ⁻⁸	0.8686	158.57	4.0151×10 ⁻⁷	0.8067	1.38×10 ⁻⁸	2.06×10 ⁻⁶	9.32×10 ⁻⁸	1.48×10 ⁻⁵	8.24×10 ¹²

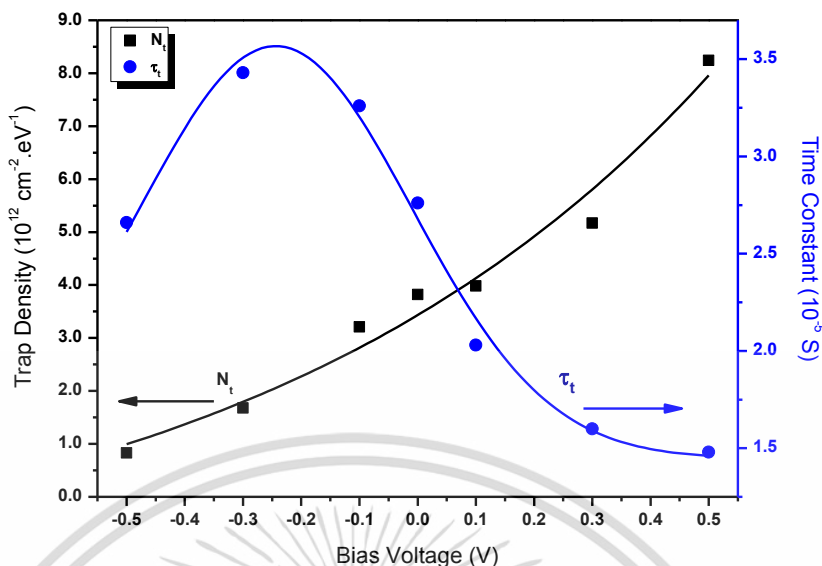
ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO)



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ (C_D) และค่าความจุของกับดักพาหะ (C_t) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชันทันท์ (R_p) และค่าความต้านทานกับดักพาหะ (R_t) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

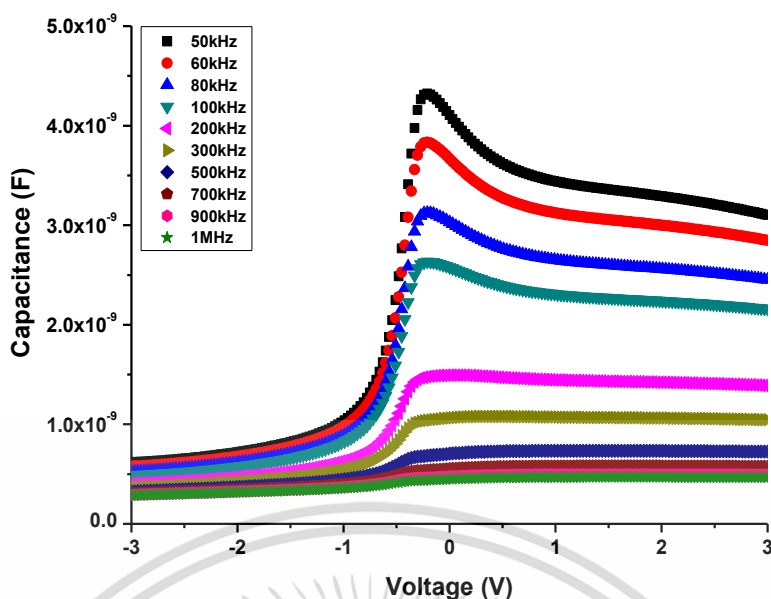


รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ (N_t) และค่าคงตัวของเวลา (τ_t) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

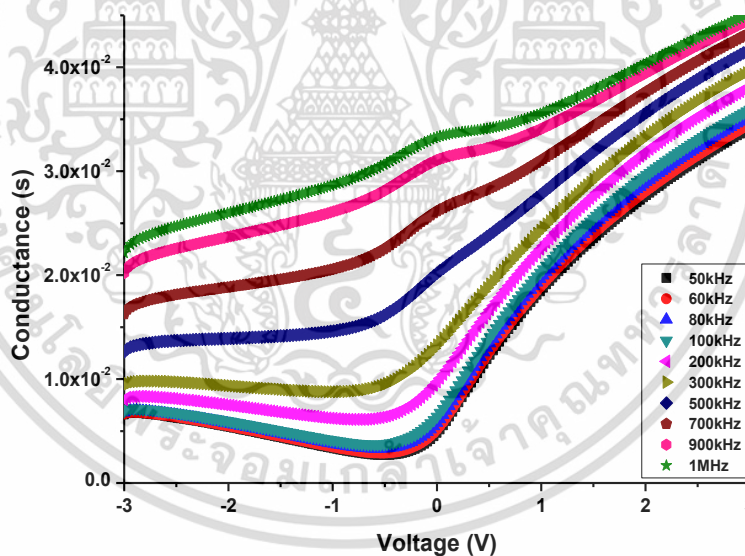
จากรูปที่ 4.49 พบว่า ในกรณีที่อยู่ในเงื่อนไขของฟิล์มบางพาหะ ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ (N_t) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งคำนวณได้จากสมการ $N_t = C_t/qA$ ส่วนค่าคงตัวของเวลา (τ) จะมีค่าลดลง สำหรับค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะและค่าคงตัวของเวลา มีค่าไม่คงที่นั้น แสดงว่าเป็นกับดักพาหะต่อเนื่อง (continuous trap) ที่สถานะผิวเชื่อมต่อ

4.7.1.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงความถี่ 50 ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยใช้แรงดัน -3 ถึง 3 โวลต์ ในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เมื่อแรงดันไบแอสตรงมีค่าเพิ่มขึ้น ความจุไฟฟ้ามีค่าเกือบคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.50 แสดงว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ประพติดตัวเป็นรอยต่อ MIS โดยมีฉนวนไฟฟ้าชั้นบางๆ เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสถานะผิวเชื่อมต่อปรากฏอยู่ สถานะผิวเชื่อมต่อนี้สามารถจับ และปล่อยอิเล็กตรอนได้ภายใต้สนามไฟฟ้าสลับ เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะก่อให้เกิดเงื่อนไขของฟิล์มบางพาหะ ส่วนกรณีภายใต้สภาวะไบแอสกลับทางจะก่อให้เกิดเงื่อนไขพร่องพาหะ

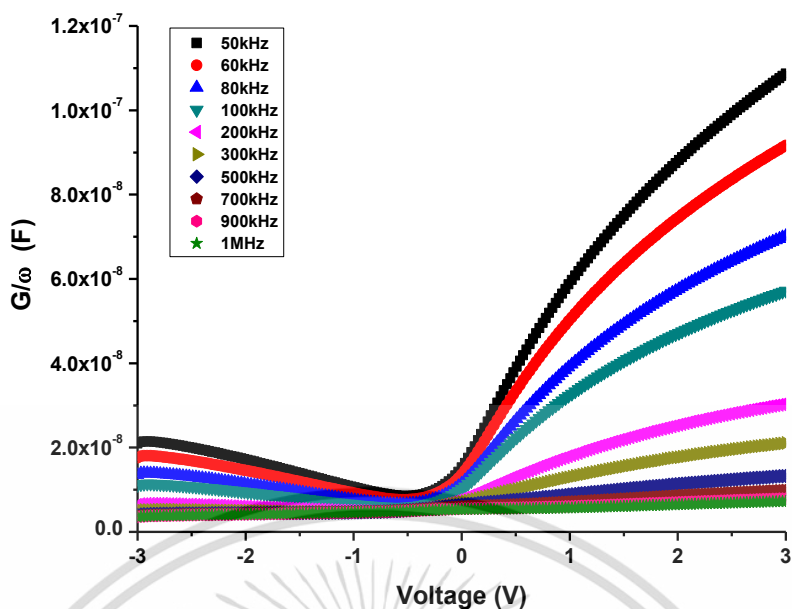


รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

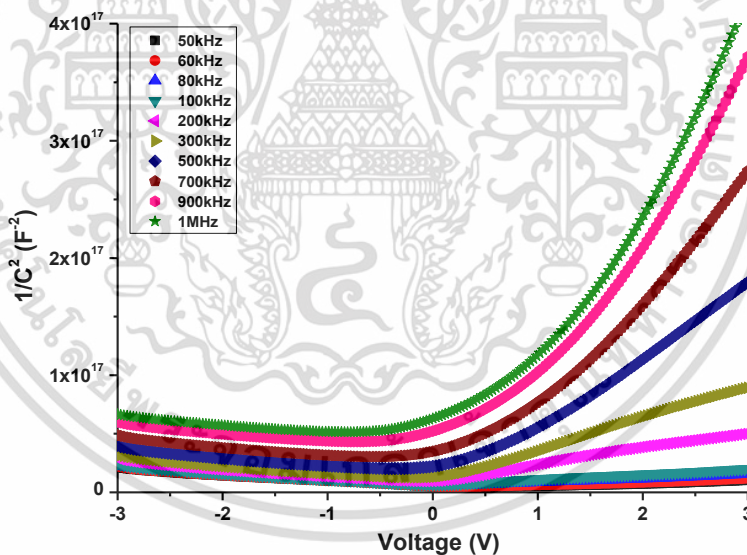


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

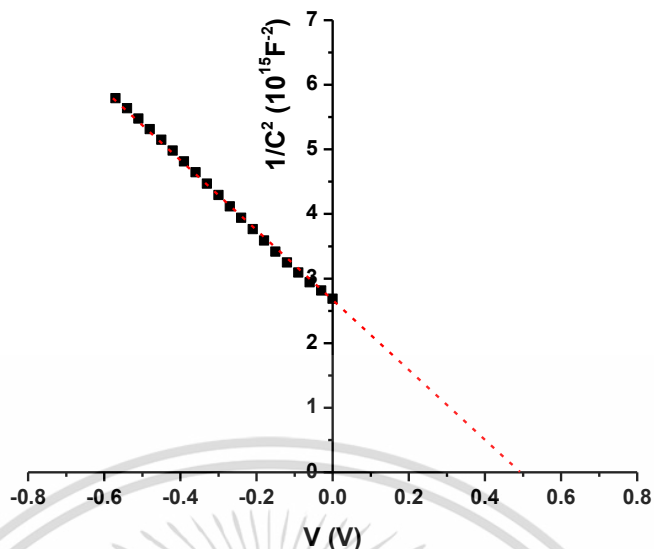


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO



รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

จากรูปที่ 4.54 เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นลักษณะกราฟเชิงเส้น แล้วลากเส้นตรงลงมาตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมของรอยต่อ (V_i) จากรูปมีค่า 0.50 โวลต์ และค่าความชันสามารถนำมาใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) จากความสัมพันธ์ของสมการ ดังนี้

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_s q N_d A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.24)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า, ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำ CdS จะมีค่า $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$ โดยที่ ϵ_r คือค่าไดอิเล็กทริก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.38 และ ϵ_0 คือเพอร์มิตติวิตี ของสภาวะสุญญากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-14} ฟารัดต่อเซนติเมตร และจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.24 ได้ทำการเลือกส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสกลับทาง -0.8 ถึง 0 โวลต์ จากนั้นทำการลากเส้นตรงลงมาตัดกับแกนนอน ซึ่งเป็นแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า จะได้ค่า V_i ที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ดังนี้ คือ

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.25)$$

ส่วนค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) สามารถคำนวณได้จากค่าความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของสมการที่ คือ

$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q \epsilon_s N_d A^2} \quad (4.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{ความชัน})} \quad (4.27)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.27 จะได้ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ มีค่าเท่ากับ 5.37×10^{17} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

กำแพงศักย์ คือ

$$\Phi_B (C - V) = V_{bi} + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.28)$$

ระดับพลังงานเฟอร์มิ คือ

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.29)$$

ความหนาแน่นของสถานะยังผล คือ

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4.30)$$

โดยที่ $m_e^* (\text{CdS}) = 0.16m_0$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของขอตตักคือ

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\epsilon_s \pi} \right] \quad (4.31)$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อขอตตักคือ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \quad (4.32)$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ คือ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_D}} \quad (4.33)$$

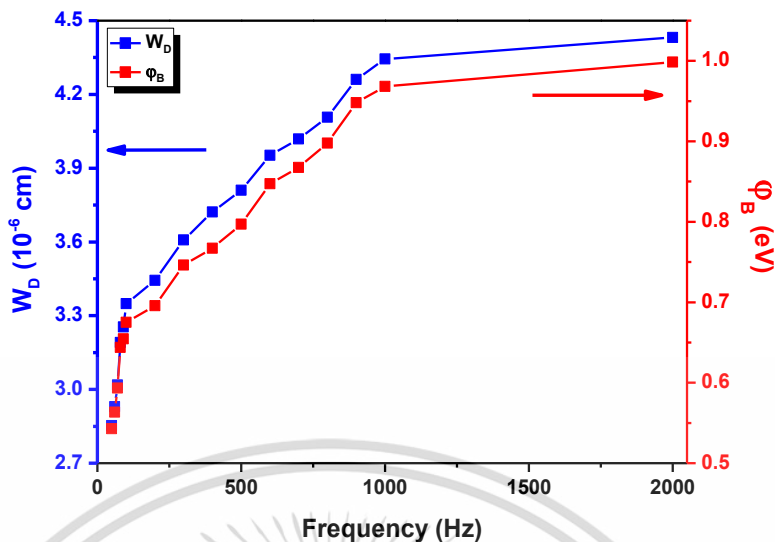
ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง คือ

$$\Psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\epsilon_s} \quad (4.34)$$

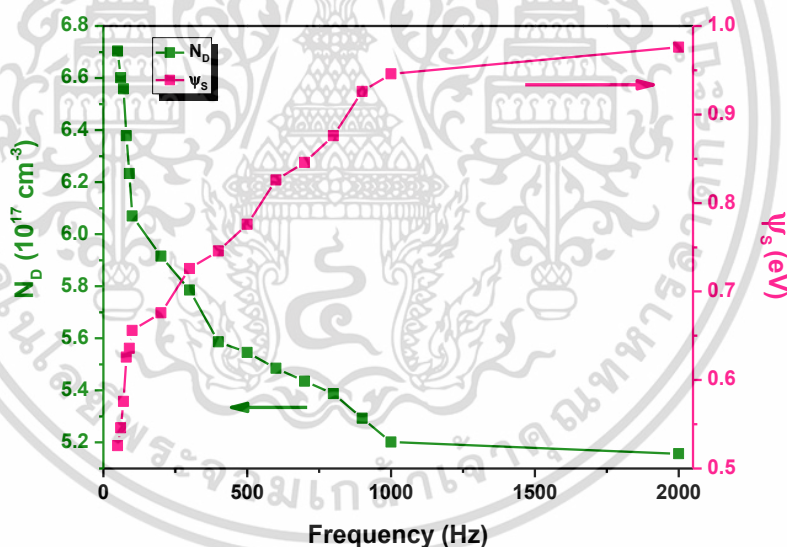
ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

Frequency (Hz)	V_i (V)	N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	$\Phi_B(C-V)$ (eV)	W_D (cm)	Ψ_s (eV)
50	0.50	6.70×10^{17}	0.0226	5.52×10^{-3}	0.542	2.85×10^{-6}	0.525
60	0.52	6.60×10^{17}	0.0230	5.58×10^{-3}	0.5632	2.93×10^{-6}	0.545
70	0.55	6.56×10^{17}	0.0231	5.72×10^{-3}	0.593	3.02×10^{-6}	0.575
80	0.60	6.38×10^{17}	0.0238	5.89×10^{-3}	0.643	3.19×10^{-6}	0.625
90	0.61	6.23×10^{17}	0.0244	5.87×10^{-3}	0.654	3.25×10^{-6}	0.636
100	0.63	6.07×10^{17}	0.0251	5.89×10^{-3}	0.675	3.35×10^{-6}	0.655
200	0.65	5.92×10^{17}	0.0258	5.91×10^{-3}	0.695	3.44×10^{-6}	0.675
300	0.70	5.79×10^{17}	0.0264	6.06×10^{-3}	0.746	3.61×10^{-6}	0.725
400	0.72	5.59×10^{17}	0.0273	6.04×10^{-3}	0.767	3.72×10^{-6}	0.745
500	0.75	5.55×10^{17}	0.0275	6.14×10^{-3}	0.797	3.81×10^{-6}	0.775
600	0.80	5.49×10^{17}	0.0277	6.31×10^{-3}	0.847	3.95×10^{-6}	0.825
700	0.82	5.44×10^{17}	0.0280	6.36×10^{-3}	0.867	4.02×10^{-6}	0.845
800	0.85	5.39×10^{17}	0.0282	6.45×10^{-3}	0.897	4.11×10^{-6}	0.875
900	0.90	5.29×10^{17}	0.0287	6.58×10^{-3}	0.948	4.26×10^{-6}	0.925
1000	0.92	5.20×10^{17}	0.0291	6.59×10^{-3}	0.968	4.34×10^{-6}	0.945
2000	0.95	5.16×10^{17}	0.0293	6.67×10^{-3}	0.998	4.43×10^{-6}	0.975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W_D และ ϕ_B กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิตริพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO



รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_D และ Ψ_S กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิตริพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

จากรูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แสดงพฤติกรรมใกล้เคียงกับรอยต่อ MIS กล่าวคือ เมื่อทำการไบแอสกลับทางจะเกิดเงื่อนไขพร่องพาหะ (depletion condition) ที่รอยต่อ MIS แต่เมื่อทำการไบแอสตรงจะเกิดเงื่อนไขชุนนุมพาหะที่รอยต่อ MIS รวมทั้ง R_S มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า และค่าความนำไฟฟ้าต่อรอยต่อ MIS โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะชุนนุมพาหะ ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไขเพื่อขจัดผลของ R_S ที่มีต่อความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า โดยที่ R_S มีค่าขึ้นกับความถี่ ดังสมการที่ 4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.35)$$

ค่าความจุของชั้นบางๆของชั้นออกไซด์ ที่ได้แก้ไขผลของ R_s แล้วเป็นดังนี้ คือ

$$C_{OX} = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.36)$$

ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าที่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องแล้วจะเป็น C_{ADJ} และ G_{ADJ} ดังความสัมพันธ์

$$C_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.37)$$

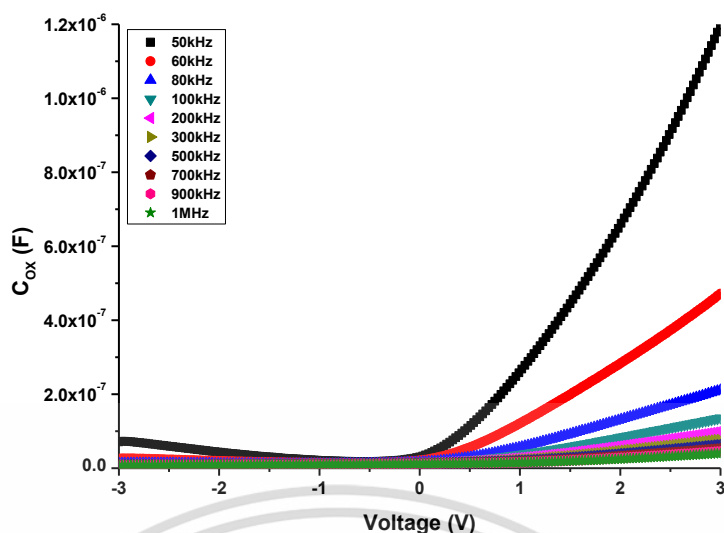
$$G_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.38)$$

เมื่อ

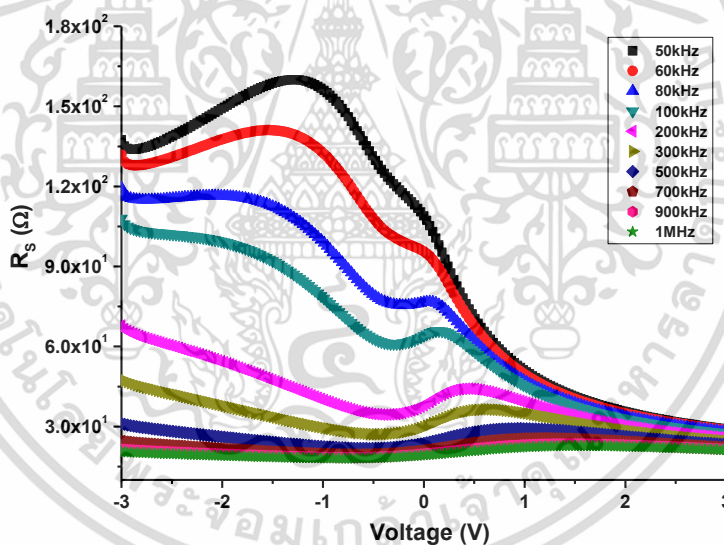
$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (4.39)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า จะแสดงดังรูปที่ 4.50 และ 4.51 ภายใต้เงื่อนไขขุมพหุพหุที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ สามารถจะคำนวณได้จากสมการ

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\left(\frac{G_{max}}{\omega} \right)}{\left(\frac{G_{max}}{\omega} \right)^2 \left(\frac{1}{C_{OX}^2} \right) + \left(1 - \left(\frac{C_m}{C_{OX}} \right) \right)^2} \right] \quad (4.40)$$

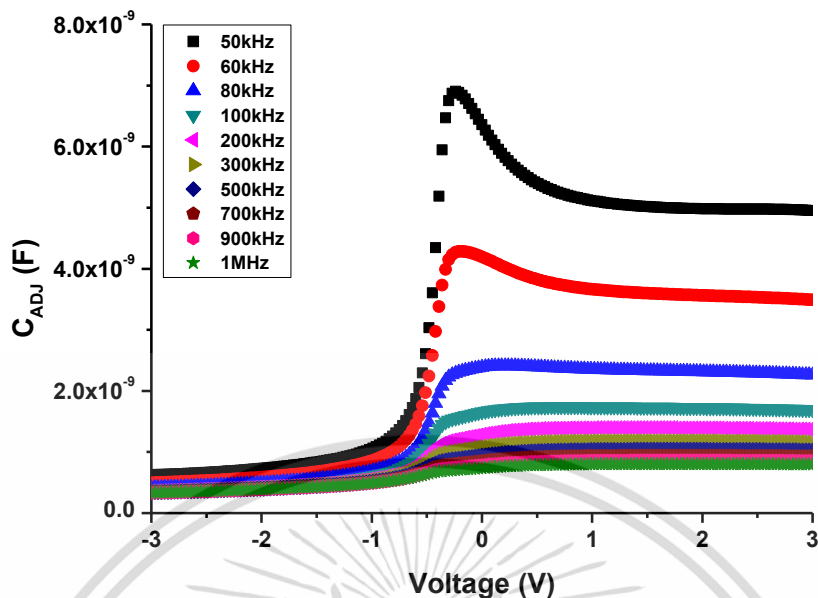


รูปที่ 4.57 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ox} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

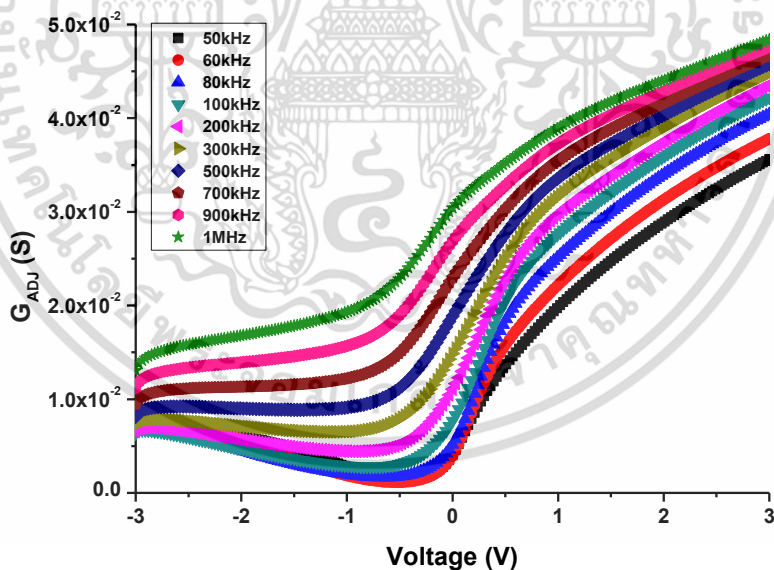


รูปที่ 4.58 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO



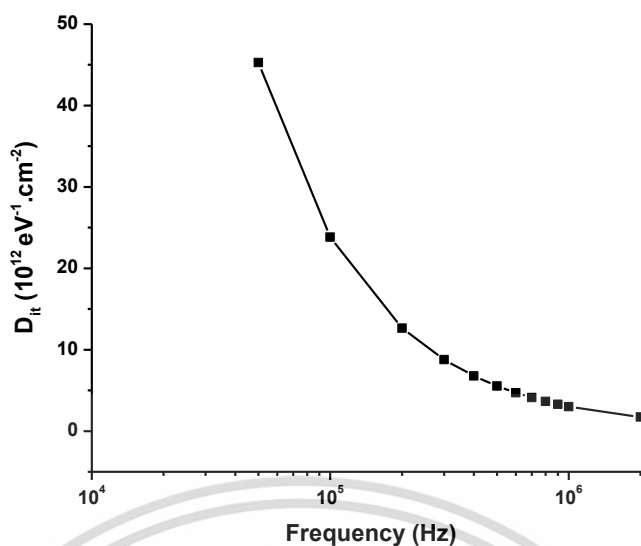
รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{ADJ} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการคำนวณ พบว่าค่าความหนาแน่นของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในตารางที่ 4.11 นอกจากนี้ในตารางยังแสดงค่าของความจุไฟฟ้า ค่า G_{\max}/ω และค่า C_{ox} สูงสุด ซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากการตอบสนองของต่อความถี่ของสถานะผิวเชื่อมต่อ กล่าวคือเมื่อมีความถี่ที่เหมาะสมจะส่งผลให้สถานะกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนองโดยการจับและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด ดังนั้นความหนาแน่นของกับดักประจุจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด G_{\max}/ω ที่แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด C_m ความจุไฟฟ้าบริเวณชั้นออกไซด์ C_{ox} และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

Frequency (kHz)	G_{\max}/ω (V=3V) (nF)	C_m (nF)	C_{ox} (nF)	D_{it} ($\times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)
50	108.67	9.95	1197.19	45.28
100	57.20	7.04	471.53	23.84
200	30.37	4.46	211.29	12.66
300	21.04	3.35	135.60	8.77
400	16.22	2.74	98.82	6.76
500	13.28	2.36	77.05	5.54
600	11.29	2.10	62.73	4.71
700	9.85	1.91	52.72	4.11
800	8.75	1.76	45.22	3.65
900	7.89	1.64	39.58	3.29
1000	7.19	1.54	35.18	3.00
2000	4.15	0.90	19.99	1.73



รูปที่ 4.61 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง D_{it} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

4.7.1.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิ ในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วงอุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น รูปที่ 4.62 ซึ่งกรณีความหนาแน่นของกักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกันความจุของของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่วัดได้คือ C_p จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์

$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \tan^{-1}(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}} \quad (4.41)$$

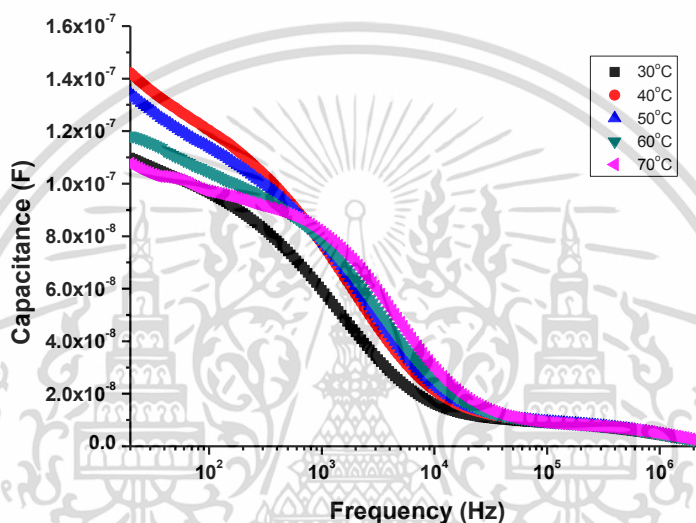
เมื่อ C_D คือ ความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน C_{it} คือ ความจุไฟฟ้าของกักประจุ รูปที่ 4.63 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่พบว่าความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของจอนเซอร์ (Joncher relation) คือ

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^S \quad (4.42)$$

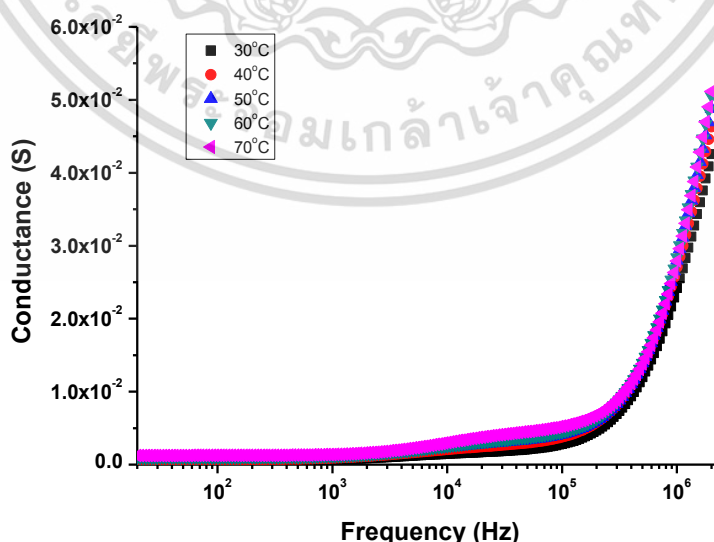
เมื่อ A คือค่าคงที่ ส่วนเลขยกกำลัง S จะมีค่าน้อยกว่า 1 และนอกจากนี้เมื่อนำค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาเขียนเป็นกราฟของค่า G/ω กับความถี่ก็ยังคงแสดงให้เห็นช่วงของการตอบสนองของกักประจุ เอกสารนี้ ประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ความถี่เป็นสองช่วงได้อย่างชัดเจนโดยค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เฉพาะที่ทำให้อิเล็กทรอนิกส์หลุดออกจากกักตัก (ω_0) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

การหาค่าความถี่เฉพาะ (ω_0) นอกจากความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่แล้วก็ยังสามารถหาได้หลายวิธีด้วยกันโดยเริ่มจากการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับลอการิทึมของความถี่เชิงมุมจะทำให้ช่วงจุดเปลี่ยนโค้งของค่าความจุกลายเป็นจุดสูงสุดของรูปที่ 4.64 และในรูปที่ 4.65 จะเป็นการหาค่าอนุพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมซึ่งจะได้รูปกราฟที่มีลักษณะคล้ายกันแต่จะสังเกตเห็นจุดสูงสุดได้ชัดเจนกว่ากราฟอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งค่า ω_0 ที่ได้จากทั้งสามวิธีนี้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงดังที่แสดงในตารางที่ 4.13



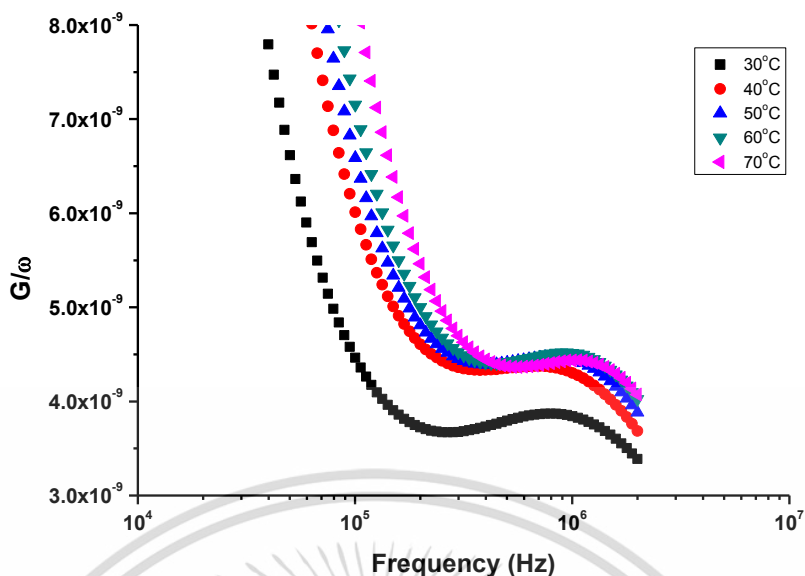
รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



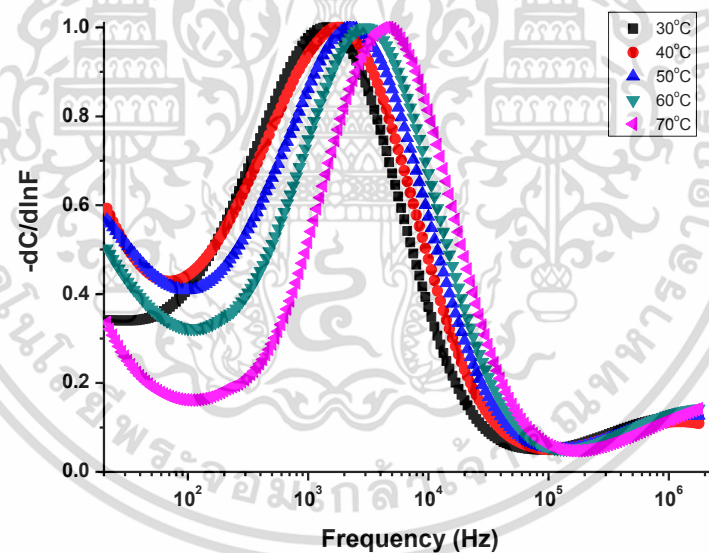
รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ

30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

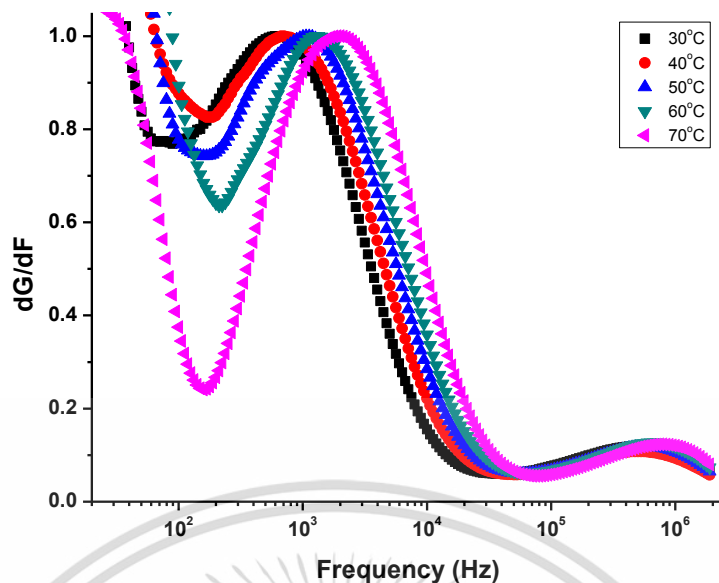


รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

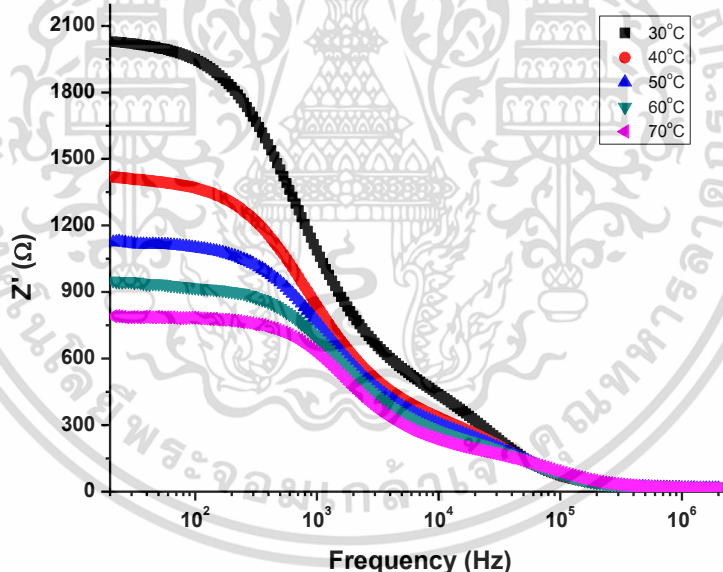


รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln F$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

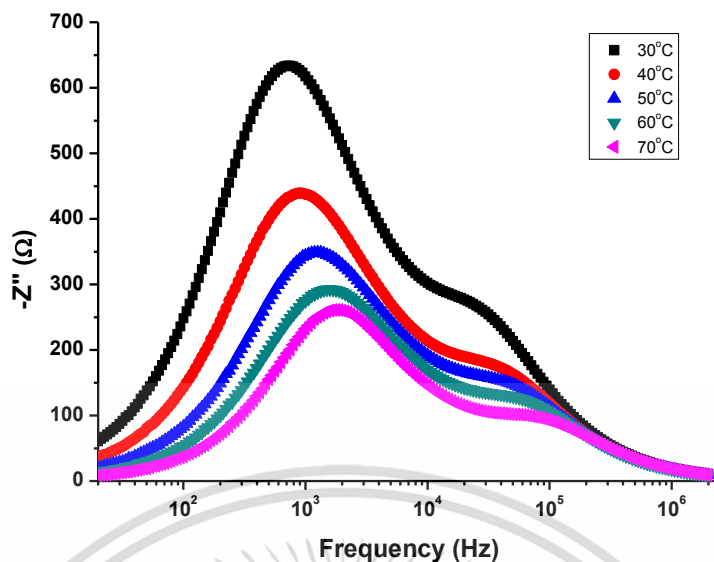


รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า dG/dF กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

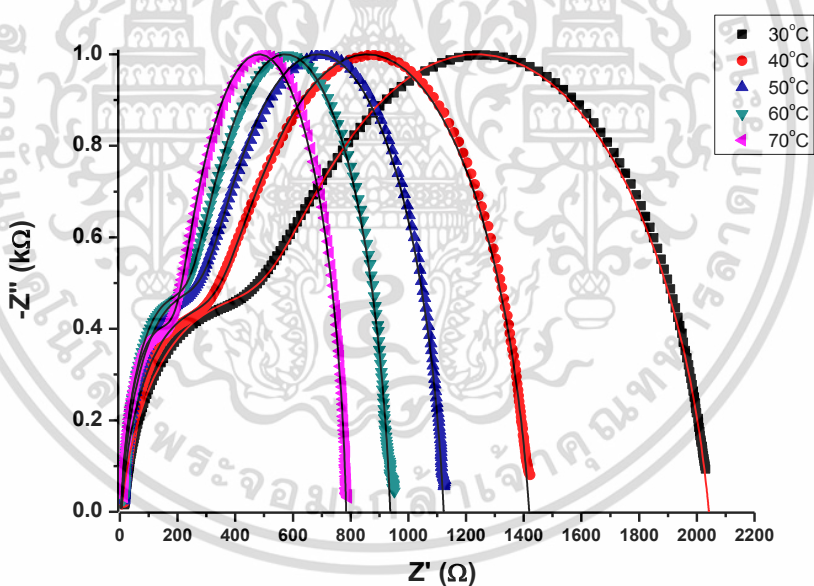


รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

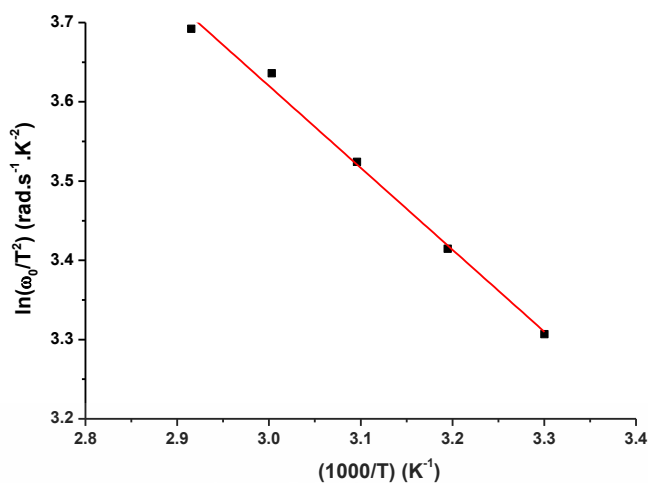


รูปที่ 4.69 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

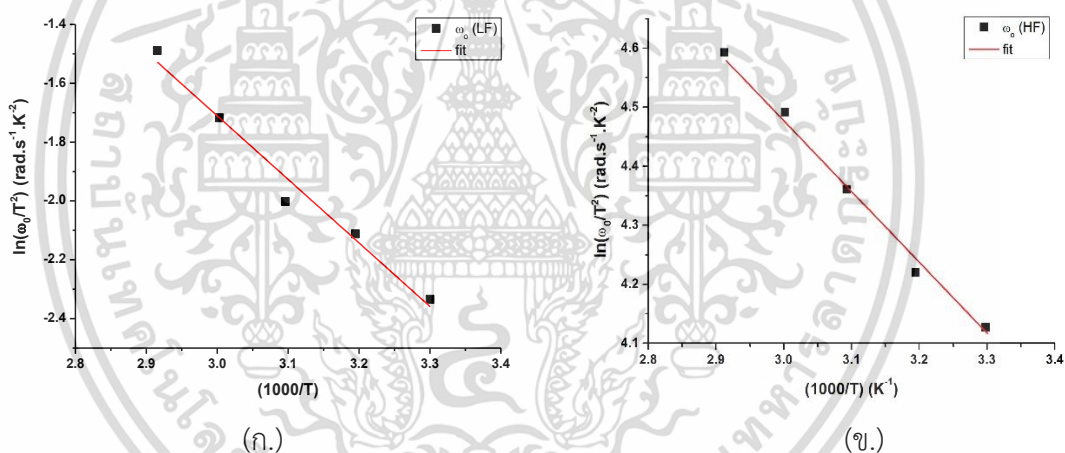
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature (°C)	CPE ₁			CPE ₂			C _p (F)	$\tau_D = R_p C_p$	C _t (F)	$\tau_t = R_p C_p$	N _t (cm ⁻² .eV ⁻¹)
	R _p (Ω)	P ₁	n ₁	R _t (Ω)	P _t	n _t					
30	2035.10	4.6527×10 ⁻⁸	0.8818	907.27	2.3039×10 ⁻⁷	0.8353	1.3438×10 ⁻⁸	2.7349×10 ⁻⁵	5.3863×10 ⁻⁸	4.8869×10 ⁻⁵	4.7650×10 ¹²
40	1412.80	5.5979×10 ⁻⁸	0.8756	594.75	2.8890×10 ⁻⁷	0.8484	1.4334×10 ⁻⁸	2.0250×10 ⁻⁵	6.1353×10 ⁻⁸	3.6490×10 ⁻⁵	5.4248×10 ¹²
50	1117.00	5.0614×10 ⁻⁸	0.8818	524.15	2.4193×10 ⁻⁷	0.8612	1.3642×10 ⁻⁸	1.5239×10 ⁻⁵	5.6934×10 ⁻⁸	2.9842×10 ⁻⁵	5.0341×10 ¹²
60	931.36	4.1913×10 ⁻⁸	0.8953	427.88	2.3242×10 ⁻⁷	0.8658	1.2784×10 ⁻⁸	1.1907×10 ⁻⁵	5.5685×10 ⁻⁸	2.3826×10 ⁻⁵	4.9236×10 ¹²
70	780.02	4.9917×10 ⁻⁸	0.8807	342.03	1.5659×10 ⁻⁷	0.9118	1.2607×10 ⁻⁸	9.8342×10 ⁻⁶	6.0443×10 ⁻⁸	2.0673×10 ⁻⁵	5.3443×10 ¹²

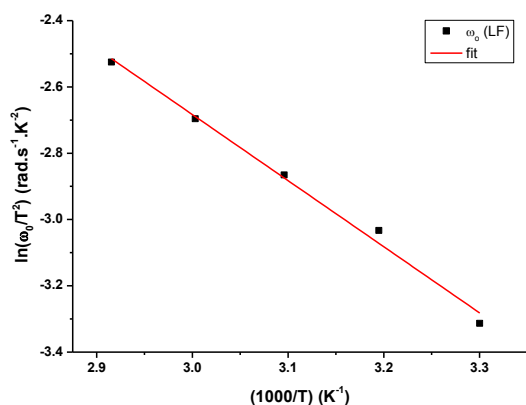
ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



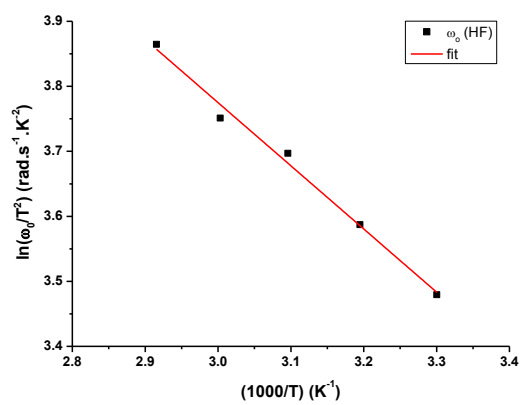
รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของ G/ω เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO



รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของ $-dC/d\ln F$ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO
 ก. ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency)
 ข. ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่สูง (Height Frequency)



(ก.)

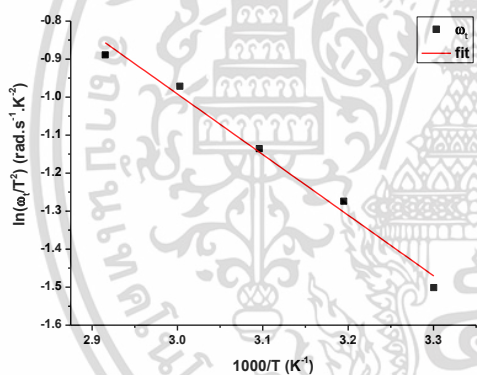


(ข.)

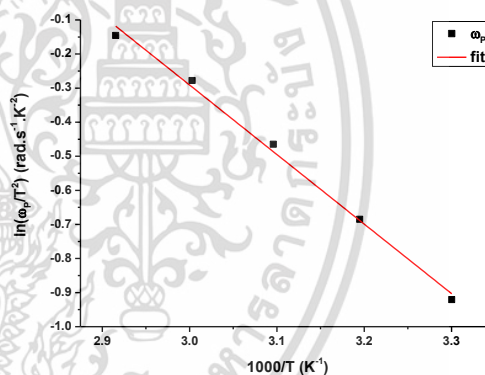
รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา ω_0 ของ dG/dF เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

ก. ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency)

ข. ได้จากการหา ω_0 ในช่วงความถี่สูง (Height Frequency)



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_i/T^2)$ และ $\ln(\omega_p/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา τ_i และ τ_p ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนตามลำดับ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

ก. ได้จากการหา ω_i ในสถานะผิวเชื่อมต่อ

ข. ได้จากการหา ω_p ในบริเวณพร่องพาหะ

การหาค่า ω_0 จากค่าอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุม แล้วนั้น จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.43)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.44ก.)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการที่ (4.44ก.) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.44ข.)$$

จุดตัดแกน y นั้นจะได้ค่า $\ln\xi_0$ แล้วจะสามารถหา ξ_0 ได้ และสามารถหาค่า σ_T ได้จากสมการความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \xi_0 &= 2\sigma_T V_{th} N_c \\ \sigma_T &= \frac{\xi_0}{2V_{th} N_c} \end{aligned} \quad (4.45)$$

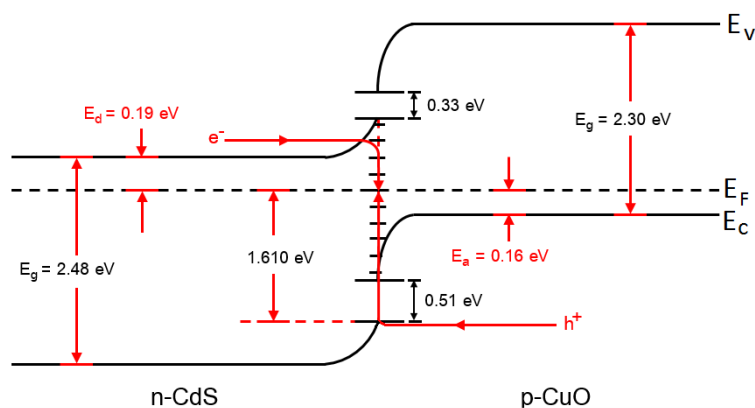
เมื่อ ξ_0 คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยอิเล็กตรอนของกับดักประจุ

ค่าพลังงานกระตุ้น E_a สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $1,000/T$ ซึ่ง ω_0 สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ค่าของ ξ_0 และ σ_T นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังที่แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความถี่กำทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากหลายวิธีของรอยต่ออิมิตชันของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

Method	Conditions	T (°C)	ω_0 (rad/s)	E_a (eV)	ζ_0 (s ⁻¹ K ⁻¹)	σ_i (cm ⁻²)
$G/\omega - f$	HF	30	2.51×10^6	0.089	812.40	6.31×10^{-25}
		40	2.98×10^6			
		50	3.54×10^6			
		60	4.21×10^6			
		70	4.72×10^6			
$dG/df - f$	LF	30	3.34×10^3	0.172	27.03	2.10×10^{-26}
		40	4.72×10^3			
		50	5.94×10^3			
		60	7.48×10^3			
		70	9.42×10^3			
	HF	30	2.98×10^6	0.084	804.32	6.24×10^{-25}
		40	3.54×10^6			
		50	4.21×10^6			
		60	4.72×10^6			
		70	5.61×10^6			
$dC/d \ln f - f$	LF	30	8.39×10^3	0.186	116.74	9.06×10^{-26}
		40	1.12×10^4			
		50	1.41×10^4			
		60	1.99×10^4			
		70	2.65×10^4			
	HF	30	5.94×10^6	0.103	3197.10	2.48×10^{-24}
		40	6.67×10^6			
		50	7.48×10^6			
		60	9.98×10^6			
		70	1.19×10^7			
$Z' - Z''$	Trap	30	2.05×10^4	0.137	44.29	1.94×10^{-25}
		40	2.74×10^4			
		50	3.35×10^4			
		60	4.19×10^4			
		70	4.84×10^4			
	Junction	30	3.66×10^4	0.176	339.88	1.49×10^{-24}
		40	3.11×10^4			
		50	6.56×10^4			
		60	8.40×10^4			
		70	10.17×10^4			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



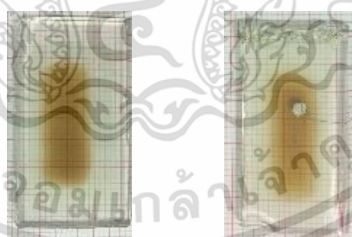
รูปที่ 4.74 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

จากรูปที่ 4.47 แสดงแผนภาพแถบพลังงานพบว่าพาหะที่ไหลข้ามรอยต่อภายใต้แรงดันไบแอสตรงส่วนใหญ่ เป็นกระแสอิเล็กตรอนซึ่งไหลจากด้าน CdS ผ่านกำแพงศักย์สูงประมาณ 0.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนโฮล จากสารกึ่งตัวนำ CuO จะแสดงปรากฏการณ์ขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ แล้วเข้าร่วมตัวกับอิเล็กตรอนที่ระดับเฟอร์มิ โดยพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 1.61 อิเล็กตรอนโวลต์

4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

4.2.1 ลักษณะรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

จากการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ โดยวิธีออบสารละลายเคมี พบว่าฟิล์มบางมีสีเหลืองอ่อน โปร่งแสง และสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง มีสีน้ำตาล โปร่งแสง ยึดเกาะบนชั้นได้ดี ไม่หลุดร่อนง่าย ดังรูปที่ 4.75



(ก)

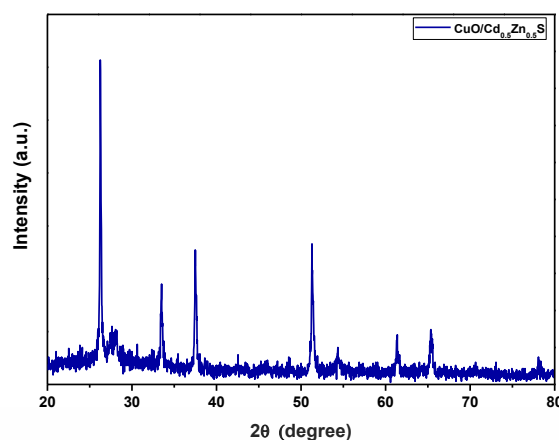
(ข)

รูปที่ 4.75 แสดงภาพถ่าย (ก) และการต่อขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (ข) ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) แสดงดังรูปที่ 4.76

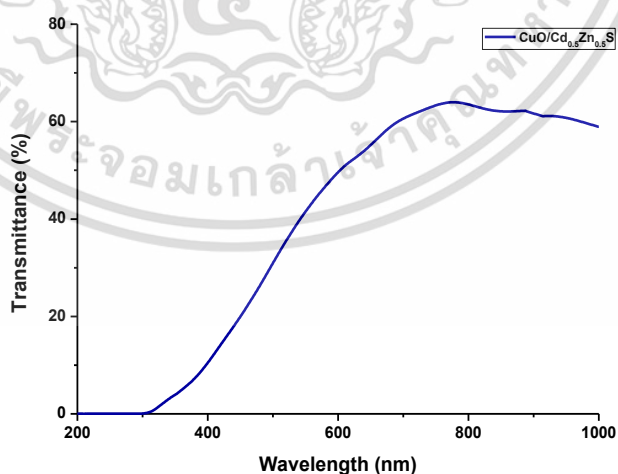
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



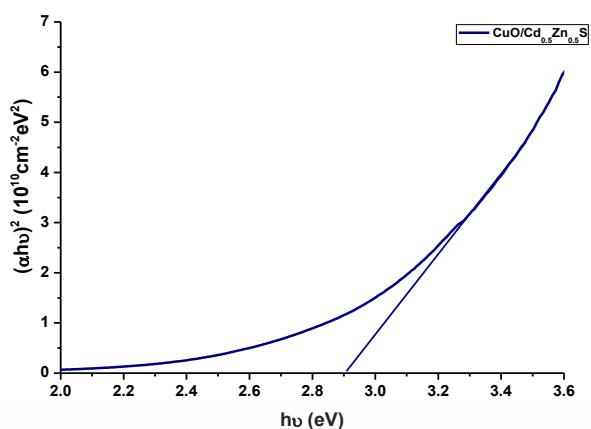
รูปที่ 4.76 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

4.2.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

การศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตร และมีการส่งผ่านแสงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.77 จากนั้นเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $h\nu$ แล้วลากเส้นตรงตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จะได้จุดตัดแกนซึ่งสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน มีขนาดเท่ากับ 2.90 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 4.77 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานดังกล่าวนี้ เป็นของ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ส่วนขอบการดูดกลืนของฟิล์มบาง CuO ไม่ปรากฏให้เห็น อาจเนื่องมาจากฟิล์มบาง CuO ค่อนข้างบาง ปริมาณเนื้อสารมีน้อย จึงส่งผลให้ขอบการดูดกลืนไม่คมชัด



รูปที่ 4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$



รูปที่ 4.78 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

4.2.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

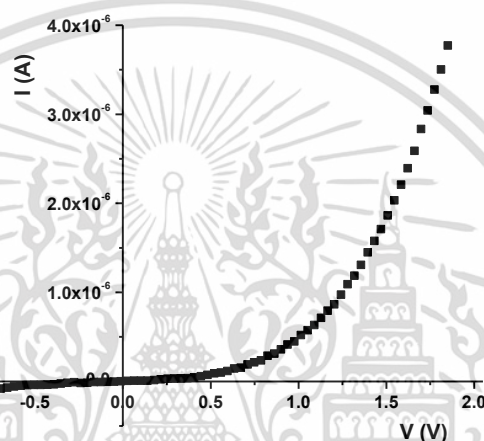
การศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 50 ถึง 2000 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ แรงดันตกคร่อมรอยต่อ ความสูงของกำแพงศักย์ อีกทั้งได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ ภายใต้แรงดันไบแอส -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 65 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ ระดับพลังงานของกักประจุที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ และพลังงานกระตุ้น เป็นต้น

4.2.4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

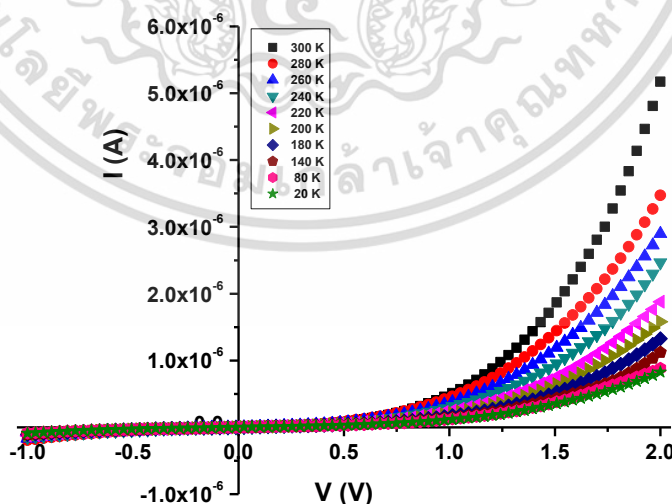
จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องพบว่าการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด ดังรูปที่ 4.79 โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 1.20 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ CuO และของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ อยู่ในระดับ 10^{16} และ 10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจึงประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ เป็นรอยต่อแบบ p^+-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อขอตติ์กี โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ $CdZnS$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน ดังรูปที่ 4.80 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่แรงดันไบแอสตรงค่าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกัมแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านกัมแพงศักย์ค่าสูงได้ โดยไม่ต้องใช้แรงดันไบแอสมากนัก และแรงดันขีดเริ่มของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 ไปจนถึง 300 เคลวิน อีกทั้งยังมีกับดักประจุที่ปรากฏที่บริเวณผิวเชื่อมต่อซึ่งจะทำให้เกิดกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกัมแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ (tunneling enhance recombination) โดดเด่นขึ้น จึงส่งผลให้แพกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ขณะที่ความสูงของกัมแพงศักย์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง



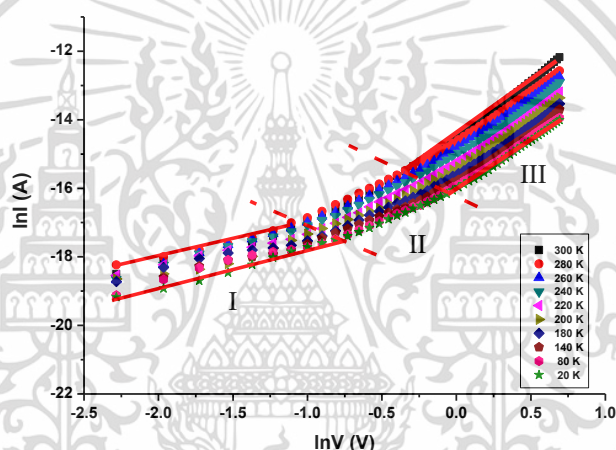
รูปที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -1 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$



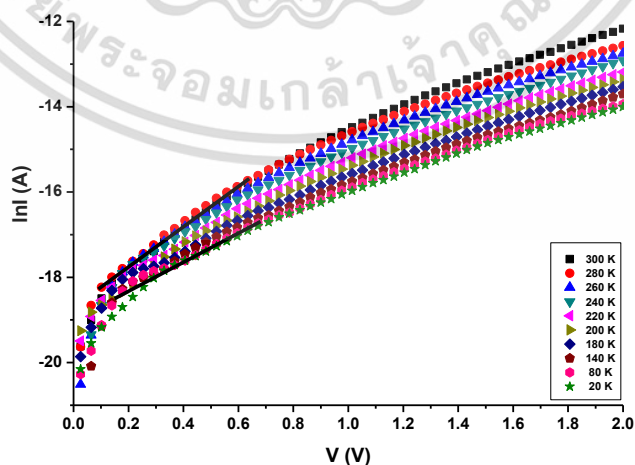
รูปที่ 4.80 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ $20-300$ เคลวิน ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

กลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงรอยต่อวิธีพังก์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ จะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ดังแสดงในรูปที่ 4.81 พบว่าสามารถแบ่งช่วงแรงดันไบแอสได้ 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ I ($0 \leq V < 0.10$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ II ($0.10 \leq V < 0.30$) แสดงกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ส่วนบริเวณที่ III ($0.30 \leq V \leq 2$) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล สำหรับค่าความชันของแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 4.14

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V ดังแสดงรูปที่ 4.82 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ เพื่อนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า โดยจะพิจารณาเฉพาะในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (บริเวณที่ II ที่แรงดันไบแอส $0.10 \leq V < 0.30$) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุดมคติได้ถูกต้องยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิธีพังก์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$



รูปที่ 4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับค่า V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิธีพังก์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

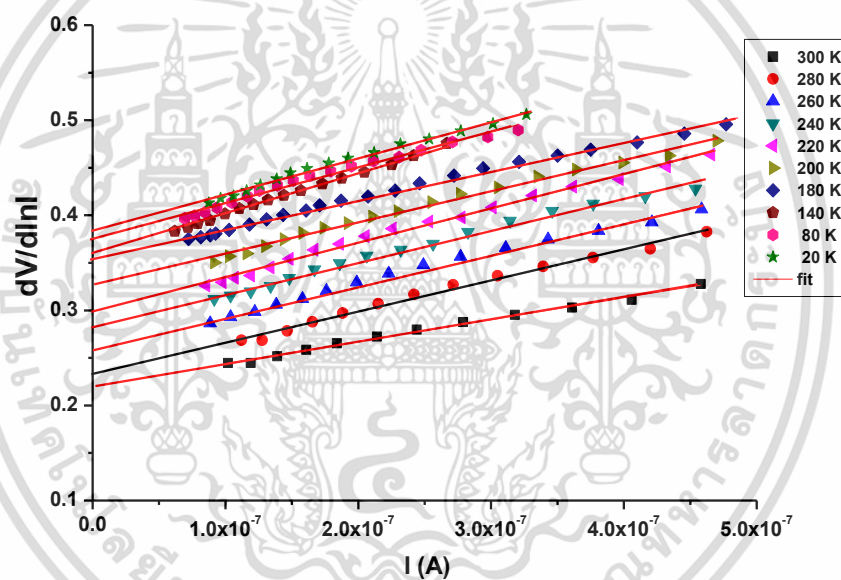
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของกลไกการนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าช่วง -1.0 ถึง 2.0 โวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

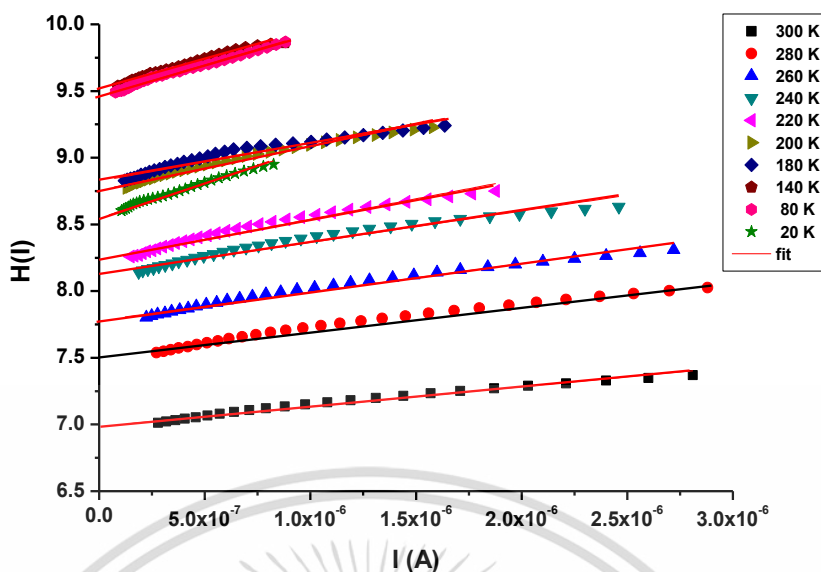
Temperature (K)	Region I ($0 < V < 0.1$) Ohm's law	Region II ($0.10 < V < 0.30$) Ideality Factor (n)	Region III ($0.30 < V < 2.00$) Exponent Value (m)
300	1.03	8.68	3.26
290	1.46	9.85	2.92
280	0.92	10.13	2.88
270	1.09	10.61	2.90
260	1.27	11.32	2.90
250	1.16	11.86	2.91
240	1.18	12.85	2.88
230	1.65	13.96	2.88
220	0.89	14.21	2.85
210	1.41	15.38	2.80
200	0.82	16.75	2.80
190	0.94	17.39	2.97
180	1.12	18.83	2.82
170	1.42	20.48	2.70
160	1.26	23.00	2.73
150	0.71	22.40	2.70
140	1.25	26.54	2.80
130	1.20	29.15	2.79
120	0.95	29.46	2.76
110	1.24	34.56	2.78
100	1.22	37.40	2.70
90	1.22	42.24	2.80
80	1.07	47.36	3.22
70	1.20	58.53	2.80
60	1.27	64.84	2.71
50	1.24	78.08	2.70
40	1.05	91.15	2.71
30	1.09	121.53	2.74
20	1.02	191.32	2.76

จากทฤษฎีของชวงจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรมของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$ ที่ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ (บริเวณที่ III ที่แรงดันไบแอส $0.30 \leq V \leq 2$) เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา โดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I จะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 4.83 โดยความชันของกราฟนั้นคือค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร และจุดตัดแกน y นำไปคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติได้ และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.84 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ที่ได้จากจุดตัดแกน y นอกจากนี้ความชันของกราฟก็คือค่าความต้านทานอนุกรม เช่นเดียวกันกับวิธีของชวงดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

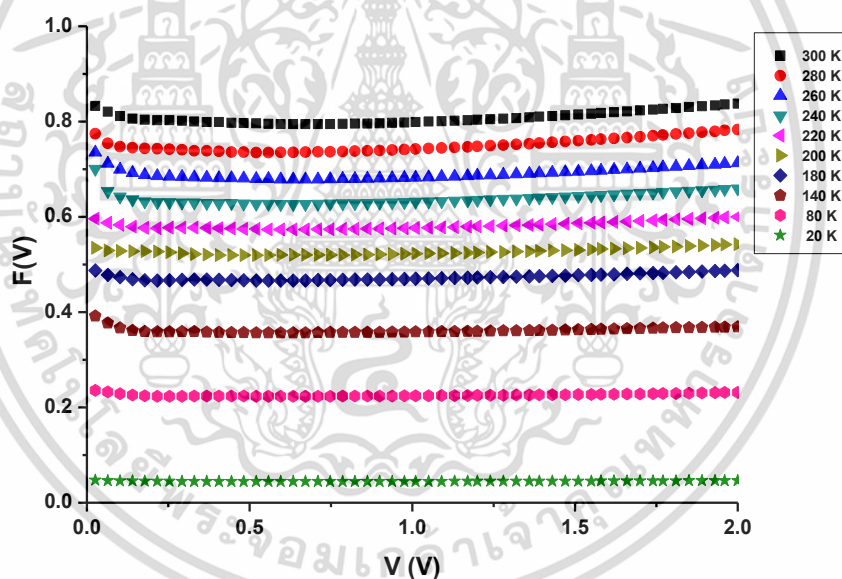
วิธีของนอร์ดจะเขียนกราฟได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 4.85 ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานอนุกรมและค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด แสดงดังตารางที่ 4.15



รูปที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$



รูปที่ 4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$



รูปที่ 4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $F(V)$ กับค่า V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

ตารางที่ 4.15 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

T (K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, ϕ_b (eV)			Series Resistance, R_s (k Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	$dV/d(\ln I)-I$	I-V	$H(I)-I$	$F(V)-V$	$H(I)-I$	$dV/d(\ln I)-I$	$F(V)-V$
300	8.11×10^{-9}	8.68	8.92	0.80	0.80	0.86	215.07	212.06	244.76
290	1.07×10^{-8}	9.85	9.76	0.77	0.76	0.82	272.17	289.72	175.04
280	1.08×10^{-8}	10.13	11.51	0.74	0.74	0.79	189.09	199.93	187.29
270	1.01×10^{-8}	10.61	12.02	0.71	0.71	0.76	219.86	202.75	242.78
260	9.81×10^{-9}	11.32	12.62	0.69	0.69	0.73	255.86	250.51	271.49
250	8.96×10^{-9}	11.86	12.99	0.66	0.66	0.70	271.04	281.36	225.19
240	9.52×10^{-9}	12.85	14.01	0.63	0.63	0.67	303.88	305.42	254.40
230	9.05×10^{-9}	13.96	14.62	0.60	0.60	0.64	332.83	350.96	261.19
220	7.79×10^{-9}	14.21	15.81	0.58	0.58	0.62	364.69	365.93	349.65
210	8.11×10^{-9}	15.38	16.01	0.55	0.55	0.58	389.27	401.36	362.47
200	8.11×10^{-9}	16.75	17.39	0.52	0.52	0.55	416.15	417.00	372.15
190	7.49×10^{-9}	17.39	17.70	0.50	0.50	0.53	436.06	445.88	370.53
180	7.12×10^{-9}	18.83	19.32	0.47	0.47	0.49	448.28	463.88	351.33
170	7.72×10^{-9}	20.48	20.46	0.44	0.44	0.46	449.44	437.39	430.45
160	8.28×10^{-9}	23.00	22.46	0.41	0.41	0.44	542.99	548.66	530.30
150	6.25×10^{-9}	22.40	24.73	0.39	0.39	0.41	560.40	577.48	513.47
140	7.34×10^{-9}	26.54	27.33	0.36	0.36	0.38	493.81	493.65	447.71
130	7.34×10^{-9}	29.15	29.43	0.33	0.33	0.35	559.34	562.01	497.12
120	6.01×10^{-9}	29.46	31.88	0.31	0.31	0.32	739.28	734.01	655.27
110	6.78×10^{-9}	34.56	36.89	0.28	0.28	0.29	530.89	554.13	537.21
100	6.57×10^{-9}	37.40	37.10	0.25	0.24	0.27	661.65	669.95	375.03
90	6.84×10^{-9}	42.24	43.80	0.22	0.22	0.24	471.40	481.74	281.36
80	6.32×10^{-9}	47.36	42.03	0.20	0.18	0.21	19.07	94.4	286.24
70	7.05×10^{-9}	58.53	59.63	0.17	0.17	0.18	554.46	555.20	203.11
60	6.64×10^{-9}	64.84	69.57	0.15	0.15	0.15	630.60	894.40	306.61
50	6.57×10^{-9}	78.08	78.84	0.12	0.12	0.13	620.86	614.84	188.19
40	5.72×10^{-9}	91.15	98.55	0.09	0.09	0.10	772.87	799.06	178.67
30	5.89×10^{-9}	121.53	127.54	0.07	0.07	0.07	642.35	641.16	104.42
20	6.51×10^{-9}	191.32	202.90	0.04	0.04	0.05	517.59	524.98	367.46

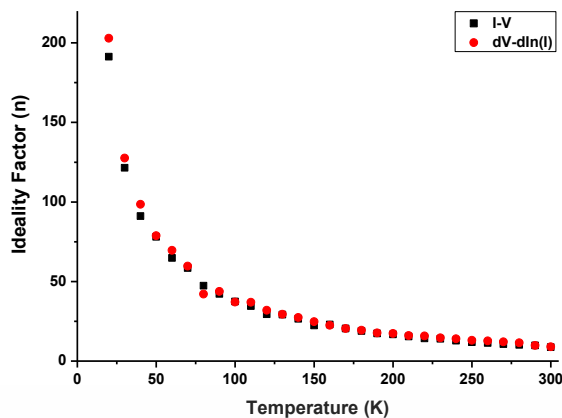
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแล้วพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตกกับอุณหภูมิ พบว่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตกที่ได้จากกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูป 4.86 สามารถหาค่า E_{00} ของกลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะที่สถานะผิวเชื่อมต่อ จากความสัมพันธ์ $n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)$ มีค่าเท่ากับ 0.32 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 4.87 การที่ค่า E_{00} ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า 25 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น กลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลโดดเด่นกว่ากลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชัน จากนั้นโฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อในบริเวณพร่องพาหะ

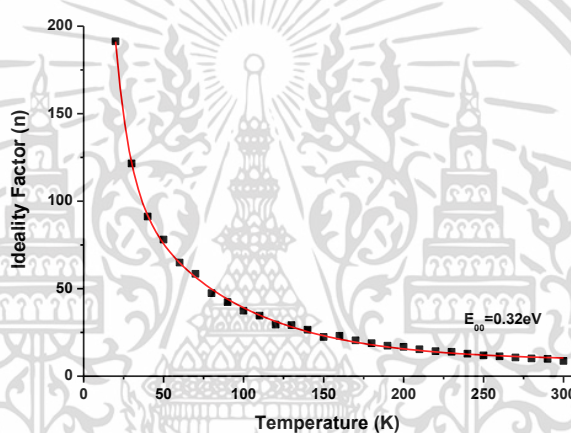
การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตกและค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มियोอนิกอิมิสชัน ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสตรงพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตกเข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสตรงให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง กลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลง และในทางกลับกันกลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.88 ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตกจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชันน้อยลง

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.89 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้น มีสาเหตุมาจากการที่ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิมี่ค่าลดลง จึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze-out-carrier) การที่จะทำให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ p^+-n ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

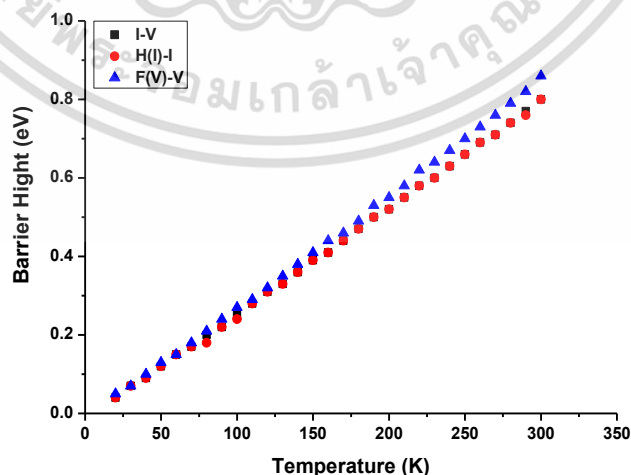
รูปที่ 4.90 แสดงกราฟอาร์เรเนียส ทำให้ทราบค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชัน ซึ่งมีค่าประมาณ 5.42 อิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแพกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ของรอยต่ออวิวิรพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

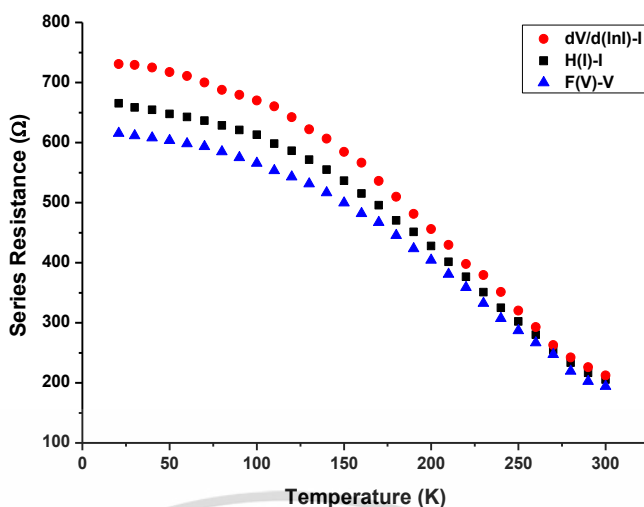


รูปที่ 4.87 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแพกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ ของรอยต่ออวิวิรพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

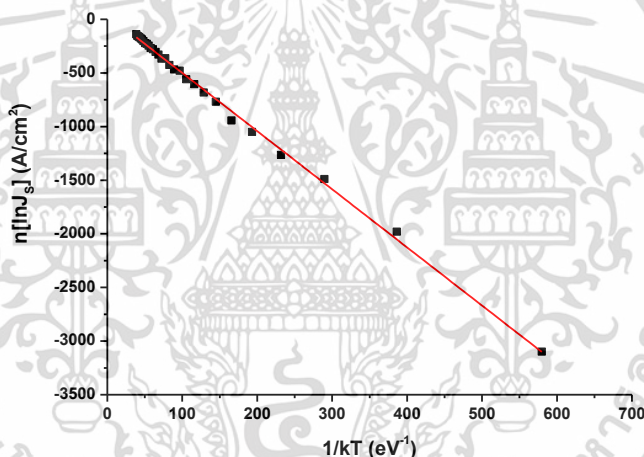


รูปที่ 4.88 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่ออวิวิรพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.89 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

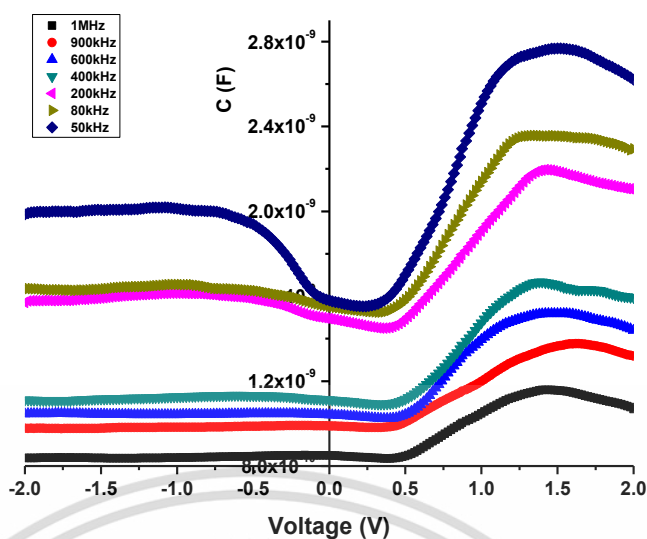


รูปที่ 4.90 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

4.2.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO

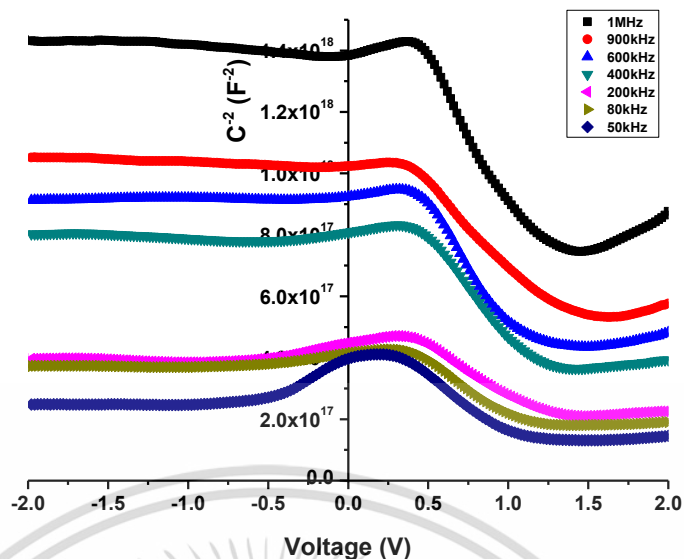
จากการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$ โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -2 ถึง 2 โวลต์ ที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.91 พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น และสำหรับกรณีการไบแอสตรง ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลงเนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อ พี-เอ็น นั้นหายไปชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

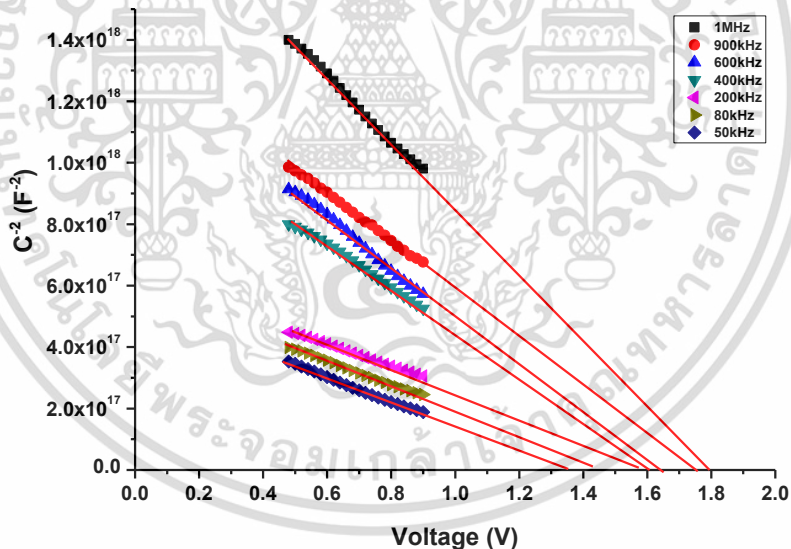


รูปที่ 4.91 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.91 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.92 และรูปที่ 4.93 แสดงส่วนที่เป็นเส้นตรงที่สอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ที่ (4.25) จะสามารถคำนวณหาศักย์ตกคร่อม (V_{bi}) ได้จากจุดตัดแกน x จากส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงแรงดันไบแอส 0.5 ถึงช่วง 0.9 โวลต์ โดยประมาณ และหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_D) ได้จากความชันของกราฟ โดยที่ ϵ_r คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.20 จากผลการคำนวณจะได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าเท่ากับ 1.34 โวลต์ ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากการศึกษาสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเช่นกัน และมีความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เท่ากับ 1.33×10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.92 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

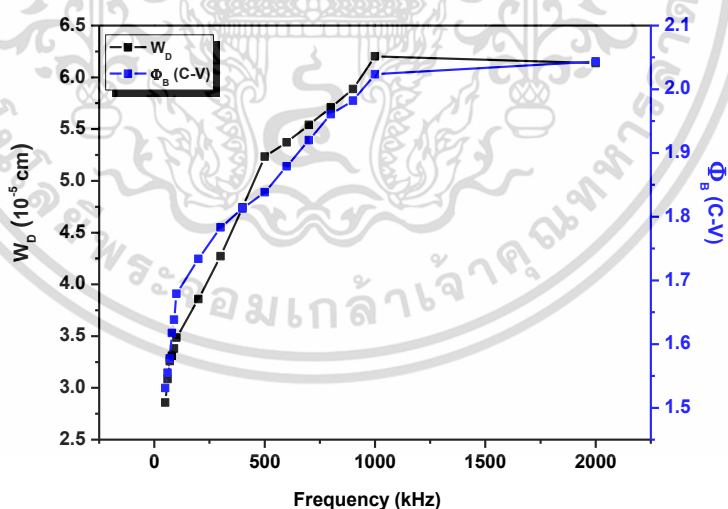


รูปที่ 4.93 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

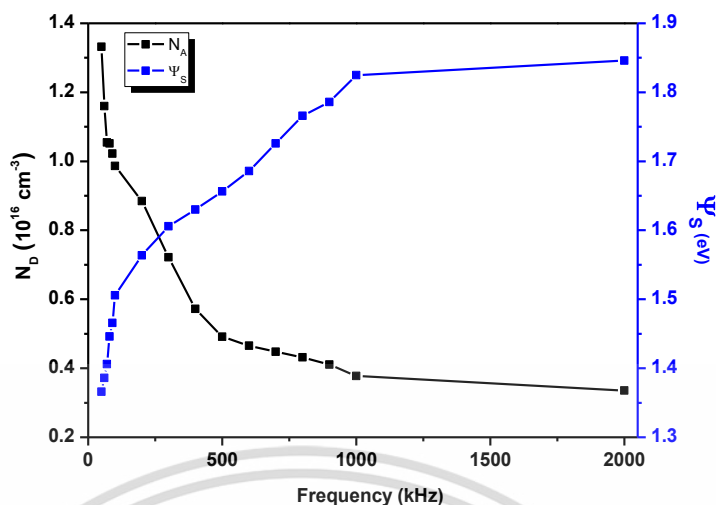
ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

Frequency (kHz)	V_i (V)	N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	Φ_B (C-V) (eV)	W_D (cm)	Ψ_s (eV)
50	1.34	1.33×10^{16}	0.1672	1.89×10^{-3}	1.5311	2.86×10^{-5}	1.3659
60	1.36	1.16×10^{16}	0.1707	1.78×10^{-3}	1.5548	3.09×10^{-5}	1.3859
70	1.38	1.05×10^{16}	0.1732	1.71×10^{-3}	1.5774	3.26×10^{-5}	1.4059
80	1.42	1.05×10^{16}	0.1733	1.73×10^{-3}	1.6174	3.31×10^{-5}	1.4459
90	1.44	1.02×10^{16}	0.1740	1.72×10^{-3}	1.6381	3.38×10^{-5}	1.4659
100	1.48	9.87×10^{15}	0.1749	1.71×10^{-3}	1.6791	3.49×10^{-5}	1.5059
200	1.58	8.85×10^{15}	0.1777	1.68×10^{-3}	1.7819	3.80×10^{-5}	1.6059
300	1.58	8.45×10^{15}	0.1789	1.64×10^{-3}	1.7832	3.89×10^{-5}	1.6059
400	1.6	5.89×10^{15}	0.1882	1.38×10^{-3}	1.8127	4.69×10^{-5}	1.6259
500	1.62	4.79×10^{15}	0.1936	1.25×10^{-3}	1.8383	5.23×10^{-5}	1.6459
600	1.66	4.66×10^{15}	0.1943	1.25×10^{-3}	1.8790	5.37×10^{-5}	1.6859
700	1.7	4.48×10^{15}	0.1953	1.24×10^{-3}	1.9200	5.54×10^{-5}	1.7259
800	1.74	4.31×10^{15}	0.1963	1.23×10^{-3}	1.9610	5.71×10^{-5}	1.7659
900	1.76	4.11×10^{15}	0.1976	1.20×10^{-3}	1.9823	5.89×10^{-5}	1.7859
1000	1.8	3.78×10^{15}	0.1998	1.17×10^{-3}	2.0236	6.20×10^{-5}	1.8250
2000	1.82	3.90×10^{15}	0.1989	1.19×10^{-3}	2.0436	6.14×10^{-5}	1.8459



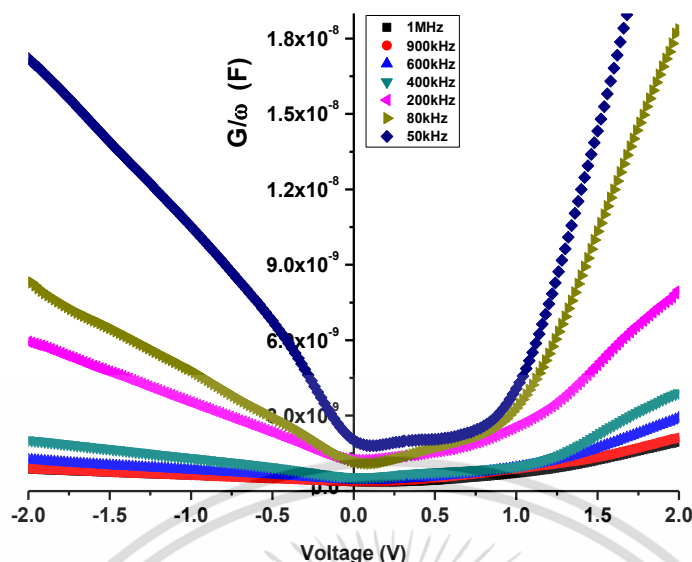
รูปที่ 4.94 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า W_D และ Φ_B กับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของ ไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.95 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_D และ ψ_s กับความถี่ ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ ไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ ไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$ โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -2 ถึง 2 โวลต์ ที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.96 ซึ่งได้ทำการเขียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G/ω กับแรงดันไฟฟ้า ที่ได้มาจากการนำค่าความจุไฟฟ้ามาหารด้วยความถี่เชิงมุมที่ป้อนเข้าไปโดยมีค่าเท่ากับ $\omega = 2\pi f$ และพบว่ากราฟทุกช่วงความถี่มีลักษณะเป็น กราฟระฆังหงาย แสดงให้เห็นถึงขณะที่ทำการไบแอสตรง รอยต่ออวิวิธพันธุ์จะสามารถนำกระแสได้ดี ขึ้น ความนำไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรจะลดลง ในขณะที่มีการ ไบแอสกลับทางกระแสอิมิตัวย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสกลับทางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แล้วค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรจะมีค่าลดลงไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.98



รูปที่ 4.96 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

สำหรับการหาค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state density, D_{it}) สามารถหาได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V) และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (G-V) ที่ความถี่ต่างๆ แต่เนื่องจากมีผลของความต้านทานอนุกรม (R_s) มาเกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ดังสมการ

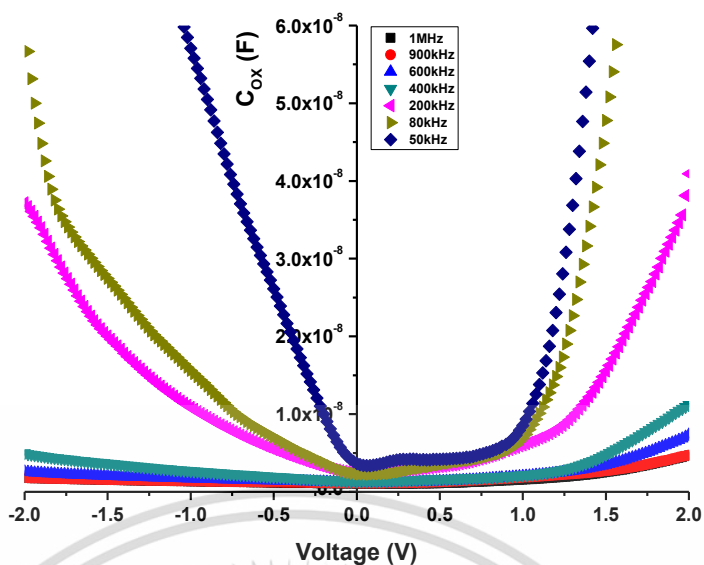
$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.46)$$

ค่าความจุของชั้นบางๆของชั้นออกไซด์ ที่ได้แก่ผลของ R_s แล้วจะเป็นดังนี้

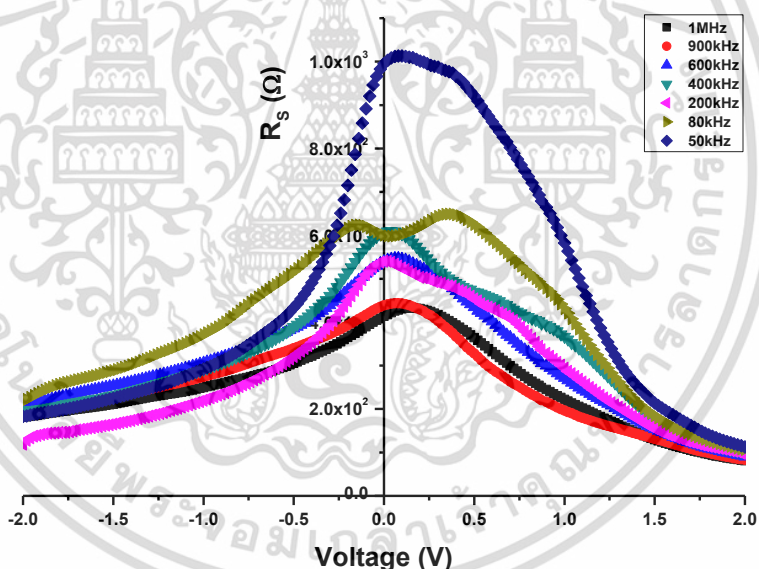
$$C_{ox} = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.47)$$

พิจารณาค่าสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) ที่แรงดันไบแอสตรงเท่ากับ 1.50 โวลต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่แรงดันไบแอสนี้จะก่อให้เกิดเงื่อนไขสะสมนุพหุพาหะ (accumulation condition) ของรอยต่อแบบ MIS สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\left(\frac{G_m}{\omega} \right)}{\left(\frac{G_m}{\omega} \right)^2 \left(\frac{1}{C_{ox}^2} \right) + \left(1 - \left(\frac{C_m}{C_{ox}} \right) \right)^2} \right] \quad (4.48)$$



รูปที่ 4.97 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ox} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

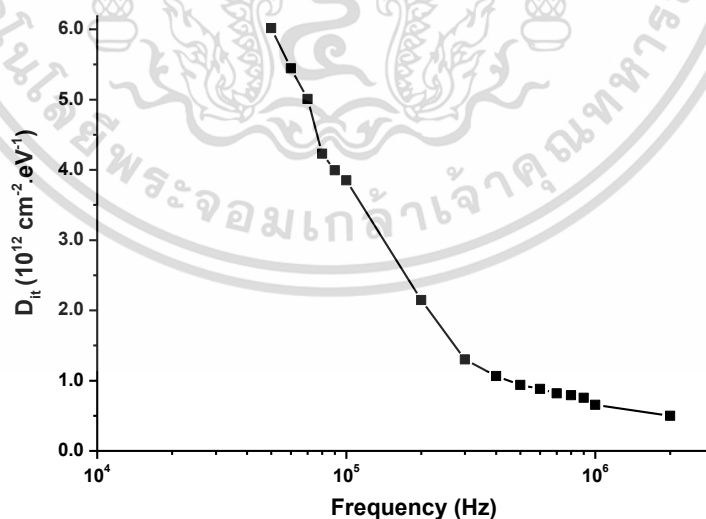


รูปที่ 4.98 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความหนาแน่นของกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.99 นอกจากนี้ในตารางดังกล่าวยังแสดงค่าของความจุไฟฟ้า ค่า G/ω และค่า C_{ox} สูงสุด ซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากการตอบสนองของความถี่ของสถานะผิวเชื่อมต่อ กล่าวคือเมื่อมีความถี่ที่เหมาะสมจะส่งผลให้สถานะกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนองโดยการจับและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด ดังนั้นความหนาแน่นของกักที่ประจุจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงสุด G/ω ที่แรงดันไฟฟ้า 1.5 โวลต์ ความจุไฟฟ้าสูงสุด (C_m) ความจุไฟฟ้าบริเวณชั้นออกไซด์ (C_{ox}) และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

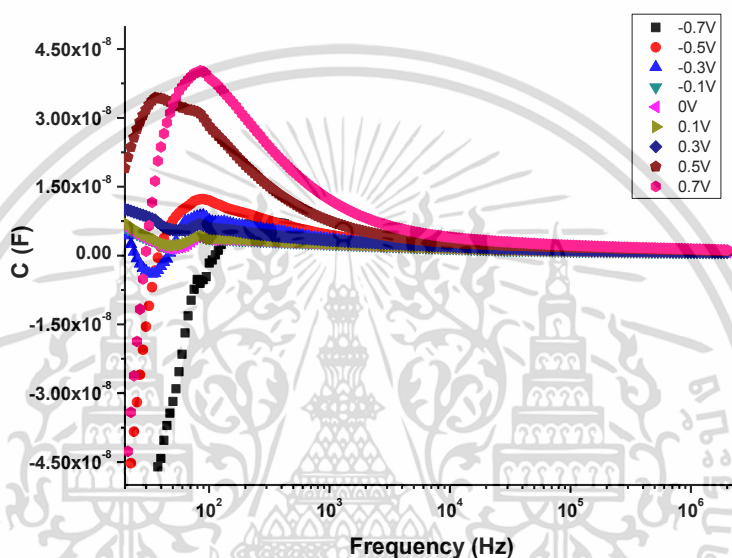
Frequency (kHz)	G_m/ω (V=1.5V) (nF)	C_m (nF)	C_{ox} (nF)	D_{it} ($\times 10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)
50	14.42	2.77	78.00	6.02
60	13.05	2.51	70.44	5.44
70	12.00	2.40	62.56	5.01
80	10.13	2.36	45.90	4.23
90	8.35	2.33	32.28	3.99
100	9.22	2.19	41.05	3.85
200	5.08	1.88	15.58	2.15
300	2.91	1.74	6.60	1.30
400	2.24	1.65	4.71	1.07
500	1.84	1.60	3.72	0.94
600	1.70	1.52	3.41	0.88
700	4.04	1.43	2.90	0.82
800	1.39	1.44	2.79	0.79
900	1.34	1.37	2.68	0.75
1000	1.22	1.15	2.45	0.65
2000	0.86	1.37	1.91	0.49



รูปที่ 4.99 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง D_{it} กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

4.2.4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ วิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการจ่ายค่าแรงดันไบแอสด้วยค่าต่างๆ ตั้งแต่ -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ จากผลการทดลองสามารถแบ่งช่วงความถี่ได้ 2 ช่วง ได้แก่ช่วงความถี่ต่ำ (ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์) พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีขนาดของประจุเป็นลบ เมื่อจ่ายค่าแรงดันไบแอสตรงและไบแอสกลับทางที่มีปริมาณสูงให้กับรอยต่อวิวิธพันธ์ของ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ และช่วงความถี่สูง (ที่ความถี่มากกว่า 100 เฮิรตซ์) ค่าของความจุไฟฟ้าจะลดลงและคงที่เข้าใกล้ศูนย์ ดังรูปที่ 4.100



รูปที่ 4.100 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

พฤติกรรมกรจับและคายประจุของตัวเก็บประจุบริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปตามสมการ [58]

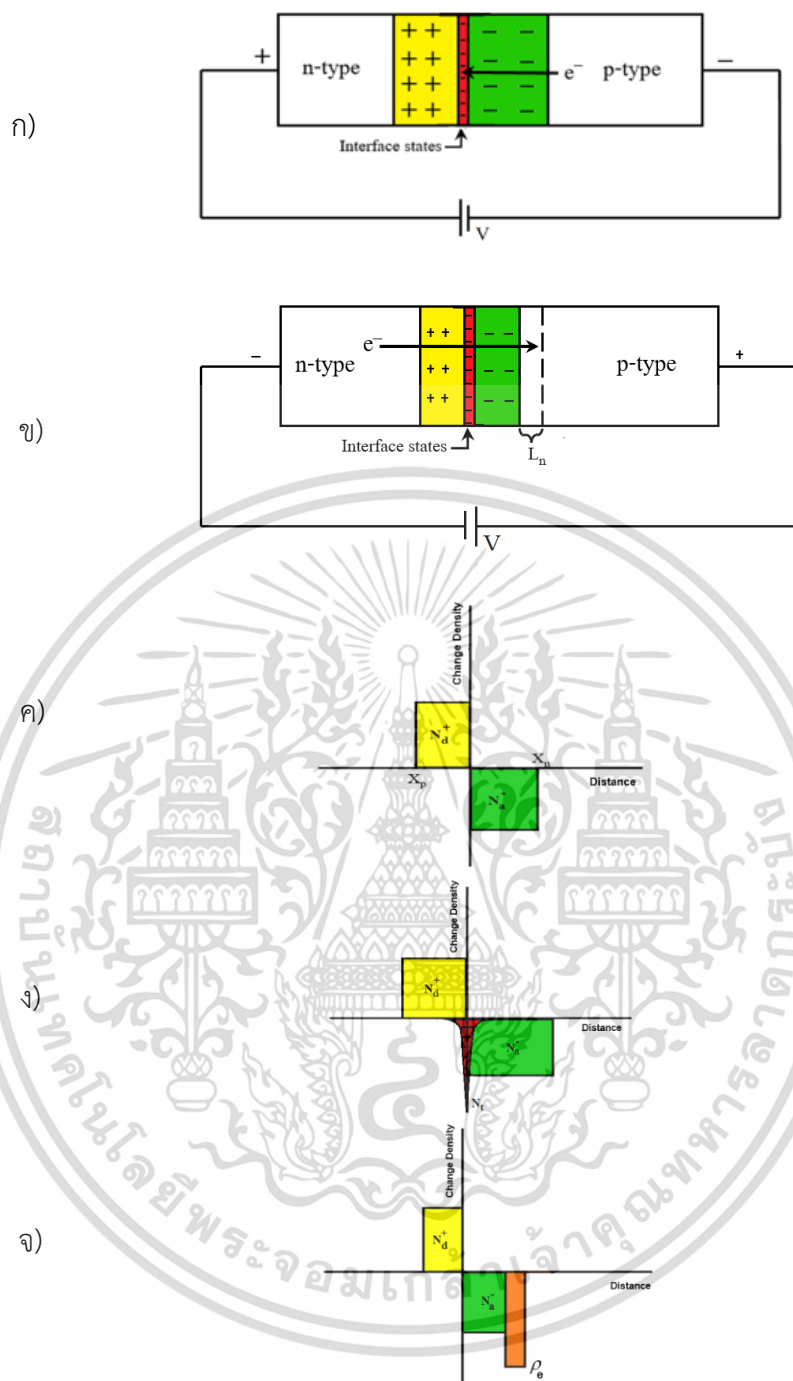
$$C(\omega) = C_0 - \frac{\Delta G_1 \tau - \Delta C_1}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (4.49)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อเมื่อไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อ

ΔC_1 คือ ความจุไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า กระแสสลับ

ΔG_1 คือ ความนำไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า กระแสสลับ

τ คือ เวลาคงที่ของกัปดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อ



รูปที่ 4.101 แสดงแผนภาพกลไกการเกิดค่าความจุไฟฟ้าเป็นลบของรอยต่อวิวิธพันธุ์

$\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

ก) แผนภาพภายใต้การไบแอสกลับทางปริมาณสูง

ข) แผนภาพภายใต้การไบแอสตรงปริมาณสูง

ค) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ขณะไม่มีการไบแอส

ง) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ภายใต้การไบแอสกลับทางปริมาณสูง

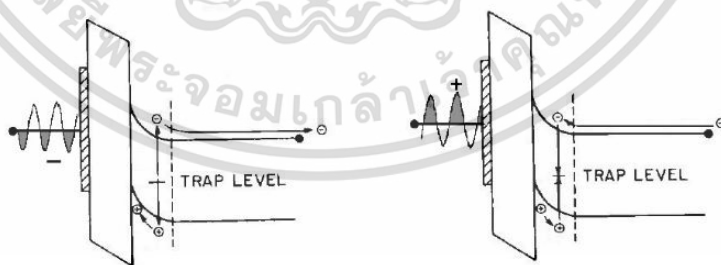
จ) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ภายใต้การไบแอสตรงปริมาณสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

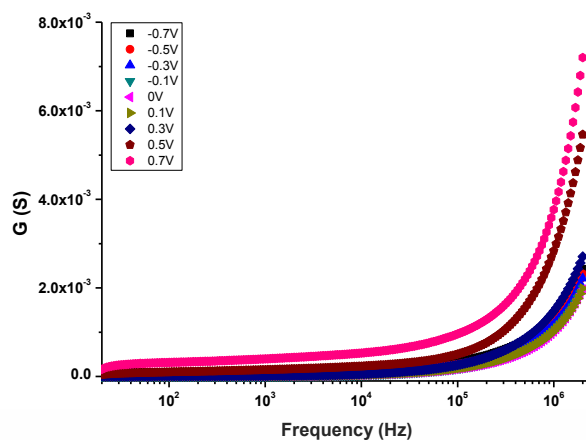
กรณีเมื่อยังไม่มีกระแส (รูปที่ 4.101ค) ปริมาณของประจุบวก (N_d^+) มีค่าเท่ากับปริมาณของประจุลบ (N_a^-) สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางจาก N_d^+ ไปยัง N_a^- แต่เมื่อทำการไบแอสกลับทางปริมาณสูง พลังงานศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟจะไปเสริมกับสนามไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ ส่งผลให้บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อกว้างขึ้น และมีการฉีดอิเล็กตรอนจากเนื้อสารชนิดพี (p-type) เข้าไปในสถานะผิวเชื่อมต่อ ส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า $N_t + N_a^- > N_d^+$ นั่นคือปริมาณของประจุลบ มีค่ามากกว่าปริมาณของประจุบวก ทำให้ความจุไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ที่วัดได้มีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 4.101ก) และรูปที่ 4.101ง)

กรณีเมื่อทำการไบแอสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ พลังงานศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะไปหักล้างกับสนามไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ ส่งผลให้บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อแคบลง และมีการฉีดอิเล็กตรอนจากเนื้อสารชนิดเอ็น (n-type) ข้ามรอยต่อไปยังระยะแพร่ซึมของอิเล็กตรอน (diffusion length, L_n) ของเนื้อสารชนิดพี จากนั้นความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า $N_a^- + p_e > N_d^+$ เมื่อ p_e คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระที่ปรากฏในระยะแพร่ซึม L_n นั่นคือปริมาณของประจุลบมีค่ามากกว่าปริมาณของประจุบวก ทำให้ความจุไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ที่วัดได้มีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 4.101ข) และ จ)

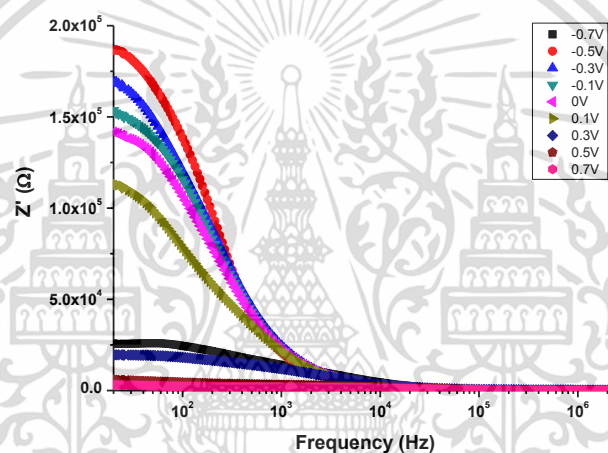
รูปที่ 4.102 แสดงพฤติกรรมกรับและคายประจุของตัวเก็บประจุบริเวณผิวเชื่อมต่อ โดยทั่วไป คือ เมื่อมีสัญญาณไฟลบบที่มีค่าความถี่ต่ำเข้ามาสู่รอยต่อแบบ MIS อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกับดักจะถูกเหนี่ยวนำให้หลุดออกจากกับดักแล้วเคลื่อนที่ไปยังบริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะ และจะเหนี่ยวนำให้โฮลมาชุมนุมกันที่บริเวณรอยต่อของชั้นออกไซด์และสารกึ่งตัวนำ และเมื่อได้รับสัญญาณไฟบวกเข้ามาอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะจะถูกดึงเข้ามาอยู่กับกับดักประจุในบริเวณพร่องพาหะ ส่วนโฮลที่บริเวณรอยต่อของชั้นออกไซด์และสารกึ่งตัวนำจะถูกผลักกลับไปสู่กับดักเช่นเดิม โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ไปมาอยู่เสมอ เมื่อมีการจ่ายสัญญาณไฟสลับที่มีค่าความถี่ต่ำให้กับรอยต่อ [16]



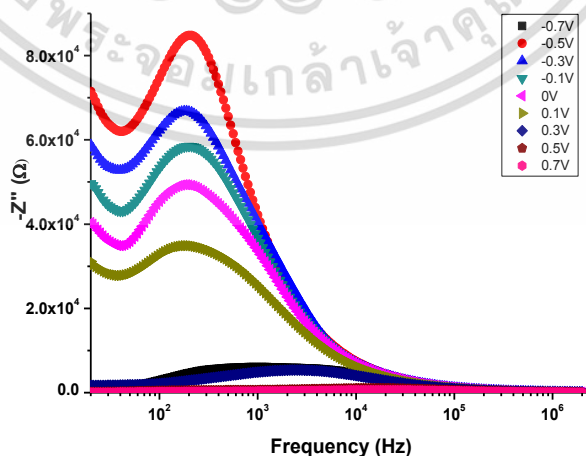
รูปที่ 4.102 แสดงการจับและคายประจุของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ



รูปที่ 4.103 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

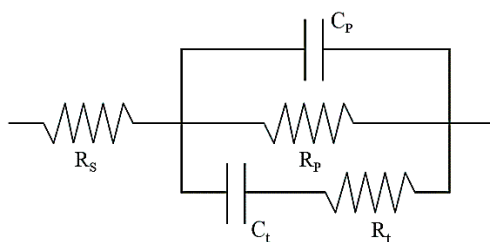


รูปที่ 4.104 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

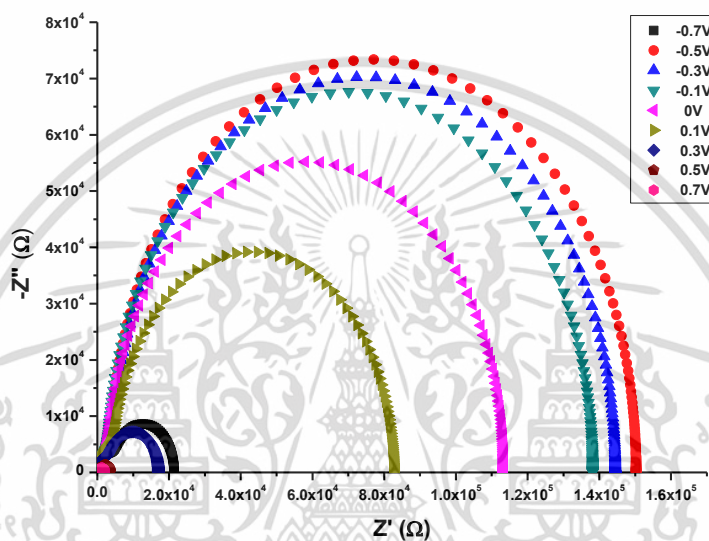


รูปที่ 4.105 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับภาควิชาฟิสิกส์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



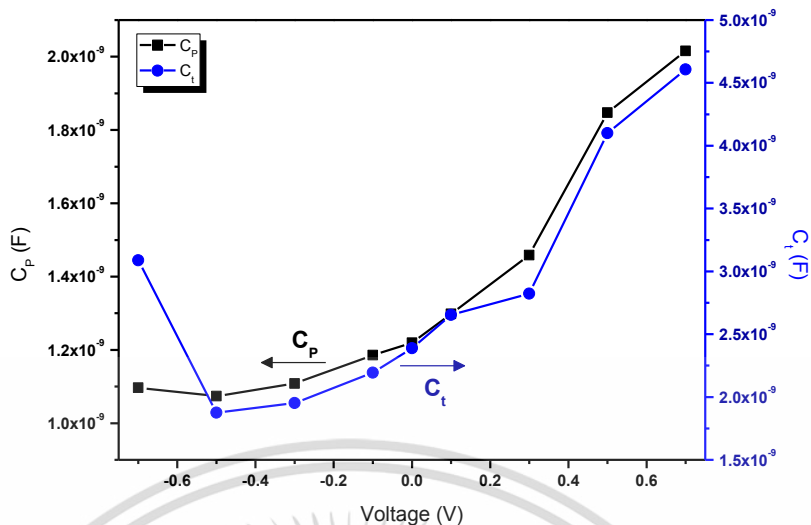
รูปที่ 4.106 แสดงวงจรสมมูลสำหรับใช้จำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของรอยต่อวรีวิธ พันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$



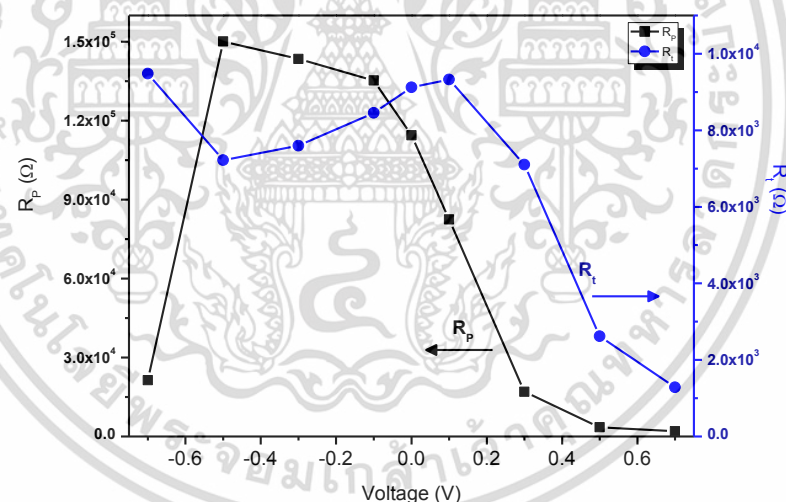
รูปที่ 4.107 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวรีวิธ พันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

ตารางที่ 4.18 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวรีวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

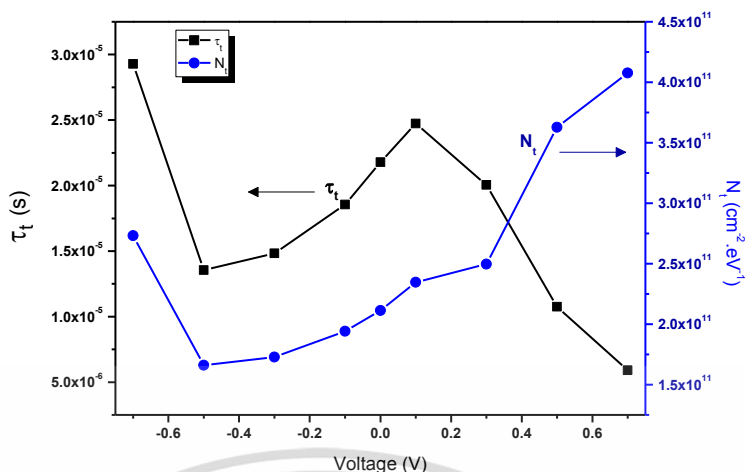
Bias Voltage (V)	R_s (Ω)	R_p (k Ω)	R_t (k Ω)	C_p (nF)	$\tau_p = R_p C_p$	C_t (nF)	$\tau_t = R_t C_t$	N_t (cm $^{-2}$ ·eV $^{-1}$)
-0.7	47.99	21.37	9.48	1.10	2.34×10^{-5}	3.09	2.93×10^{-5}	2.73×10^{11}
-0.5	46.12	150.25	8.45	1.19	1.78×10^{-4}	2.19	1.86×10^{-5}	1.94×10^{11}
-0.3	46.74	144.44	9.12	1.22	1.76×10^{-4}	2.39	2.18×10^{-5}	2.11×10^{11}
-0.1	44.03	138.13	7.21	1.07	1.48×10^{-4}	1.88	1.35×10^{-5}	1.66×10^{11}
0	45.21	113.44	7.60	1.11	1.26×10^{-4}	1.95	1.48×10^{-5}	1.73×10^{11}
0.1	46.84	82.43	9.32	1.30	1.07×10^{-4}	2.65	2.47×10^{-5}	2.35×10^{11}
0.3	46.30	16.98	7.11	1.46	2.48×10^{-5}	2.82	2.01×10^{-5}	2.50×10^{11}
0.5	35.72	3.50	2.62	1.85	6.47×10^{-6}	3.10	8.13×10^{-6}	2.74×10^{11}
0.7	29.98	2.01	1.28	2.02	4.05×10^{-6}	4.61	5.91×10^{-6}	4.08×10^{11}



รูปที่ 4.108 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะ (C_D) และค่าความจุของกัณฑ์พาหะ (C_t) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$



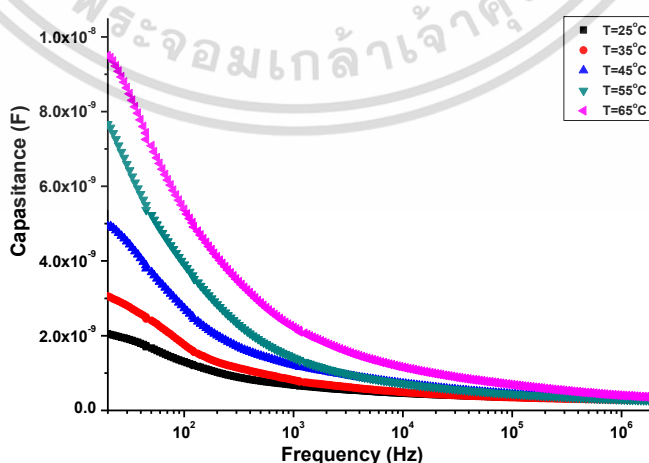
รูปที่ 4.109 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้น (R_p) และค่าความต้านทานกัณฑ์พาหะ (R_t) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$



รูปที่ 4.110 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกักพาหะ (N_t) และค่าคงตัวของเวลา (τ_t) เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

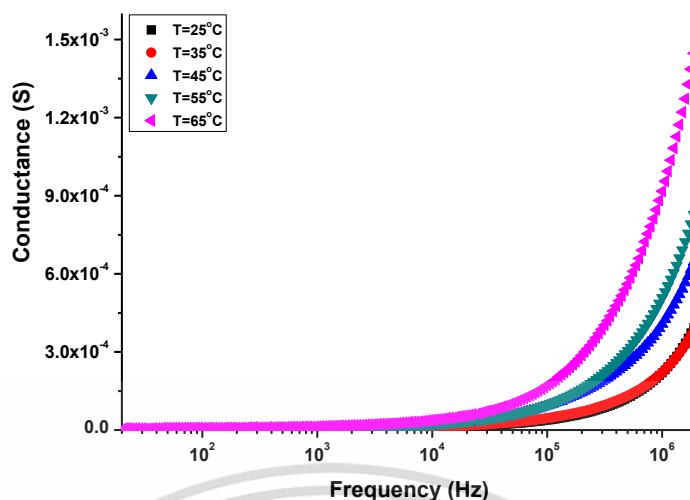
4.2.4.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 65 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.107 และรูปที่ 4.108 ตามลำดับ ในกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิสูงพบว่า ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น และค่าความจุไฟฟ้านี้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย ส่วนความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิสูง พบว่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และค่าความนำไฟฟ้านี้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.111 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

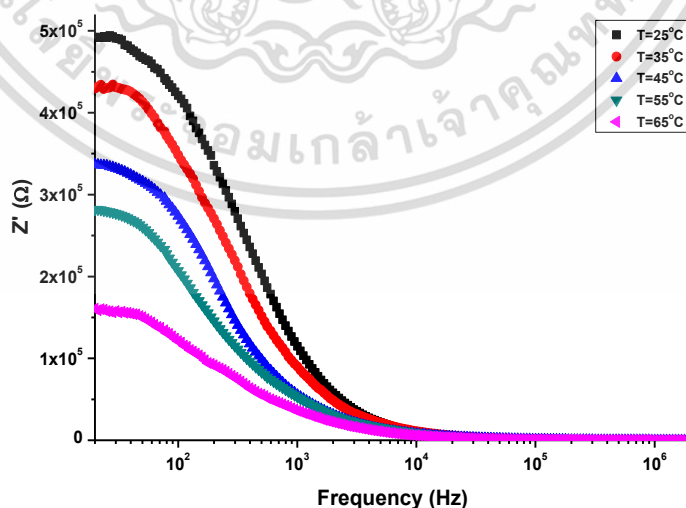
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.112 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออิมิตชันของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

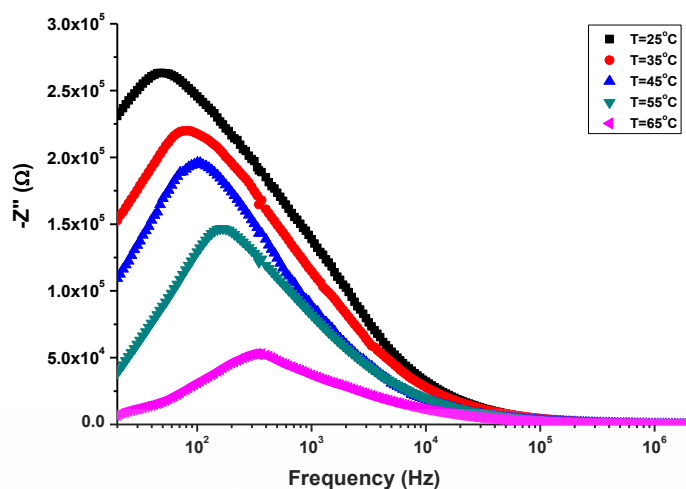
จากนั้นได้ทำการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ที่ทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 65 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.109 โดยรูปดังกล่าวได้แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนจริงของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยในช่วงความถี่ต่ำๆ จะเป็นช่วงที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และในจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์นั้น จะไม่สามารถพบจุดสูงสุดของค่าจินตภาพได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นเพียงส่วนที่เป็นกราฟทางลดลงเท่านั้น

เมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ แล้วจะเขียนได้เพียงส่วนหนึ่งของกราฟครึ่งวงกลมเท่านั้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.110 จึงมีความจำเป็นในการจำลองค่าของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจากผลการทดลองที่ได้เพื่อนำไปหาค่าตัวแปรสำคัญต่างๆ ที่จำเป็นต่อการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

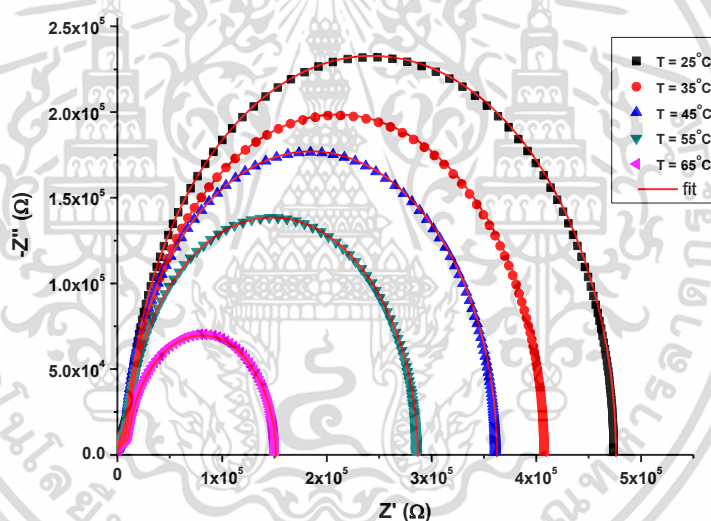


รูปที่ 4.113 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออิมิตชันของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.114 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

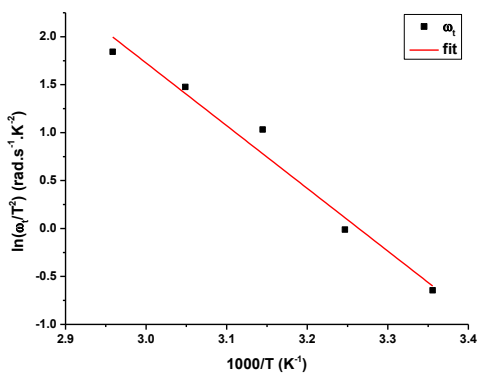


รูปที่ 4.115 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

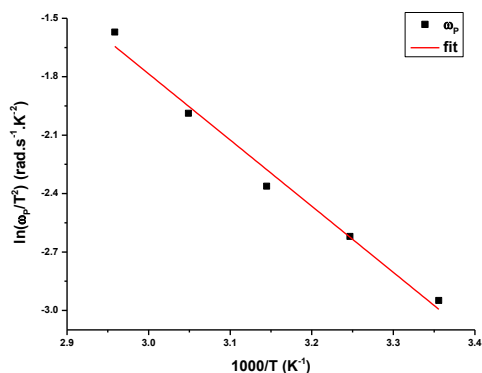
ตารางที่ 4.19 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

Temperature (°C)	R_s (Ω)	R_p (k Ω)	R_t (k Ω)	C_p (F)	$\tau_p = R_p C_p$	C_t (F)	$\tau_t = R_p C_p$	N_t ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)
25	52.07	474	42.09	45.3	2.15×10^{-4}	50.9	2.14×10^{-5}	4.51×10^{10}
35	53.88	407	31.72	35.5	1.45×10^{-4}	33.6	1.07×10^{-5}	2.97×10^{10}
45	87.95	361	15.38	29.1	1.05×10^{-4}	22.9	3.52×10^{-6}	2.03×10^{10}
55	114.12	236	19.87	28.8	6.79×10^{-5}	10.7	2.12×10^{-6}	9.44×10^{10}
65	123.10	152	18.75	27.8	4.21×10^{-5}	7.39	1.39×10^{-6}	6.54×10^{11}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.116 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\omega_0/T^2)$ และ $\ln(\omega_p/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา τ_i และ τ_p ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนตามลำดับ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-65 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

ก. ได้จากการหา ω_0 ในสถานะผิวเชื่อมต่อ
ข. ได้จากการหา ω_p ในบริเวณพร่องพาหะ

การหาค่าพลังงานกระตุ้น จากรูปที่ 4.116 สามารถใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ตามสมการที่เคยเสนอไปในหัวข้อที่แล้ว (หัวข้อที่ 4.7.1.5) และเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการต่างๆ มาสรุป แสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความถี่ค่าทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการหา ω_0 และ ω_p ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}/\text{CuO}$

Method	Conditions	T (°C)	ω_0 (rad/s)	E_a (eV)	ζ_0 (s ⁻¹ K ⁻¹)	σ_i (cm ⁻²)
Z' - Z''	Junction	25	4.66x10 ⁴	0.293	4.51x10 ³	1.49x10 ⁻²⁴
		35	9.38x10 ⁴			
		45	2.84x10 ⁵			
		55	4.71x10 ⁵			
		65	7.22 x10 ⁵			
	Trap	25	4.65x10 ³	0.564	8.41x10 ⁴	3.69x10 ⁻²²
		35	6.91x10 ³			
		45	9.53x10 ³			
		55	1.47x10 ⁴			
		65	2.37x10 ⁴			

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบางแต่ละชนิดลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และการประดิษฐ์ไดโอดของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ CdS/CuO และ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการทำกรวิจัยขั้นต่อไป

5.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง พบว่ามีลักษณะโปร่งแสง สีเทาดำ นำไปเคลือบลงบนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมีบนชั้นดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน มีลักษณะสีเหลืองเข้ม มันเงายึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี สังเกตเห็นได้ว่ามีฟิล์มบางซ้อนทับกันอยู่สองชั้น สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ CdS/CuO/FTO

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเป็นเฟสสมระหว่างโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ที่ได้จาก CdS ตรงกับระนาบผลึก (111) และโมนอคลินิกที่ได้จาก CuO ที่ตรงกับระนาบผลึก (022) และ (111)

จากการถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มบาง CuO ที่เคลือบอยู่บนฟิล์มบาง CdS/FTO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่า เกรนมีรูปร่างแตกต่างกัน มีรูปทรงไม่แน่นอน จับกันเป็นกลุ่มก้อนและไม่มีรอยแยกที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม

การศึกษา FTIR สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO พบเลขคลื่นที่สำคัญ ได้แก่ 759 และ 887 เนื่องจากเลขคลื่นนี้สอดคล้องกับพลังงานของการสั่นของพันธะระหว่าง Cd-S และ C-O ที่อยู่ในฟิล์มบาง

การศึกษา XPS สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO พบธาตุที่สำคัญ ได้แก่ Cd และ Cu ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 933.88 และ 405.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ นอกจากนี้สามารถนำค่าพลังงานยึดเหนี่ยวไปคำนวณหาความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์ได้ ซึ่งมีค่า 0.42 อิเล็กตรอนโวลต์

การศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 600 นาโนเมตร เมื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าเท่ากับ 2.30 อิเล็กตรอนโวลต์

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 ถึง 1 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีสมบัติเฉพาะของไดโอดทั่วไป มีค่าแรงดันขีดเริ่มอยู่ที่ 0.5 โวลต์ จากการหาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง CdS/CuO เป็นแบบรอยต่อ p^+ - n รวมไปถึงการคำนวณพารามิเตอร์ของไดโอดที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงของกำแพงศักย์ แพกเตอร์อุดมคติ และความต้านทานอนุกรม ที่อาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง และพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิลดลง ค่าแพกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์และค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าลดลง เมื่อทำการคำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการขุดโม่่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) มีค่าเท่ากับ 0.95 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับค่าแรงดันไฟฟ้า สามารถนำไปคำนวณหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ โดยที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.50 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 6.70×10^{17} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความถี่เฉพาะของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะเลื่อนออกไปทางความถี่ที่สูงขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.18 อิเล็กตรอนโวลต์

การศึกษามิพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของมิพีแดนซ์เชิงซ้อนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่ามิพีแดนซ์สูงสุดจะเลื่อนไปในทางความถี่ที่สูงขึ้น เมื่อนำไปพิตกราฟมิพีแดนซ์ด้วยวงจรสมมูล RC ที่มีค่าความจุไฟฟ้าของกับดักพาหะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ การแทนที่ความจุ (C) ด้วย CPE จะมีความเหมาะสมและพิตกราฟง่ายกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า CPE_1 เป็นของบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ และสำหรับ CPE_t เป็นของกับดักพาหะที่ปรากฏอยู่ในชั้นออกไซด์ต่างๆ

5.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี และฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง พบว่ามีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม นำไปเคลือบลงบนฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมีบนชั้นดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน มีลักษณะสีเหลืองอ่อน มันเงายึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี สังเกตเห็นได้ว่ามีฟิล์มบางซ้อนทับกันอยู่สองชั้น สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ ตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ และพีคการเลี้ยวเบนของระนาบผลึกแบบโมโนคลินิกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ปรากฏขึ้นพร้อมกัน

การศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 300 นาโนเมตร เมื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าเท่ากับ 2.90 อิเล็กตรอนโวลต์

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีสมบัติเฉพาะของไดโอดทั่วไป มีค่าแรงดันขั้วเริ่มอยู่ที่ 1.20 โวลต์ จากการหาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง ตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ เป็นแบบรอยต่อ p^+-n รวมไปถึงการคำนวณพารามิเตอร์ของไดโอดที่สำคัญ ได้แก่ ความสูงของกำแพงศักย์ แพกเตอร์อุดมคติ และความต้านทานอนุกรม ที่อาศัยทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าลดลงตามอุณหภูมิลดลง และพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิลดลง ค่าแพกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์และค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าลดลง เมื่อทำการคำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) มีค่าเท่ากับ 0.32 อิเล็กตรอนโวลต์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับค่าแรงดันไฟฟ้า สามารถนำไปคำนวณหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ โดยที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.34 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 1.33×10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 65 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความถี่เฉพาะของกัปดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ จะเลื่อนออกไปทางความถี่ที่สูงขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.151 อิเล็กตรอนโวลต์ และพารามิเตอร์ของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกัปดักประจุเท่ากับ 0.672 ต่อวินาทีต่อเคลวินยกกำลังสอง และพื้นที่ของศูนย์กลางการจับพาหะมีค่าเท่ากับ 8.70×10^{-27} ตารางเซนติเมตร

การศึกษามิพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 65 องศาเซลเซียส พบว่าค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของมิพีแดนซ์เชิงซ้อนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่ามิพีแดนซ์สูงสุดจะเลื่อนไปในทางความถี่ที่สูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S/CuO$ ด้วยวิธีอบสารละลายเคมีและวิธีรีแอคทีฟซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนี้ พบว่าสิ่งที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดี จำเป็นต้องควบคุมความสะอาด เลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม และควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ให้คงที่ตลอดการทดลอง จำเป็นต้องมีสมาธิอย่างต่อเนื่องในการทำงาน การเข้าใจทฤษฎีพื้นฐานมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ และการสรุปผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Moller H.J. **Semiconductors for Solar Cells**. Boston : Artech House. 1993.
- [2] Bosio A., Rome N., Mazzamuto S. and Canevari V. “Polycrystalline CdTe Thin Films for Photovoltaic Applications” **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**. vol. 2006. pp. 247-279.
- [3] Ghosh, B. Ghosh, D. Hussain, S. Chakraborty, B.R. Dalai, M.K. Sehgal, G. Bhar, R. and Pal, A.K. 2013. “Utilization of Residual CdCl₂ in CBD-CdS to Realize Grain Growth in CdTe: A Novel route.” *Mater. Res. Bull.* 48 : 4711-4717.
- [4] Zyoud, A. Saadedin, I. Khudruj, S. Hawash, Z.M. Park, D. Campet, G. and Hilal, S.H. 2013. “CdS/FTO Thin Film Electrodes Deposited by Chemical Bath Deposition and by Electrochemical Deposition: A Comparative Assessment of Photo-Electrochemical Characteristics.” *Solid State Sci.* 18 : 83-90.
- [5] Ersin, Y. and Osman, Ş. 2016. “Effect of pH on The Structural, Optical and Nanomechanical Properties of CdS Thin Films Grown by Chemical Bath Deposition.” *Ceram. Int.* 46 : 6399-6407.
- [6] Yang, L. Hailiang, D. Husheng, J. Bingshe, X. Chunyan, Y. and Zhuxia, Z. 2015. “CdS Nanowires Decorated with Cu₂O Nanospheres: Synthesis, Formation Process and Enhanced Photoactivith and Stability” *J. Alloy. Compd.* 644 : 159-164.
- [7] Sathishkumar, R. Devakirubai, E. Dduke John David, A. Tamilsalvan, S. and Nithyanantham, S. 2016. “Structural and Optical Studies of Cadmium Sulfide (CdS) Thin Film by Chemical Bath Deposition (CBD).” *Mater. Focus.* 5 : 1-6.
- [8] Sanap, V.B. and Pawar, B.H. 2011. “Study of Chemical Bath Deposited Nanocrystalline CdZnS Thin Films.” *J. Optoelectron. Adv. Biomed. M.* 3(2) : 39-43.
- [9] Isah, K.U. Hariharan, N. and Oberafo, A. 2008. “Optimization of Process Parameters of Chemical Bath Deposition of Cd_{1-x}Zn_xS Thin Film.” *Leonardo J. Sci.* 12 : 111-120.
- [10] Minami, T. Nishi, Y. Miyata, T. and Nomoto, J.I. 2011. “High Efficiency Oxide Solar Cell with ZnO/Cu₂O Heterojunction on Thermally Oxidized Cu₂O Sheet.” *Appl. Phys. Express.* 4 : 062301.
- [11] Samarasekara, P. 2010. “Characterization of Low Cost p-Cu₂O/n-CuO Junction.” *GESJ. Physics.* 2(4) : 1-8.
- [12] Wijesundera, R. Hidaka, M. Koga, K. Choi, J.Y. and Sung, N.E. 2010. “Structure and Electronics Properties of Electrodeposited Heterojunction of CuO/Cu₂O.” *Ceramics-Silikaty.* 54(1) : 19-25.

- [13] Dandeneau, C.S. Jeon, Y.H. Shelton, C.T. Plan, T.K. Cann, D. and Gibbons, B. 2009. "Thin Films Chemical Sensors based on p-CuO/n-ZnO Heterojunctions." *Thin Solid Films*. 517 : 4448-4454.
- [14] Gao, F. Liu, X.J. Zhang, J.S. Sond, M.Z. and Li, N. 2012. "Photovoltaic Properties of the p-CuO/n-Si Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron Sputtering." *J. Appl. Phy.* 3 : 084507.
- [15] จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, อัษฎพร อริยฤทธิ์, อติศร นพรุจิกุล, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2554. "ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdZnS/CuAlO₂" วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 3 (ฉบับพิเศษที่2) มีนาคม 2554 : 12-22.
- [16] อติศร นพรุจิกุล. 2555. "สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO₂" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] Nakashima, Y. and Ichimura, M. 2012. "Electrochemical Deposition of Cu_xSn_yS_zO Thin Films and Their Application for Heterojunction Solar Cell." *Int. J. Photoenergy*. 2012 : 1-8.
- [18] วรธรรณ จำเนียรพีช. 2555. "การศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ปาฏิหาริย์ สมทน และ เมธิชา ยาวิไชย. 2559. "การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์ p-Cu₂O/n-Si" โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] Sze S.M. and Kwok K. Ng. 2007. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 3rd ed. United States of America : John Wiley & Sons.
- [21] Kittel C. 2005. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley & Son, Ins., New York.
- [22] จิตินัย แก้วแดง. 2531. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [23] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [24] Nicollian E.H. and Brews J.R. 1982. **MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology**. New York : John Wiley & Son, Ins., New York.
- [25] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2543. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์

แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [26] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง
ดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.”
รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- [27] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง
CdTe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.”
รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- [28] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS
โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของ
เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง
CuAlO₂ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] ฐิติกร จรรยาธรรม. 2550. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่เตรียม
โดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] เอกชัย วิลามาศ. 2552. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง
ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. “การศึกษาข้อสัมผัสไอโหม้มิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์”
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [33] สุรียา มีเปี่ยมสมบูรณ์. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์
เป็นขอตต์กีไดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [34] ชนินภรณ์ จุไรสง. 2559. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์ม
บางของซิงค์ซีลีไนด์กับผลึกเดี่ยวซิลิคอน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชา
ฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [35] Bugarinovic, N. et al. 2011. **Cuprous Oxide as an Active Material for Solar
Cells in Solar Cells-New Aspects and Solution.** Edited by Leonoid A.
Kosyachenko: Intech Open Science Open Minds.
- [36] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2558. “
การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์

แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธ พันธู CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- [37] Mageshwari, K. and Park J. 2016. “Photoresponse Characteristics of p-Si/n-Cu_xIn_{1-x}O Heterojunction Diode Prepared by Sol-Gel Spin Coating.” *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 46 : 46-52.
- [38] วราภรณ์ บุญเกื้อ. 2554. “สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธูของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] ดุสิต เครื่องงาม. “โซลิตสเททฟิสิกส์” พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น. 2535.
- [40] นพณัฐ เดชะคำภ. 2559. “โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xSe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [41] Gaewdang, T and Wongcharoen, Ng. 2015. “Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode.” *Adv. Mat. Res.* 1098 : 1-5.
- [42] Wongcharoen, Ng. and Gaewdang, T. 2017 “Preparation of CuO Thin Films by Thermally Oxidized Metallic Cu Films for CdS/CuO Heterojunction Diode.” *CMUJ Nat. Sci.* 16(1): 63-76.
- [43] Veal, T.D. King, P.D.C. Hatfield, S.A. Bailey, L.R. McConville, C.F. Martel, B. Moreno, J.C. Frayssinet, E. Semond, F. and Zúñiga-Pérez, J. 2008. “Valence Band Offset of the ZnO/AlN Heterojunction Determined by x-ray Photoemission Spectroscopy.” *Appl. Phys. Lett.* 93 : 202108.
- [44] Tombak, A. Benhaliliba, M. Ocak, Y.S. and Kiliçoglu, T. 2015. “The novel transparent sputtered p-type CuO thin films and Ag/p-CuO/n-Si Schottky diode applications.” *Results in Phys.* 5 : 314-321.
- [45] Muthusamy, M. and Muthukumaran, S. 2015. “Effect of Cu-doping on structural, optical and photoluminescence properties of CdS thin films.” *Optik.* 126 : 5200-5206.
- [46] Huanyan, X. Licheng, W. Ligu, J. and Kejia, W. 2017. “Combination Mechanism and Enhanced Visible-Light Photocatalytic Activity and Stability of CdS/g-C₃N₄ Heterojunctions.” *J. Mech. Sci. Technol.* 33 : 30-38.
- [47] Sahay, R. Sundaramurthy, J. Suresh Kumar, P. Thavasi, V. Mhaisalkar, S.G. and Ramakrishna, S. 2012. “Synthesis and characterization of CuO nanofibers, and investigation for its suitability as blocking layer in ZnO NPs based dye sensitized solar cell and as photocatalyst in organic dye degradation.” *J. Solid State Chem.* 186 : 261-267.

- [48] Esakkiraj, E. Sheik Abdul Kadhar, S.P. Henry, J. Mohanraj, K. Kannan, S. Barathan, S. and Sivakumar, G. 2013. "Optostructural and vibrational characteristics of Cu: CdS nanoparticles by precipitation method." *Optik*. 124 : 5229-5231.
- [49] Shadpour, M. Mohammad, D. and Elham, A. 2015. "Poly(vinyl alcohol) Chains Grafted onto the Surface of Copper Oxide Nanoparticles: Application in Synthesis and Characterization of Novel Optically Active and Thermally Stable Nanocomposites Based on Poly(amideimide) Containing N-trimellitylimido-L-valine Linkage." *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 20 : 82-97.
- [50] Yan, C. Liu, F. Song, N. Boon K, N. Stride, J.A. Tadich, A. and Hao, X. 2014. "Band alignments of different buffer layers (CdS, Zn(O,S), and In₂S₃) on Cu₂ZnSnS₄." *Appl. Phys. Lett.* 104 : 173901.
- [51] Huang, Q. Li, J. and Bi, X. 2015. "The improvement of hole transport property and optical band gap for amorphous Cu₂O films." *J. Alloy. Compd.* 647 : 585-589.
- [52] Khagendra, P.B. Hyekyoung, C. Sohee, J. Hasitha, M. and Randy J.E. 2014. "Determination of heterojunction band offsets between CdS bulk and PbS quantum dots using photoelectron spectroscopy." *Appl. Phys. Lett.* 105 : 131604.
- [53] Lisco, F. Kaminski, P.M. Abbas, A. Bass, K. Bowers, J.W. Claudio, G. Losurdo, M. and Walls, J.M. 2015. "The structural properties of CdS deposited by chemical bath deposition and pulsed direct current magnetron sputtering." *Thin Solid Films*. 582 : 323-327.
- [54] Tahir, D. and Tougaard, S. 2012. "Electronic and optical properties of Cu, CuO and Cu₂O studied by electron spectroscopy." *J. Phys.: Condens. Matter*. 24 : 175002.
- [55] Dolai, S. Dey, R. Das, S. Hussain, S. Bhar, R. and Pal, A.K. 2017. "Cupric oxide (CuO) thin films prepared by reactive d.c. magnetron sputtering technique for photovoltaic application." *J. Alloy. Compd.* 724 :456-464.
- [56] El-Samanoudy, M.M. 2003. "Modified Pool-Frenkel mechanisms in GE₂₅Bi_xSb_{15-x}S₆₀ Thin Films." *Appl. Surf. Sci.* 207 : 219-226.
- [57] Hossain, M.S. Islam, R. and Khan, K.A. 2010. "DC conduction mechanism in vanadium doped ZnTe thin films." *J. Optoelectron. Adj. M.* 12(6) : 1333-1337.
- [58] Neslihan, A.K. Orhan, Ö. Kutsal, B. Suresh, S. Jean-Paul, S. Abdallah, O. Quentin, G. Sofane, B. Kamel, M. and Abderrahim, R. 2017. "Dc and ac electrical response of MOCVD grown GaN in p-i-n structure, assessed through I-V and admittance measurement." *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 : 505109.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ CdS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.41-1049

Pattern : 41-1049		Radiation = 1.540600		Quality : High				
Cd S				2θ	I	h	k	l
Greenockite, syn / Cadmium Sulfide cadmium yellow C.I. Pigment Orange 20 C.I. Pigment Yellow 37				24.808	62	1	0	0
				26.507	91	0	0	2
				28.183	100	1	0	1
				36.621	29	1	0	2
				43.682	48	1	1	0
				47.840	50	1	0	3
				50.883	8	2	0	0
				51.825	31	1	1	2
				52.798	15	2	0	1
				54.586	5	0	0	4
				58.280	3	2	0	2
				60.841	3	1	0	4
				66.774	15	2	0	3
				69.266	5	2	1	0
				70.864	8	2	1	1
				72.384	4	1	1	4
				75.480	9	1	0	5
				77.858	2	2	0	4
				80.239	9	3	0	0
				83.254	14	2	1	3
				86.311	7	3	0	2
				91.498	8	2	0	5
				96.165	3	2	2	0
				102.271	5	2	2	2
				102.879	6	1	1	6
				104.532	2	3	0	4
				107.644	9	2	1	5
				112.340	4	1	0	7
				115.863	7	3	1	3
				118.461	3	4	0	1
				120.171	2	4	0	1
				126.295	2	2	1	6
				135.490	4	4	0	3
				141.227	4	3	2	1
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 144.47						
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 99.79						
a = 4.14092		Dx = 4.808						
c = 6.71980		Dm = 4.820						
Z = 2								
ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-780 and 6-314. COLOR : Yellow OPTICAL DATA : B=2.506, Q=2.529, Sign=+								
*J. Mater. Sci. Lett., volume 6, page 1443, (1987) primary reference : Razik, N. *Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., volume 0, page 228, (1944) optical data :								
Radiation :		Filter : Not specified						
.		d-sp : Not given						
SS/FOM : F30=329(0.0023,40)		Internal standard : Si						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ CuO
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.74-1021

Pattern : 74-1021		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated			
Cu O		2th	l	h	k	l	
Copper Oxide		32.690	7	1	1	0	
		35.610	34	0	0	2	
		35.732	88	-1	1	1	
		38.927	100	1	1	1	
		39.228	24	2	0	0	
		46.496	2	-1	1	2	
		49.061	26	-2	0	2	
		51.626	1	1	1	2	
		53.717	9	0	2	0	
		56.974	1	0	2	1	
		58.667	13	2	0	2	
		61.864	17	-1	1	3	
		66.123	12	0	2	2	
		66.744	12	-3	1	1	
		66.991	7	3	1	0	
		68.277	7	1	1	3	
		68.506	13	2	2	0	
		69.300	<1	-2	2	1	
		72.224	<1	-3	1	2	
		72.938	5	3	1	1	
		73.390	<1	2	2	2	
		75.405	4	0	0	4	
		75.698	5	-2	2	2	
		80.153	<1	0	2	3	
		80.685	2	-2	0	4	
		*80.685	2	-1	1	4	
		82.977	3	-3	1	3	
		83.583	3	2	2	2	
		84.121	<1	3	1	2	
		84.345	3	4	0	0	
		87.319	1	-2	2	3	
		*87.319	1	-4	0	2	
		88.512	<1	1	1	4	
		*88.512	<1	1	3	0	
Lattice : Monoclinic S.G. : C2/c (15) a = 4.65300 b = 3.41000 c = 5.10800 a/b = 1.36452 c/b = 1.49795		Mol. weight = 79.55 Volume [CD] = 79.94 Dx = 6.609 Z = 4 I/cor = 3.77					
ICSD COLLECTION CODE : 026715 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., Kristalgeom., Kristalphys., Kristalchem., volume 90, page 120, (1935) : Tunell, G., Posnjak, E., Ksanda, C.J.							
Radiation : CuK α Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวจรรุวรรณ มีนาง
วัน เดือน ปีเกิด	1 มิถุนายน พ.ศ. 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	34/9 หมู่ 6 ตำบล วังศาลา อำเภอ ท่าม่วง จังหวัด กาญจนบุรี 71130
ประวัติการศึกษา	2558 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.20 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.87 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ ปีการศึกษา 2560 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	“Electronic Conduction Mechanism in p-CuO/n-CdS Heterojunction Diode.” 613-624. The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 43) . Bangkok : The Science Society of thailand Under the Patronage of His Majesty the King.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้