

การศึกษาสมบัติของรอยต่ออิวิรพันธ์ของไดโอด  $CdS/CuO$

HETEROJUNCTION PROPERTIES OF  $CdS/CuO$  DIODE

วรรณภา จันนียรพีศ

WANNAPA CHUMNARPEIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของกรณีศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-031-050

การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO

HETEROJUNCTION PROPERTIES OF CdS/CuO DIODE



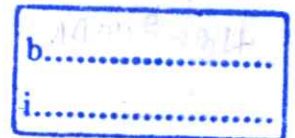
T123709

วรรณภา จำเนียรพีช

WANNAPA CHUMNEARPEUT

GW.  
123709  
0115

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....123709  
วัน, เดือน, ปี 23 11 2555



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2555

KMITL-2012-SC-M-031-050

**HETEROJUNCTION PROPERTIES OF CdS/CuO DIODE**

**WANNAPA CHUMNEARPEUT**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2012**

**KMITL-2012-SC-M-031-050**

**COPYRIGHT 2012**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO  
Heterojunction Properties of CdS/CuO Diode  
นักศึกษา นางสาววรรณภา จำเนียรพีช  
รหัสประจำตัว 53650603  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิชิต	ศิริโชติ	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูรักษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.30 – 16.30 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬาภรณ์วิทยาลัยลักษณ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัทธ์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 55

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิชนันท์ของไดโอด CdS/CuO
นักศึกษา	นางสาววรรณภา จำเริญพีช
รหัสประจำตัว	53650603
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และบนแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ FTO ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกและผิวหน้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสามารถหาได้จากการวัดสเปกตรัมของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง จากนั้นได้ทำการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิชนันท์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของ CuO ซึ่งหนา 1 mm โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส - แรงดันไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิชนันท์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ภายใต้สภาวะไบแอสตรงที่อุณหภูมิในช่วง 20 - 300 เคลวิน และทำการคำนวณหาพารามิเตอร์สำคัญได้แก่ค่าความสูงของกำแพงศักย์ แพลกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรมเป็นต้น พบว่าความสูงของกำแพงศักย์ และแพลกเตอร์อุดมคติที่คำนวณได้มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก จากการทดลองยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์จะมีค่าลดลง แต่แพลกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของพาหะอิสระของรอยต่ออวิวิชนันท์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO สามารถคำนวณได้จากการวัดความจุ - แรงดันไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน อีกทั้งยังทำการคำนวณหาความหนาแน่นของสถานะระหว่างรอยต่อของไดโอดจากการศึกษาลักษณะเฉพาะของความจุ - ความถี่ไฟสลับภายใต้สภาวะไบแอสตรงที่อุณหภูมิห้อง ความต้านทานชั้นที่และพลังงานกระตุ้นของรอยต่ออวิวิชนันท์ สามารถหาได้จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน

คำสำคัญ : ไดโอด CdS/CuO , ลักษณะเฉพาะของกระแส - แรงดันไฟฟ้า , ลักษณะเฉพาะของความจุ - แรงดันไฟฟ้า , อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี

<b>Thesis</b>	Heterojunction Properties of CdS/CuO Diode
<b>Students</b>	Miss. Wannapa Chumnearpeut
<b>Student ID</b>	53650603
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2012
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen

### **Abstract**

In this thesis, CdS thin films have been deposited on slide glass and on FTO coated – glass substrate by thermal evaporation method in vacuum. The crystal structure and surface morphology of the films were checked by XRD and SEM techniques. Energy gap values were determined from the optical transmission spectra of thin films deposited on slide glass and on FTO coated – glass substrate. CdS/CuO heterojunction diode was prepared by thermal evaporating CdS thin films on CuO 1 mm thick ceramic substrate. The forward current-voltage characteristics of CdS/CuO heterojunction were studied in a temperature range of 20-300 K. We have tried to determine some important parameters such as barrier height, ideality factor and series resistance values. The apparent barrier height and ideality factor calculated by using thermionic emission (TE) theory were found to be strong temperature dependence. Evaluation of forward I-V data reveals a decrease in the zero-bias barrier height, but an increase in the ideality factor with decrease in temperature. The variation of carrier concentration in CdS thin films evaluated from C-V measurements in a temperature range of 20-300 K. The interface state density of diode has also been calculated from the forward bias capacitance-frequency characteristics at room temperature. The activation energy and shunt resistance of the heterojunction evaluated from impedance spectroscopy measurements in a temperature range of 20-300 K.

**Keyword :** CdS/CuO Diode, I – V characteristics, C – V characteristics, Impedance spectroscopy

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ และดร.ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือระบบระบบสารสนเทศมีความร้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่งดงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจุ่มใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณอดิศร นพรุจิกุล นักศึกษาปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คุณคงกฤษณ์ ไพรวัลย์ และคุณกุลวรางค์ นุตะมาน ศิษย์เก่าปริญญาตรีห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า

ขอขอบคุณครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า  
สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณตาสมพร จำเนียรลาก คุณยายสมศรี จำเนียรลาก คุณพ่อวรวิดิ จำเนียรพีช คุณแม่สมพิศ จำเนียรพีช ที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุนส่งเสริมในการศึกษา พร้อมยื่นเคียงข้างและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

วรรณภา จำเนียรพีช

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XII
สารบัญรูป	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	9
2.1.1 ชนิดของของแข็ง	10
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	11
2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก	13
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	13
2.3.2 การระบุทิศทาง	13
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ	13
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และ กลุ่ม VI	15
2.4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	16
2.4.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไจท์	16
2.4.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์	17

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์	17
2.4.5 โครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(II)ออกไซด์	18
2.5 ผลึกจริง	19
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	19
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น	21
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	22
2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	22
2.5.3.2 โครงผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของ โครงผลึกแฝด หรือระนาบของ โครงผลึกแฝด	23
2.5.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของ อะตอมผิดพลาด	24
2.6 การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ	24
2.6.1 อัตราการระเหยสาร	25
2.6.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	25
2.6.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดกังสดน	25
2.6.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป	26
2.6.3 ความดันไอของธาตุ	27
2.6.4 การระเหยสารประกอบ	28
2.6.5 อิทธิพลของ โครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีการระเหยสาร	29
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	31
2.8 การศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	34
2.9 รอยต่อ พี-เอ็น	39
2.9.1 บริเวณพร่องพาหะ	39

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน	45
2.9.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพ่วงพาหะ	45
2.9.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	47
2.9.3 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะอิสระ	54
2.9.4 ความจุแพร่ซึม	58
2.10 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์	61
2.10.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ	62
2.10.2 กลไกการขูดขูดโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ	63
2.11 อิทธิพลของการขูดขูดโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร	66
2.12 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	69
2.13 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน	71
2.14 กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมเชื่อมต่อ	72
2.15 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ	76
2.15.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโทรสโกปี	77
2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	80
2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	80
2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	81
2.16.3 กราฟของโบด	85
2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์	87
2.16.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี	90

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	96
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	96
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติรักษาสถานะของแข็ง	96
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	97
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียสซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติรักษาสถานะของแข็ง	98
3.2. ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติรักษาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS /p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติรักษาสถานะของแข็ง	98
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติรักษาสถานะของแข็ง	98

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	100
3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	100
3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	100
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS /CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	104
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	104
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	105
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	105
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	106

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูงในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส	106
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	110
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	110
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	111
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	111
4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ และรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	115

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที 119
- 4.3 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ สารกึ่งตัวนำ n-Cd/p-CuAlO<sub>2</sub> ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและ ทำการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที 121
- 4.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 122
- 4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 128
- 4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 136

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.4	ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	144
4.3.5	ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	152
4.3.6	ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสและทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	181
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ		198
เอกสารอ้างอิง		205
ภาคผนวก		206
ประวัติผู้เขียน		209

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	12
2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	14
2.3	แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	29
4.1	แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	115
4.2	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{B0}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มियोเนกอนิสมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	128
4.3	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มियोเนกอนิสมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	132
4.4	แสดงค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_D$ ) แรงดันตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ความสูงของกำแพงศักย์ ( $\Phi_{c-v}$ ) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ ( $\Phi_{br}$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 -300 เคลวินโดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	142

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.5	แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_m$ ) ความจุไฟฟ้าสูงสุด ( $C_m$ ) ความนำไฟฟ้าสูงสุด ( $G_m/\omega$ ) ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) และค่าความต้านทาน( $R_s$ ) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	151
4.6	แสดงค่า $E_c-E_T$ ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และค่าความหนาแน่นของกักตักที่ผิวเชื่อมต่อ( $D_{it}$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	173
4.7	แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ $G/\omega$ กับความถี่และจากกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ ค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ของ $G/\omega$ กับความถี่ จากกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส	180
4.8	แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าจำนวนจริงและค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	181
4.9	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์-2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	187
4.10	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $1000/T$ ของค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	193

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.11	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	194

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	9
2.2	แสดงภาพขนาดเกรนของวัสดุผลึกพหุพันธ์	10
2.3	แสดงโครงสร้างของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก และมีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก	10
	ก. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก	
	ข. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก	
2.4	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ	11
2.5	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	14
2.6	แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	15
2.7	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	16
2.8	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	17
2.9	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	18
2.10	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdS	18
2.11	แสดงโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(II)ออกไซด์	19
2.12	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	20
	ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง	
	ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก	
	ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก	
	ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่	
2.13	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขดตึกและ ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล	21
2.14	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	22
2.15	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	22
2.16	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	23
2.17	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของ โครงผลึกแฝดและระนาบของ โครงผลึกแฝด	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.18	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมมิลด์ลำดับ	24
2.19	แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	26
2.20	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ไชระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	26
2.21	แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	27
2.22	แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	28
2.23	แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น	29
2.24	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	32
2.25	แสดงวิธีการหา $\beta_{20}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	34
2.26	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
2.27	แสดงรอยต่อพี-เอ็นลับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ) ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ $\psi_{bi}$ เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ง. โครงสร้างแถบพลังงาน	40
2.28	แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิต ( $\psi_{bi} - V - 2kT/q$ ) สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อลับพลันในสารกึ่งตัวนำชนิดคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์	45
2.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2 - V$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	47
2.30	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอไซ-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข ก. ไบแอสตรง ข. ไบแอสกลับทาง	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.31	แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ ก. เจ็อนไซไบแอสตรง ข. เจ็อนไซไบแอสกลับทาง	52
2.32	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ก. กราฟเชิงเส้น ข. กราฟกึ่งลอการิทึม	53
2.33	ลักษณะกระแส – แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง ง. ผลของความต้านทานอนุกรม จ. การแพร่ไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด – การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ	56
2.34	แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง	60
2.35	แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ที่แปรตามอุณหภูมิ	62
2.36	แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	64
2.37	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ $J_0$ และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนัลด้วย $\text{CdCl}_2$	66
2.38	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล ( $V=0$ ) ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.39	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด ก. ช่วงขุมนุมาพาหะ ข. ช่วงพร่องพาหะ ค. ช่วงกลับกลาย	71
2.40	แสดงพาหะที่เกิดการออกชิโดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	72
2.41	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	73
2.42	ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี $C_{it}$ และ $R_{it}$ ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง	74
2.43	ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS ข. แสดงการยึดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ $\Psi_s$	76
2.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	79
2.45	แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	80
2.46	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	81
2.47	แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	82
2.48	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)	83
2.49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ $Z'$ และ $Z''$ จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	85
2.50	แสดงกราฟโนควิสต์(ก) และกราฟของ โบด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณ โปลาไรเซชันที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด	86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.51	แสดงวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของในควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรมูลดังกล่าว	87
2.52	แสดงวงจรมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของในควิสต์ (ข)	87
2.53	แสดงแบบจำลองอิเลเมนต์เฟสของตัว (ก) และกราฟในควิสต์ของแบบจำลองอิเลเมนต์เฟสของตัว (ข)	89
2.54	แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า C <sub>SCR</sub> แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจรวม	93
2.55	แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se <sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง	94
2.56	แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe <sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na	95
2.57	แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe <sub>2</sub>	95
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	97
3.2	แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO	99
3.3	แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO	99
3.4	แสดงโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	104
3.5	แสดงเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	105
3.6	แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV	105

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios	106
3.8	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	107
3.9	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น	107
3.10	แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน	108
3.11	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) และอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน	108
3.12	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี	109
4.1	ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล	111
4.2	แสดงสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	111
4.3	แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 30 นาที	112

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	แสดงความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	113
4.5	การหาขนาดของเกรนและความเครียดของ (ก) เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (ข) เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO	114
4.6	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	117
4.7	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	118
4.8	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	118
4.9	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	119

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	120
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานและอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	121
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	123
4.13	แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	123
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	124
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	127
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	127

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	129
4.18	แสดงกราฟของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	130
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	130
4.20	แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	131
4.21	แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	131
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ $T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	134
4.23	แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	134

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากการใช้กลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	135
4.25	แสดงแผนภาพการดูดกลืนรังสีผ่านกำแพงศักย์ของโพลแล้วเกิดการรวมตัวของโพลกับอิเล็กตรอนในบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	135
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	137
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	138
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	141
4.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	143

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	143
4.31	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ ( $\Phi_{c-v}$ ) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ ( $\Phi_{bf}$ ) กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	144
4.32	แสดงแผนภาพรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในย่านอุณหภูมิพหุหะ โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีชั้นอินทรินสิกของ CuO ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ	146
4.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	147
4.34	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า ( $G/\omega$ ) กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	148
4.35	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $R_s$ กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	149
4.36	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับความถี่ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	151

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.37	แสดงการจับและคายประจุของกัณฑ์บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ	153
4.38	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	154
4.39	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	155
4.40	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	155
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	156
4.42	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	156

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.43	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	157
4.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า ศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	158
4.45	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	159
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	159
4.47	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า ศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	160

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.48	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	160
4.49	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	161
4.50	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	163
4.51	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	163
4.52	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์ โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์–2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	164

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.53	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	165
4.54	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	165
4.55	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา $\omega_0$ ของกราฟความสัมพันธ์ของ $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	166
4.56	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E_c$ กับ $E_c - E_T$ ที่ได้จากการหา $\omega_0$ จากกราฟความสัมพันธ์ของ $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	167
4.57	แสดงค่า $E_c - E_T$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $q(\Phi_B - V)$ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอส	168
4.58	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{ii}$ กับ $E_c - E_T$ ที่ได้จากการหา $\omega_0$ ของกราฟความสัมพันธ์ของ $G/\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	169

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.59	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	169
4.60	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	170
4.61	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์ โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	170
4.62	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	171
4.63	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	171

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา $\omega_0$ ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	172
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D_{\parallel}$ กับ อุณหภูมิที่ได้จากการหา $\omega_0$ ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	176
4.66	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	178
4.67	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	178
4.68	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสไปหน้าในช่วง 0 – 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	179
4.69	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	180

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.70	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอสไปหน้า $0 - 0.5$ โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ $20$ เฮิร์ตซ์ - $2$ เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	182
4.71	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอส $-0.5$ ถึง $0.5$ โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ $20$ เฮิร์ตซ์ - $2$ เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	182
4.72	วงจรมุมที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ รวมทั้งเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง $25$ ถึง $90$ องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	184
4.73	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ $25 - 90$ องศาเซลเซียสและที่ความถี่ $10$ กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง $2$ เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	185
4.74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ $25 - 90$ องศาเซลเซียสและที่ความถี่ $10$ กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง $2$ เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	185
4.75	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ $25 - 90$ องศาเซลเซียสและที่ความถี่ $10$ กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง $2$ เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	186

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.76	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	187
4.77	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	188
4.78	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหา $\omega_0$ ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	189
4.79	โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	193

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งที่สำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากมาจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด พบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝุ่นกรด สภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน จึงไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ต่างจากแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้นนั้น เราจำเป็นต้องพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI<sub>2</sub> เช่น CdTe, CdS, CuInSe<sub>2</sub> และ CuInGaSe<sub>2</sub> เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออิวิวิพังก์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu<sub>2</sub>S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพหุพังก์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออิวิวิพังก์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นหลากหลาย เช่น p-Cu<sub>2</sub>O/n-ZnO [1], p-Cu<sub>2</sub>O/n-CuO [2], CuO/ZnO [3], และ p-CuO/n-Si [4] เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาข่อมเยา จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิกอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu<sub>2</sub>O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ [5] จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจมายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลไฟด์โคโรนา เช่น CuAlO<sub>2</sub>/CdZnS [6], p-Cu<sub>x</sub>Sn<sub>y</sub>S<sub>2</sub>O/n-ZnO [7] และ CuO/CdS [8] พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียารงานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้มีการสนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำคิวปริกออกไซด์ (CuO) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงาน (E<sub>g</sub>) ประมาณ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ จึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ CuO มีข้อดีหลายประการ เช่น โลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติสารกึ่งตัวนำ CuO ไม่เป็นสารพิษ ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพีและเอ็น เป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ CuO มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ผิวนเคลือบอิเล็กทรอนิกส์โครมิก (electrochromic coatings) ประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี เป็นต้น การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) [9] วิธีไพโรไลซิสสารเคมี [10] วิธีออกซิเดชันจากโลหะ [11] วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี [12] เป็นต้น สำหรับฟิล์มบางของ CdS เตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอร์ริง วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) วิธีการระเหยในสุญญากาศ วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี และวิธีเคลือบฟิล์มบางในสารละลายเคมี (chemical bath deposition) เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมและทำการศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียสซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและกรณีที่มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.2.2 ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนิลและกรณีที่มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $\text{He } \lambda$  ions $\alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220 – 1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.2.3 ศึกษาวิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.2.4 ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400, ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.2.5 ศึกษาวิธีการประดิษฐ์ไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.2.6 ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้จากฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน โดยการทำขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปร่างกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปร่างกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน ต่อไป

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและกรณีที่มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.3.2 ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและกรณีที่มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูณสมบัติทางแสง

ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $He \lambda$  ions $\alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220 – 1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.3.3 ทำการศึกษาวิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.3.4 ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.3.5 ทำการศึกษาวิธีการเตรียมไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.3.6 ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้จากแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน โดยการทำขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปร่างกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปร่างกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่า

ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส ต่อไป

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานวิจัยในครั้งนี้ด้วย

1.4.2 ทำการเตรียมไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติยานะของแข็ง

1.4.3 ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100- 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.4.4 ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและที่มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ได้แก่ทำการศึกษาคูณสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาคูณสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี - วิสทิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $He\ \lambda\ ions\ \alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220-1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.4.5 ทำการศึกษาคูณสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้แก่ทำการศึกษาคูณสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน

$\text{CuK}_\alpha$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่ (C-f curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ต่อไป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและกรณีที่มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.5.2 ทำให้ทราบถึงการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}$  ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนิลและกรณีที่มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{CuK}_\alpha$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $\text{He } \lambda$  ions $\alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220 – 1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณ หาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.5.3 ทำให้ทราบถึงการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.5.4 ทำให้ทราบถึงการศึกษสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง

1.5.5 ทำให้ทราบถึงการศึกษวิธีการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.5.6 ทำให้ทราบถึงการศึกษสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ที่เตรียมได้จากฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปร่างกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปร่างกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 - 90 องศาเซลเซียส

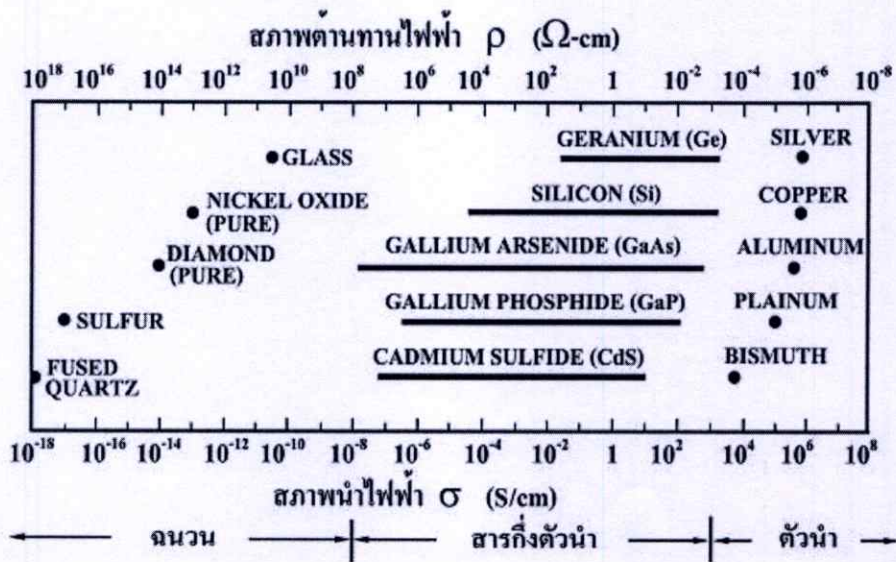
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของ โครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

#### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [13-23]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง  $10^{-18}$ - $10^{-8}$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง  $10^4$ - $10^6$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง ฉนวน และตัวนำ ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์

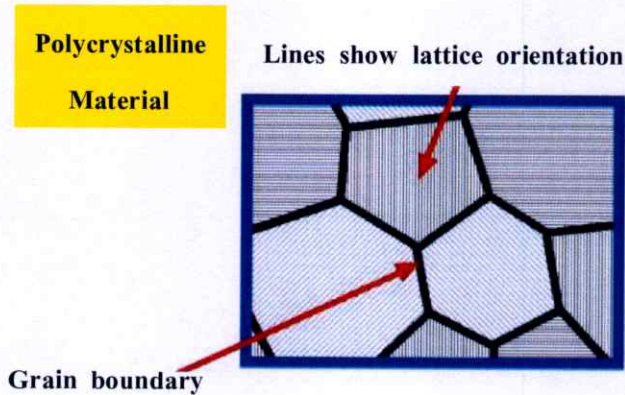


รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

### 2.1.1 ชนิดของของแข็ง

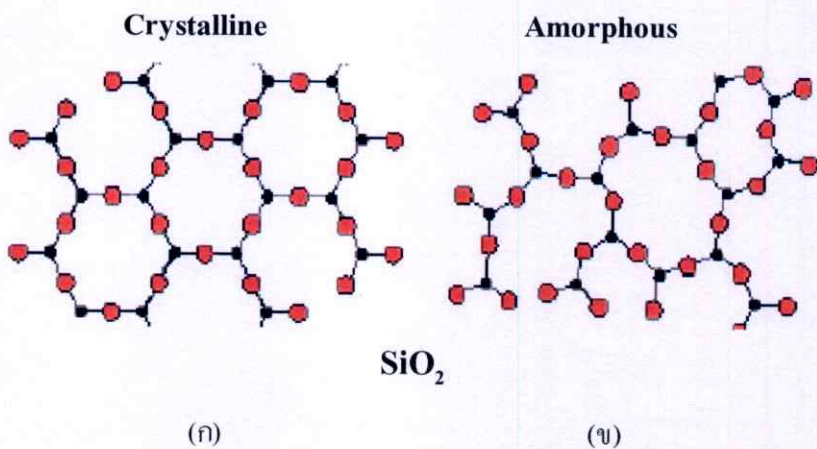
วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline material) คือ อะตอมที่เรียงตัวในแนวระนาบอย่างเป็นระเบียบ ผลึกเดี่ยว (single crystal) คือ อะตอมที่เรียงตัวเป็นแบบๆ หนึ่งในระนาบวัสดุผลึก

วัสดุผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline material) คือ การประกอบไปด้วยหน่วยเซลล์เล็กๆเป็นจำนวนมากจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน หรือ เรียกว่าเกรน (grain) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงภาพขนาดเกรนของวัสดุผลึกพหุพันธ์

โครงสร้างของสสารที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) คือ ลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกหรือเป็นผลึกในระดับสเกลนาโนเมตร

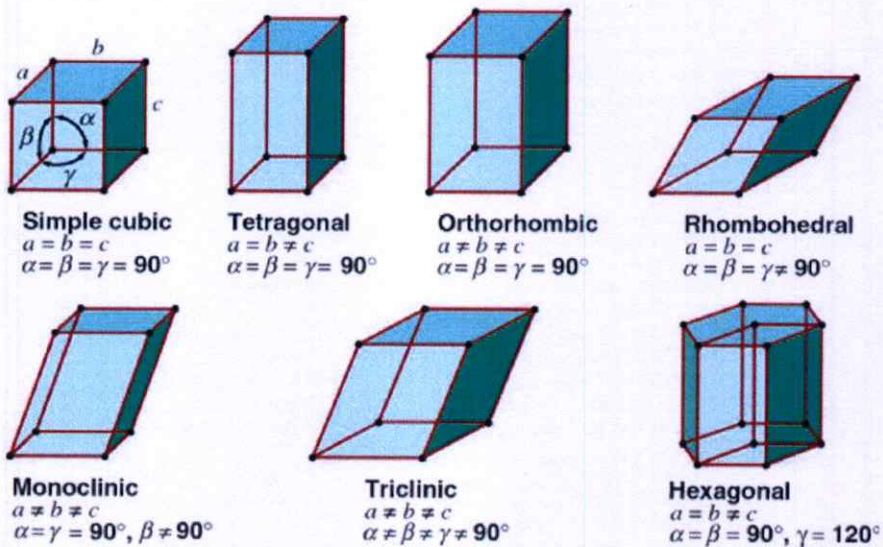


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของวัสดุของแข็ง

- ก. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึก
- ข. วัสดุที่มีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส

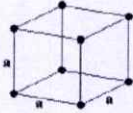
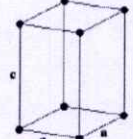
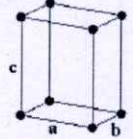
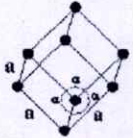
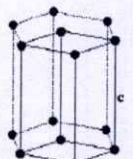
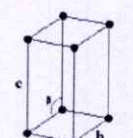
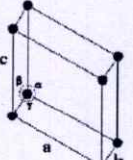
## 2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [14-23]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก อาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุลเซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือแลตทิส (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 3 มิติ ดังรูปที่ 2.4 ในระบบสามมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$   $\vec{b}$  และ  $\vec{c}$  และ มุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสาม ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้อาศัยอยู่เจ็ดแบบดังตารางที่ 2.1 คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนัล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รมบโหีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)



รูปที่ 2.4 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

## 2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [14-23]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.3.1 การระบุตำแหน่ง

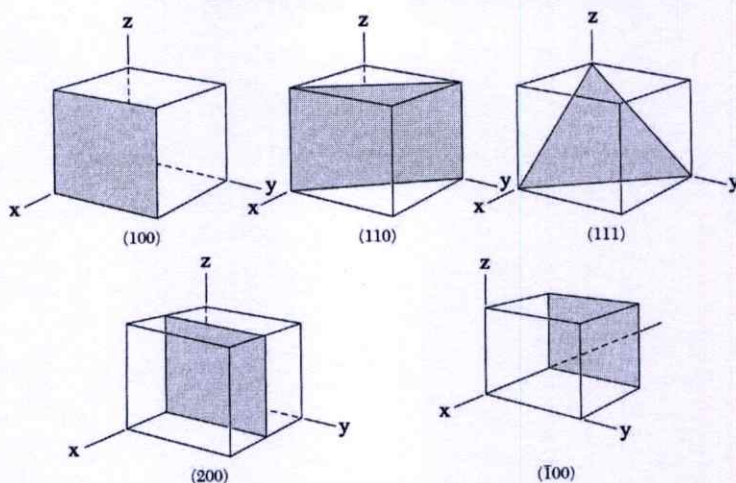
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “;” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$

### 2.3.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u v w]$  โดยให้สังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยม และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{2}1]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

### 2.3.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบแต่ละระนาบจะใช้อักษร  $(hkl)$  โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บสี่เหลี่ยม และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ค่า  $(hkl)$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง ค่าดัชนีมิลเลอร์มีวิธีการหาได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการกำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนผลึกแต่ละแกนคือค่า  $(x,y,z)$  และจึงทำให้เป็นเศษส่วนกลับ ต่อจากนั้นให้หาผลคูณรวมน้อย (ล.ร.น.) ของเศษส่วนกลับเหล่านั้น ก็จะได้พารามิเตอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ นอกจากนี้ระนาบใดขนานกับแกนใดให้ประมาณว่าระนาบนั้นตัดแกนนี้ที่ระยะอนันต์ ส่วนระนาบใดตัดแกนลบ ก็ให้ใส่เครื่องหมาย (-) บนค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวนั้น เช่น ระนาบ  $(010)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(\infty,1,\infty)$  และระนาบ  $(\bar{1}11)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(-1,1,1)$  ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.5 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

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

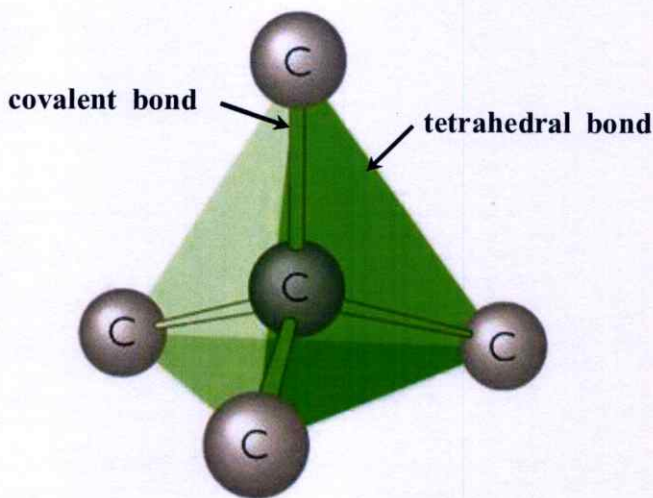
$$i = -(h + k) \tag{2.1}$$

เช่น ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลระนาบ(110) จะเรียกว่า  $(1\bar{1}20)$  นอกจากนี้ก็พบว่าสำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง  $[hkl]$  จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีมิลเลอร์เหมือนกันนั่นคือระนาบ  $(hkl)$  ตัวอย่างเช่น ทิศทาง  $[102]$  จะตั้งฉากกับระนาบ  $(102)$

## 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

[14-23]

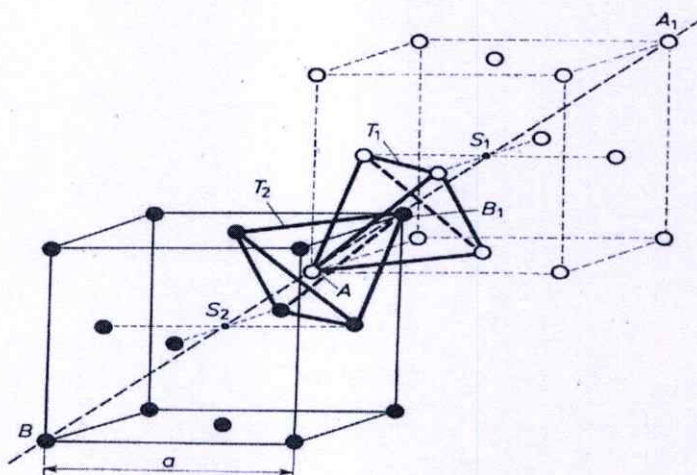
ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)



รูปที่ 2.6 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

### 2.4.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

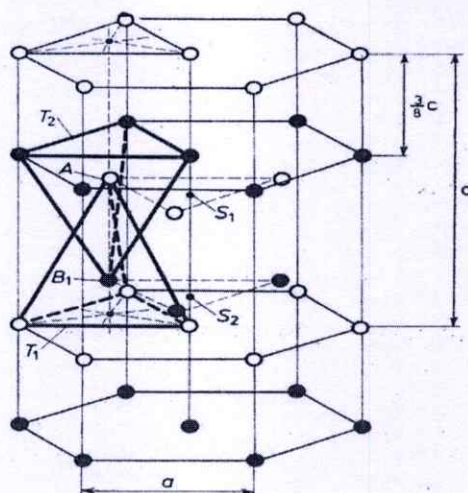
โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_2$  (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว  $A_1B_1$  ดังนั้นจะได้ระยะ  $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$  ฐานของพื้นระตีสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและหมุนทำมุม 60 องศารอบแกน  $A_1B_1$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

### 2.4.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไชท์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไชท์แสดงในรูปที่ 2.8 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และ  $c$  มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  และ  $s_2$  เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน  $c$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \frac{\sqrt{3}}{8}a$  ฐานพื้นระตีสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน  $c$



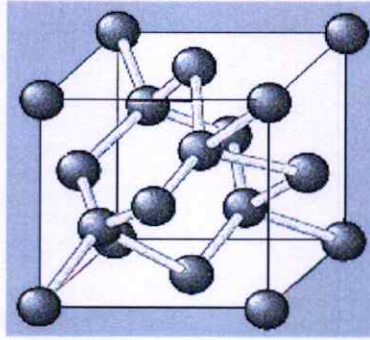
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์

### 2.4.3 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ [14-30]

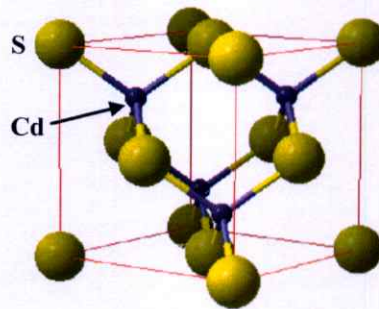
โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวอร์ทไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

### 2.4.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.9 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างที่โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ  $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งเซลล์หน่วยจะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



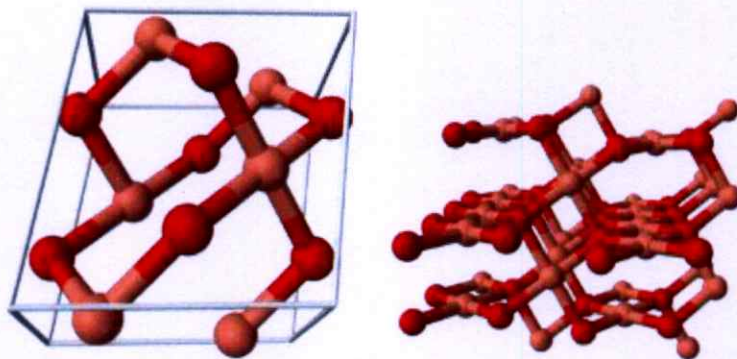
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพอร์



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdS

#### 2.4.5 โครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(II)ออกไซด์ [1-12, 19, 23]

โครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(II)ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) มีโครงสร้างแบบโมนอกลิคดังรูปที่ 2.11 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก  $a = 4.6837$  อังสตรอม,  $b = 3.4226$  อังสตรอม และ  $c = 5.1288$  อังสตรอม ที่  $\alpha = 90$  องศา,  $\beta = 99.54$  องศา และ  $\gamma = 90$  องศา สูตรโมเลกุล  $\text{CuO}$  ลักษณะเป็นผงสีดำ น้ำหนักโมล 79.545 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 6.31 กรัมต่อตารางเซนติเมตร จุดหลอมเหลว 1,201 องศาเซลเซียส (1,474 เคลวิน) จุดเดือด 2,000 องศาเซลเซียส (2,273 เคลวิน) ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายในกรดเจือจาง และไฮดรอกไซด์แอมโมเนีย สารกึ่งตัวนำคอปเปอร์(II) ออกไซด์มีการประยุกต์ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เพราะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางแสงได้ ค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 5.3 อิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์(I)ออกไซด์

## 2.5 ผลึกจริง [14-30]

ที่ผ่านมาพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง(defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่า ผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปร่างเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

### 2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

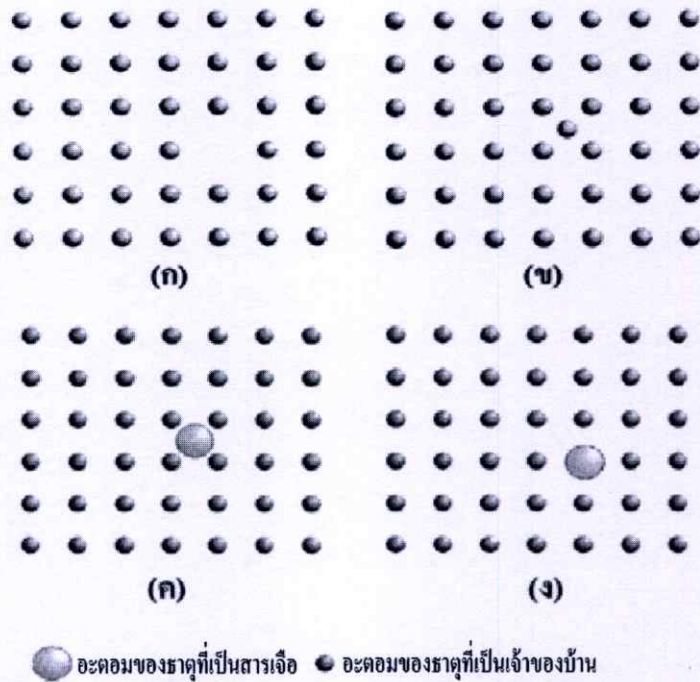
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซว่างหรือเวแคนซี(vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะอยู่ใน โครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

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

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

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



รูปที่ 2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

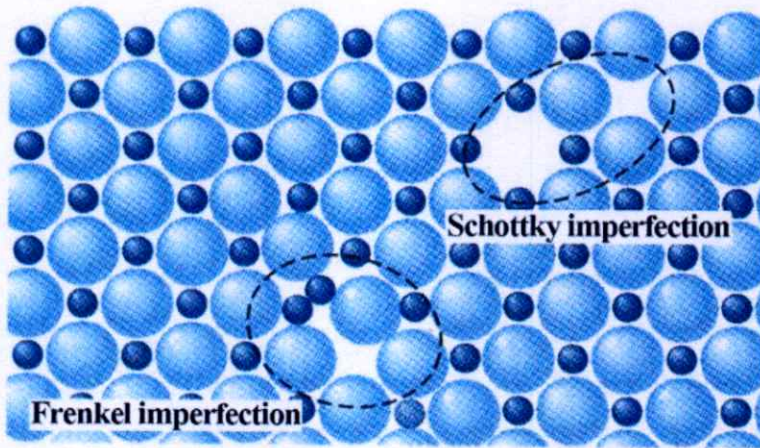
- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนี้

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

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่า

ไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)



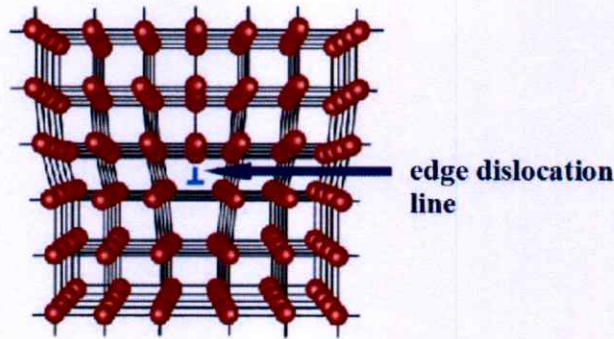
**รูปที่ 2.13** แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

### 2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

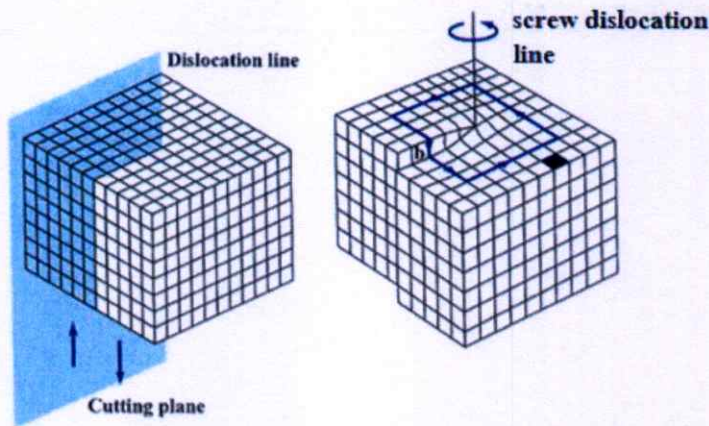
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว(distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เฮอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector :  $\vec{b}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรุกกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเฮอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบขอบ



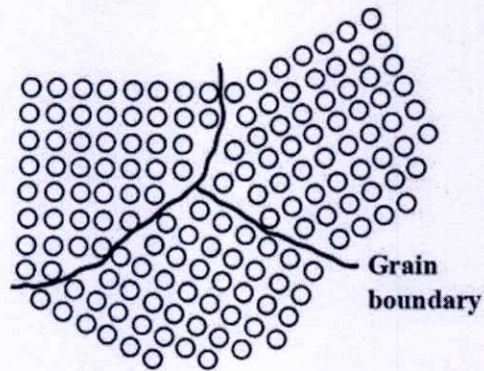
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกแบบสกรู

### 2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว (surface-imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

#### 2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

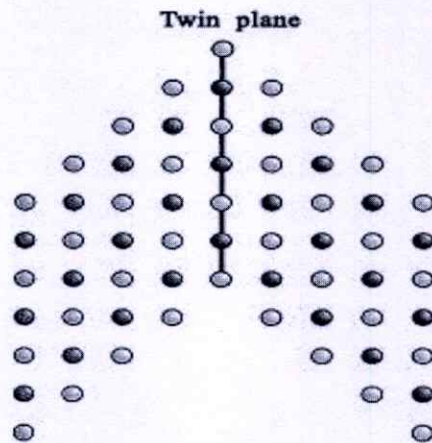
เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่า รอยต่อเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)



รูปที่ 2.16 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

### 2.5.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

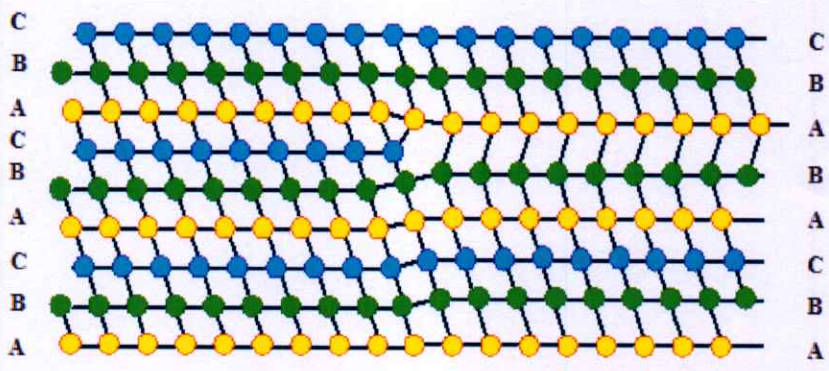
โครงผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจก โดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า รอยต่อโครงผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของ โครงผลึกแฝดและระนาบของ โครงผลึกแฝด

**2.5.3.3 ความบกพร่องของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)**

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงผลึกออคตาฮีดรอนแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดพลาดจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ไคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนย้าย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด

**2.6 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ**

[17, 19-30]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

### 2.6.1 อัตราการระเหยสาร

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

$$\Phi_c = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_c \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\Phi_c$	คือ	ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
	$P_c$	คือ	ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
	M	คือ	มวลโมเลกุล
	T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

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

$$\Gamma_c = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_c \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.3)$$

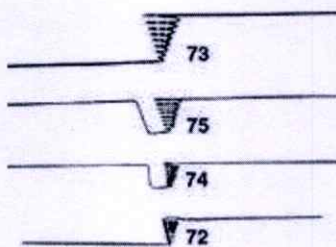
ที่ความดัน  $10^{-2}$  ทอร์ ค่าของ  $\Gamma_c$  ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

### 2.6.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน จะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรอง โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

#### 2.6.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดถังสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบ เป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน ดังแสดงในรูป 2.19 โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดถังสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

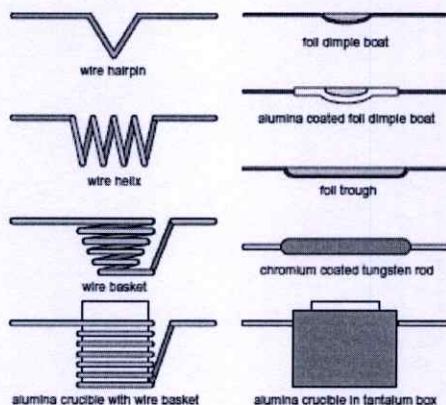


รูปที่ 2.19 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน

2.6.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป เช่น ทังสเตน, แทนทาลัม และ โมลิบดีนัม จะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวด คือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำ แต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ

Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.20 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

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

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.4)$$

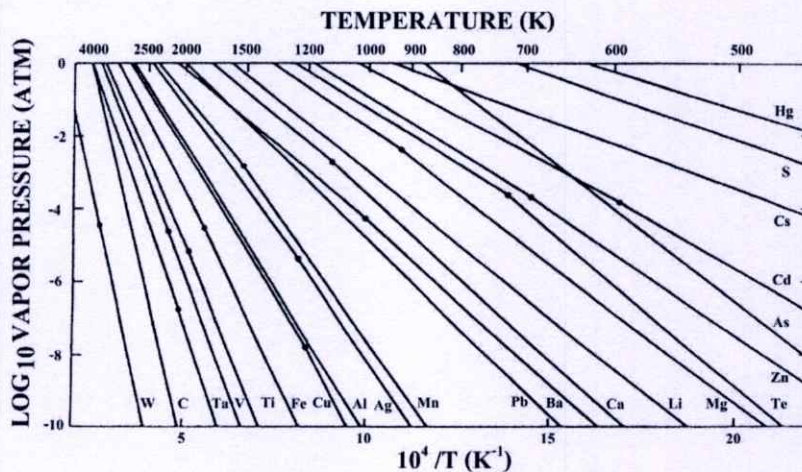
ถ้าให้  $\Delta V$  มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ ( $V_v$ ) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว  $V_v$  จะมีค่าเป็น  $RT/P$  ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.4) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.5)$$

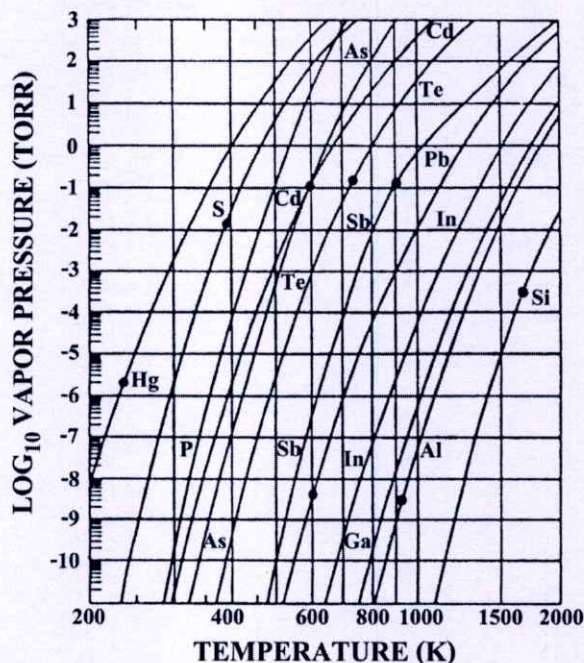
ถ้าประมาณให้  $\Delta H(T)$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta H_c$  (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_c}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp -\frac{\Delta H_c}{RT} \quad (2.6)$$

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



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

#### 2.6.4 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง หรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้  $\text{MX}_{(s)} \rightarrow \text{M}_{(g)} + \frac{1}{2}\text{X}_{2(g)}$  โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น  $\text{MX}_{(s)}$  เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

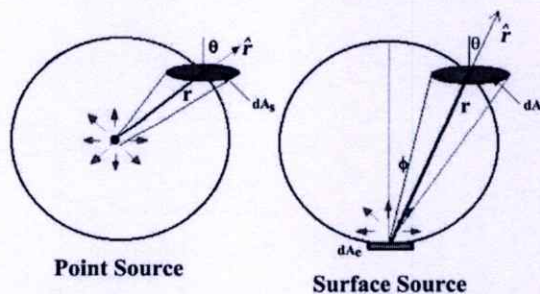
ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มี การแตกตัว	$MX(s \text{ หรือ } l) \rightarrow MX(g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF <sub>2</sub> , MgF <sub>2</sub>
การแยกส่วนประกอบ	$MX(s) \rightarrow M(s) + 1/2 X_2(g)$ $MX(s) \rightarrow M(l) + 1/n X_n(g)$	Ag <sub>2</sub> S, Ag <sub>2</sub> Se สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV
การระเหยโดยการแตกตัว (ก) ซาลโคจีไนต์ (ข) ออกไซด์	$MX(s) \rightarrow M(g) + 1/2 X_2(g)$ X = S, Se, Te $MO_2(s) \rightarrow MO(s) + 1/2 O_2(g)$	CdS, CdTe, CdSe SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>

M = โลหะ X = อโลหะ

2.6.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการ  
ระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึง  
ฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหล  
ของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจาก  
การระเหย (total evaporation mass:  $\bar{M}_e$ ) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย  
แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่  $A_e$  คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหยปริมาณของมวล  $d\bar{M}_s$  ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่  $dA_s$  จากรูปที่ 2.23  $dA_c$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า  $dA_c = dA_s \cos \theta$  ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left( \frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi^2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $r$  คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

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

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c \quad (2.9)$$

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

$$\bar{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left( \frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi \quad (2.10)$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.11)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $n = 1$  สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคไซน์ ถ้า  $n > 1$  อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า  $n < 1$  จะเกิดการกระจายแบบ

เดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ  $n = 0$  การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

## 2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [14-23]

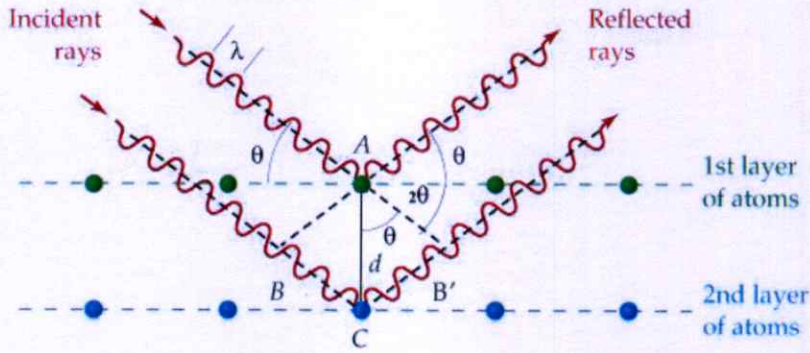
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

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

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอังกฤษคือ วิลเลียม เฮนรี แบริก และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.13)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.13)$$

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



รูปที่ 2.24 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.13) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.14) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a$ ) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $hkl$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.15)$$

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.13) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.16) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a, c$ ) เมื่อทราบขนาดมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $hkl$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.17)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของ โครงผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพร่องการจัดเรียงระนาบของ โครงผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของ โครงผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum_N \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.18)$$

- เมื่อ TC(hkl) คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของ โครงผลึก (hkl)  
 $I(hkl)$  คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ  
 $I_0(hkl)$  คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์  
 $N$  คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

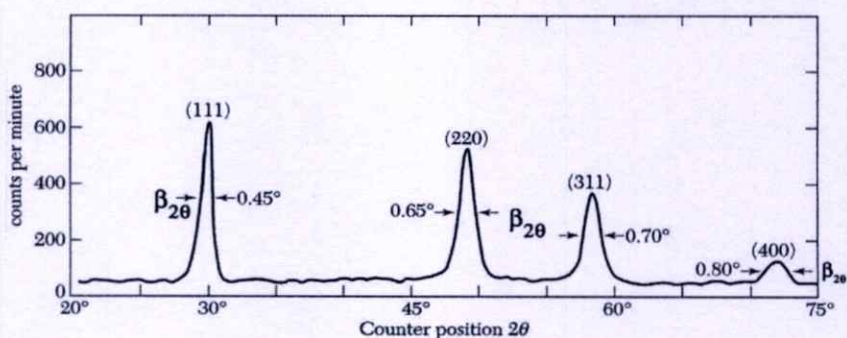
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด ( $\epsilon_s$ ) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.20)$$

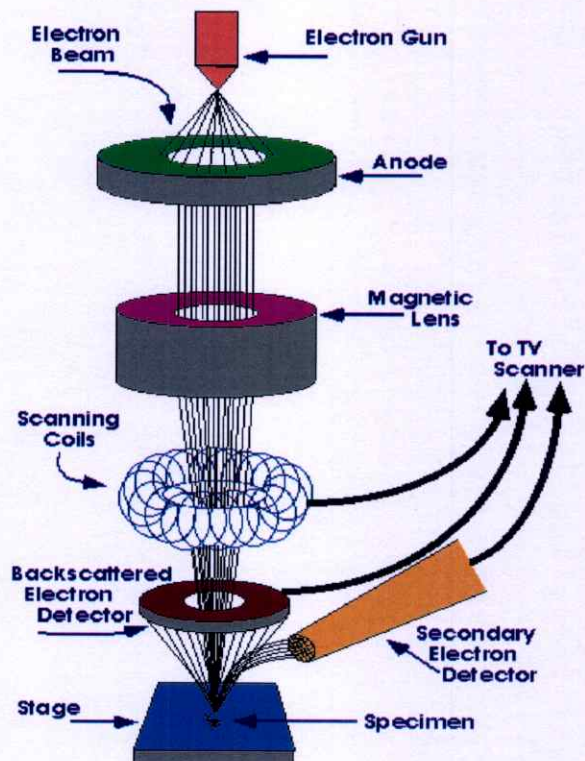
- เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน  
 $\beta$  คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (full width at half maximum : FWHM)  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก  
 $\epsilon_s$  คือ ความเครียด



รูปที่ 2.25 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

## 2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [14-30]

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



รูปที่ 2.26 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

#### ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผันตรงกับ  $i_p$  แต่ผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $I_p$  จะมีความน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีความมากขึ้น

### อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

#### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

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

#### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ออเจิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องหรือเบรมสตราลุง (continuum X-rays or Bremsstrahlung) การเปล่งแสงแสงแคโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อื่นจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

#### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลง

ไปในเนื้อของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่ำมากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลงหมายถึงสัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

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

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.21)$$

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

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นอิเล็กตรอน (electron shell) จากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

### ออเจิเล็กตรอน

ออเจิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

### การเรืองแสงแคโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าลักษณะของภาพได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

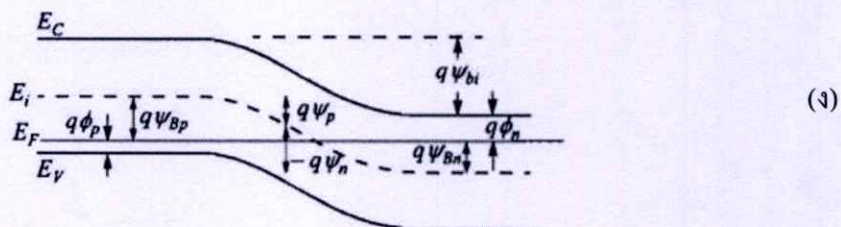
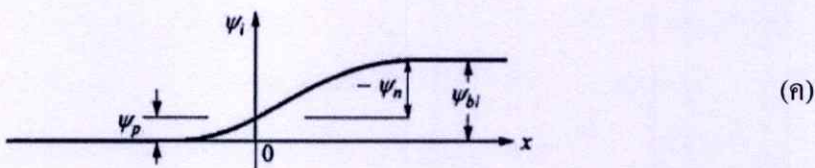
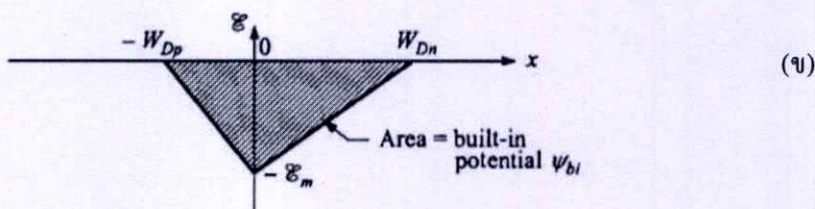
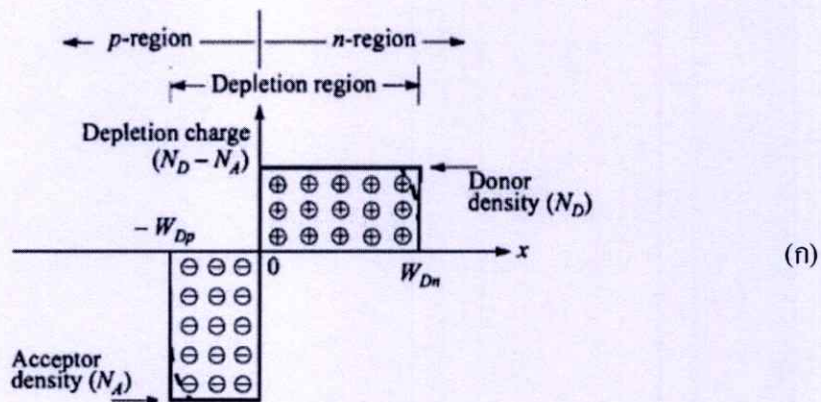
## 2.9 รอยต่อพี-เอ็น [13-14, 16, 20, 28-30]

รอยต่อพี-เอ็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็นเป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็นได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอกล์เลย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ซาห์(Sah), นอยซี(Noyce), ชอกล์เลย์(Shockley) และมอลล์(Moll) ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น การเกิดและการรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุที่บริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานอนุกรมเป็นต้น รอยต่อพี-เอ็นเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้ว โดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิตของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็นมีสมบัติการเรียงกระแส กล่าวคือยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียวซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดชนิดต่างๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด อดวาแลนซ์ไดโอด PIN ไดโอด วาริสเตอร์ และวาร์เรกเตอร์เป็นต้น

### 2.9.1 บริเวณพร่องพาหะ ( depletion region )

#### 2.9.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน ( abrupt junction )

เมื่อความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จากสารเจือผู้รับ ( $N_A$ ) ไปยังสารเจือผู้ให้ ( $N_D$ ) แสดงไว้ในรูปที่ 2.27 (ก) ผลที่ได้รับทำให้เกิดรอยต่อฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้า  $N_A \gg N_D$  (หรือในทางกลับกัน) ผลที่ได้รับจากรอยต่อฉับพลันทำให้เกิด  $p^+ - n$  (หรือ  $n^+ - p$ )



รูปที่ 2.27 แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉับพลันในสภาวะสมดุลความร้อน

ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงปริมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)

ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่  $\psi_{bi}$  เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ

ง. โครงสร้างแถบพลังงาน

ก่อนอื่นต้องพิจารณาภาวะสมดุลทางความร้อนขณะที่ไม่มีแรงดันไบแอส กระแสพัดพาและกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้คือ

$$J_n = 0 = q\mu_n \left( n\xi + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) = \mu_n n \frac{dE_F}{dx} \quad (2.22)$$

หรือ

$$\frac{dE_F}{dx} = 0. \quad (2.23)$$

กระแสของโฮลก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ

$$J_p = 0 = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} \quad (2.24)$$

ดังนั้นเงื่อนไขของกระแสโฮล และอิเล็กตรอนสุทธิขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ จะต้องกำหนดให้ระดับพลังงานเฟอร์มิคงที่ตลอด ศักย์ดกกร่อมรอยต่อหรือศักย์แพร่ซึม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.27 (ข), 2.27 (ค) และ 2.27 (ง) มีค่าเท่ากับ

$$q\psi_{bi} = E_g - (q\phi_n + q\phi_p) = q\psi_{Bn} + q\psi_{Bp} \quad (2.25)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำอนดีเจนเนอเรต (non-degenerate semiconductor)

$$\begin{aligned} \psi_{bi} &= \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{n_{no}}{n_i} \right) + \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{p_{po}}{n_i} \right) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \end{aligned} \quad (2.26)$$

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

$$\psi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{n_{no}}{n_{po}} \right) \quad (2.27)$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพาหะข้างมาก และพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแต่ละข้างของรอยต่อ ถัดไปเราจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า และการกระจายศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ โดยการประมาณว่าประจุบวกและประจุลบที่อยู่เฉพาะภายในบริเวณพร่องพาหะและจะอยู่แยกกันคนละด้านของบริเวณพร่องพาหะอิสระ ส่วนบริเวณที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะจะ

ถือว่าสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ประจุลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านที่จะต้องเท่ากับประจุบวกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านอื่นดังสมการ

$$N_A W_{Dp} = N_D W_{Dn} \quad (2.28)$$

จากสมการปัวซอง (equation Poisson) จะได้ว่า

$$-\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = \frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} [N_D^+(x) - n(x) - N_A^-(x) + p(x)] \quad (2.29)$$

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

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_A}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.30ก.)$$

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_D}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.30ข.)$$

สนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการรวมสมการข้างต้น (2.30ก) รวม (2.30ข) ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.27(ข) :

$$\xi(x) = -\frac{qN_A(x+W_{Dp})}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \xi(x) &= -\xi_m + \frac{qN_D x}{\epsilon_s} \\ &= -\frac{qN_D}{\epsilon_s}(W_{Dn} - x) \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \end{aligned} \quad (2.32)$$

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

$$|\xi(x)| = \frac{qN_D W_{Dn}}{\epsilon_s} = \frac{qN_A W_{Dp}}{\epsilon_s} \quad (2.33)$$

รวมสมการที่ (2.31) และ (2.32) อีกครั้งเพื่อหาค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้า  $\psi_i(x)$  (รูปที่ 2.27 (ค))

$$\psi_i(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(x+W_{Dp})^2 \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.34)$$

$$\psi_i(x) = \psi_i(0) + \frac{qN_D}{\epsilon_s}(W_{Dn} - \frac{x}{2})x \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.35)$$

ที่แต่ละด้านของบริเวณพ่องพาหะจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน เราสามารถคำนวณได้จาก

$$\psi_p = \frac{qN_A W_{Dp}^2}{2\epsilon_s}, \quad (2.36ก.)$$

$$\psi_n = \frac{qN_D W_{Dn}^2}{2\epsilon_s}, \quad (2.36ข.)$$

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ  $\psi_{bi}$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$\psi_{bi} = \psi_p + |\psi_n| = \psi_i(W_{Dn}) = \frac{|\xi_m|}{2}(W_{Dp} + W_{Dn}) \quad (2.37)$$

$\xi_m$  สามารถคำนวณได้จาก :

$$|\xi_m| = \sqrt{\frac{2qN_A\psi_p}{\epsilon_s}} = \sqrt{\frac{2qN_D\psi_n}{\epsilon_s}} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.37) และ (2.28) บริเวณพ่องพาหะสามารถคำนวณได้ดังนี้ :

$$W_{Dp} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}} \quad (2.39ก.)$$

$$W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_{bi}}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}} \quad (2.39ข.)$$

$$W_{Dp} + W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \psi_{bi}} \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.39ก.), (2.39ข.) และ(2.40) สามารถอนุมานได้ดังนี้

$$\frac{|\psi_n|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dn}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \quad (2.41ก.)$$

$$\frac{|\psi_p|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dp}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad (2.41ข.)$$

สำหรับรอยต่อฉับพลันด้านใดด้านหนึ่ง ( $p^+ - n, n^+ - p$ ) ในกรณีนี้สมการที่ (2.25) จะใช้ในการคำนวณหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ โดยที่ศักย์ตกคร่อมรอยต่อและบริเวณพ่องพาหะจะปรากฏอยู่ในบริเวณสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนน้อยๆ เมื่อลดรูปสมการที่ (2.40) จะได้

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \psi_{bi}}{qN}} \quad (2.42)$$

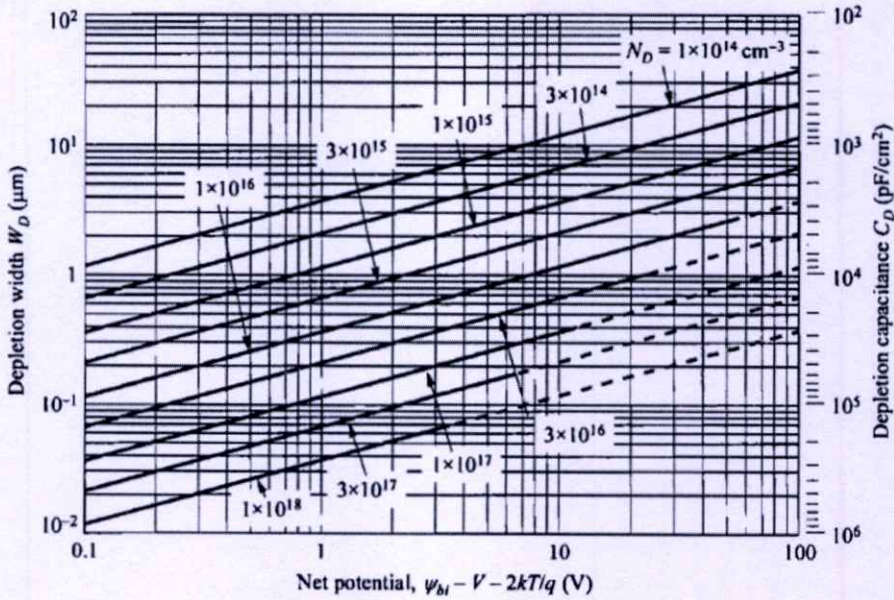
ที่  $N$  คือ  $N_D$  หรือ  $N_A$  โดยที่  $N_A \gg N_D$  หรือในทางตรงข้ามกัน, และ

$$\psi_i(x) = |\xi_m| \left( x - \frac{x^2}{2W_D} \right) \quad (2.43)$$

การอธิบายดังกล่าวข้างต้นนี้อาศัยการประมาณว่าประจุบวก และประจุลบจะปรากฏอยู่เฉพาะในบริเวณพร่องพาหะเท่านั้น แต่ถ้าต้องการความถูกต้องมากขึ้นเราจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายของความหนาแน่นของพาหะข้างมากเพิ่มเติมเข้าไปในสมการปัวซอง เช่น ด้านพีจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น  $\rho \approx -q[N_A - p(x)]$  ส่วนด้านเอ็นจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น  $\rho \approx q[N_D - n(x)]$  ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.40) โดยการแทนที่  $\psi_{bi}$  ด้วย  $(\psi_{bi} - 2kT/q)$  โดยที่  $2kT/q$  เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ ซึ่งเกี่ยวข้องกับส่วนหางของการกระจายของพาหะข้างมาก เช่น พาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพาหะข้างมากเป็นโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่อยู่ใกล้ขอบบริเวณพร่องพาหะ โดยที่  $kT/q$  เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะที่สภาวะสมดุลความร้อน สำหรับรอยต่อฉับพลันที่ด้านใดด้านหนึ่งจะเป็น

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN} \left( \psi_{bi} - \frac{2kT}{q} \right)} \quad (2.44)$$

นอกจากนี้เมื่อ  $V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับรอยต่อพี-เอ็น, ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตในรอยต่อพี-เอ็นจะเป็น  $(\psi_{bi} - V)$  เมื่อ  $V$  มีค่าเป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง แทนค่า  $\psi_{bi}$  ด้วย  $(\psi_{bi} - V)$  ลงในสมการที่ (2.44) จะได้ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ของรอยต่อฉับพลันเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนแสดงไว้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิต่อหน่วยพื้นที่  $(\psi_{bi} - V - 2kT/q)$  สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉนวนในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์

ศักย์ไฟฟ้าสุทธิที่ไบแอสเป็นศูนย์สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะมีค่าประมาณ 0.8 โวลต์ และสำหรับแกลเลียมอาเซไนด์ประมาณ 1.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าสุทธิจะลดลงภายใต้ไบแอสตรง และจะเพิ่มขึ้นภายใต้ไบแอสกลับทาง ผลดังกล่าวนี้ใช้ได้กับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาเซไนด์ เนื่องจากทั้งซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตเท่ากัน ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ เช่น เซอร์มานียม ต้องคูณแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของซิลิคอนเข้าไปด้วย  $\sqrt{\epsilon_s(Ge) / \epsilon_s(Si)}$  (=1.16) การคำนวณง่ายๆดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้กับรอยต่อพี-เอ็นฉนวนของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆได้

2.9.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ (depletion-layer capacitance)

ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถูกกำหนดเป็น

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

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{W_D} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N}{2}} \left( \psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.45}$$

ที่  $V$  เป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง ผลที่ได้จากความจุไฟฟ้า บริเวณพร่องพาหะแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 จากสมการที่ (2.45) จะได้

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2}{q\epsilon_s N} \left( \psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right), \quad (2.46)$$

$$\frac{d(1/C_D^2)}{dV} = -\frac{2}{q\epsilon_s N} \quad (2.47)$$

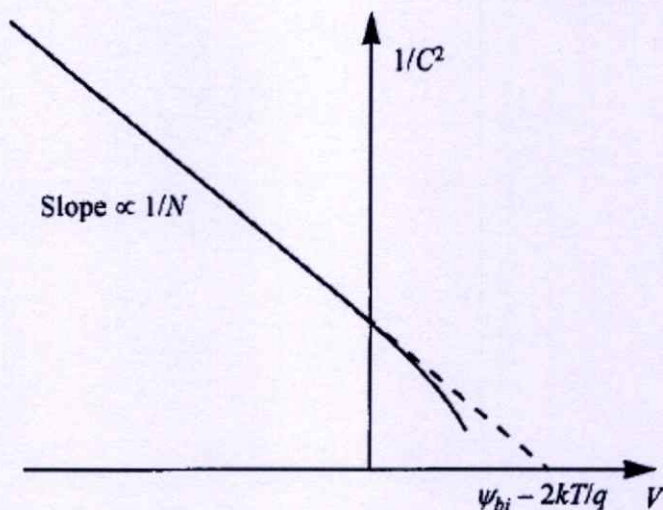
จากสมการที่ (2.46) และ (2.47) นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  กับ  $V$  (รูปที่ 2.29) ค่าความชันที่ได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารเจือ และที่  $1/C^2 = 0$  จุดตัดแกน  $x$  คือ  $\psi_{bi} - 2kT/q$  สำหรับไบแอสตรงจะมีความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากที่มีความจุของบริเวณพร่องพาหะ ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและข้อมูลความจุ-แรงดันไฟฟ้า จะไม่เปลี่ยนแปลงตามโพรไฟล์ของสารเจือที่ระยะทางน้อยกว่าความยาวเดอบายซึ่งความยาวเดอบาย (Debye length :  $L_D$ ) คือ ลักษณะเฉพาะของความยาวของสารกึ่งตัวนำ มีนิยามดังนี้คือ

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s kT}{q^2 N}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qN\beta_{th}}} \quad (2.48)$$

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

$$n = N_D \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta\psi_i}{dx^2} &= -\frac{q}{\epsilon_s} (N_D + \Delta N_D - n) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[ 1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \right] \\ &\approx -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[ 1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \left( 1 + \frac{\Delta\psi_i q}{kT} \right) \right] \approx \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s kT} \Delta\psi_i \end{aligned} \quad (2.50)$$



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2-V$  ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ

## 2.9.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

### 2.9.2.1 สมการของชอกก์เลย์ในกรณีอุดมคติ

ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในกรณีอุดมคติจะอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐาน 4 ข้อดังนี้คือ

1. มีการประมาณว่าบริเวณพร่องพาหะเป็นแบบฉับพลัน กล่าวคือ เกิดศักย์ตกคร่อมรอยต่อเนื่องจากประจุของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับที่ถูกไอออนไนซ์ และแรงดันไบแอสจะตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อนี้ ส่วนนอกบริเวณพร่องพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. การประมาณแบบโบลตซ์มันน์จะยังใช้ได้
3. การฉีดกระแสอยู่ในระดับต่ำ กล่าวคือ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสที่เกิดจากกลไกการเกิด-การรวมตัวของพาหะ ในบริเวณพร่องพาหะ ดังนั้น ประมาณกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบริเวณพร่องพาหะ

อันดับแรกเราพิจารณาความสัมพันธ์ของ โบลตซ์มันน์ที่สภาวะสมดุลความร้อน จะได้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (2.51ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (2.51ข.)$$

ที่สภาวะสมดุลความร้อนผลลัพท์ของ pn จากสมการข้างต้นจะเท่ากับ  $n_i^2$  เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับรอยต่อ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยของรอยต่อทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง และผลลัพท์ของ pn ไม่เท่ากับ  $n_i^2$  เราจึงกำหนดระดับควอซี-เฟอร์มี (quasi-Fermi) ได้ดังนี้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) \quad (2.52ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.52ข.)$$

ที่  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  คือ ระดับควอซี-เฟอร์มีสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.52ก.) และ (2.52ข.) เราจะได้

$$E_{Fn} = E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right), \quad (2.53ก.)$$

$$E_{Fp} = E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (2.53ข.)$$

ผลลัพท์ของ pn กลายเป็น

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.54)$$

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

จากสมการที่ (2.52ก.) และความจริงที่ว่า  $\xi \equiv \nabla E_i / q$  เราจะได้

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n \left( n\xi + \frac{kT}{q} \nabla n \right) = \mu_n n \nabla E_i + \mu_n kT \left[ \frac{n}{kT} (\nabla E_{Fn} - \nabla E_i) \right] \\ &= \mu_n n \nabla E_{Fn} \end{aligned} \quad (2.55)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$J_p = \mu_p p \nabla E_{Fp} \quad (2.56)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอนและโฮล จะแปรตรงกับเกรเดียนท์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิของอิเล็กตรอนและโฮล, ถ้า  $E_{Fn} = E_{Fp} =$  ค่าคงที่ (สมดุลความร้อน) แล้ว  $J_n = J_p = 0$

การกระจายของศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ และความหนาแน่นของพาหะในรอยต่อพี-เอ็น ภายใต้เงื่อนไขการไบแอสตรงและการไบแอสกลับทางแสดงในรูปที่ 2.30 ระดับ  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะดังแสดงในสมการที่ (2.53ก.) และ (2.53ข.) ในบริเวณพร่องพาหะระดับ  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  จะยังคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะในบริเวณพร่องพาหะนี้ยังคงมีปริมาณสูงอยู่มาก อีกทั้งกระแสของพาหะจะมีค่าคงที่ ดังนั้นเกรเดียนท์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิจะต้องมีค่าน้อยลง ยิ่งไปกว่านั้นความกว้างของบริเวณพร่องพาหะสั้นกว่าระยะการแพร่ซึม ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่ลดต่ำลงในบริเวณพร่องพาหะจะไม่มีนัยสำคัญ

แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับรอยต่อจะแสดงดังสมการ

$$qV = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (2.57)$$

รวมสมการที่ (2.57) เข้ากับสมการที่ (2.54) เราจะได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบ ( $x = -W_{DP}$ ) ของบริเวณพร่องพาหะในด้านพี (p-side) ดังสมการ

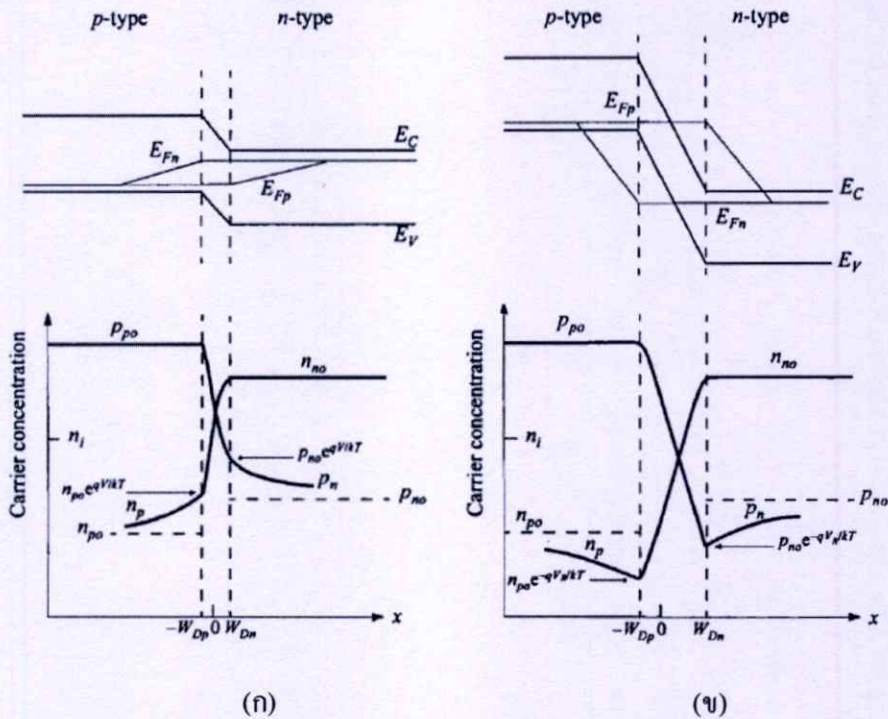
$$n_p(-W_{DP}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.58ก.)$$

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

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

$$p_n(W_{Dn}) = p_{no} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.58ข.)$$

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวข้างต้นมีความสำคัญมากต่อสมการกระแส-แรงดันไฟฟ้าของกรณีอุดมคติ



รูปที่ 2.30 แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอไซ-เฟอร์มีสำหรับอิเล็กตรอนและโฮล และการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข  
 ก. ไบแอสตรง  
 ข. ไบแอสกลับทาง

สมการต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขสภาวะคงตัว (steady-state) ในรอยต่อทางด้านเอ็นคือ

$$-U + \mu_n \xi \frac{dn_n}{dx} + \mu_n n_n \frac{d\xi}{dx} + D_n \frac{d^2 n_n}{dx^2} = 0 \tag{2.59ก.}$$

$$-U + \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + \mu_p p_n \frac{d\xi}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \tag{2.59ข.}$$

ในสมการนี้  $U$  คือ อัตราการรวมตัวจากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะข้างมากจะเกิดการปรับตัวดังเช่น  $(n_n - n_{no}) = (p_n - p_{no})$  ซึ่งเป็นไปตาม  $dn_n / dx = dp_n / dx$  นำ  $\mu_p p_n$  คูณกับสมการที่ (2.59ก.) และ  $\mu_n n_n$  คูณกับสมการที่ (2.59ข.) แล้วนำไปใช้รวมกับความสัมพัทธ์ของไอส์ไตน์  $D = (kT / q)\mu$  จะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \frac{n_n - p_n}{(n_n / \mu_p) + (p_n / \mu_n)} \xi \frac{dp_n}{dx} + D_a \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \tag{2.60}$$

ซึ่ง

$$D_a = \frac{n_n + p_n}{(n_n / D_p) + (p_n / D_n)} \quad (2.61)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะคู่ (ambipolar) คือ

$$\tau_p = \frac{p_n - p_{no}}{U} \quad (2.62)$$

จากข้อสมมติฐานการฉีดกระแสระดับต่ำ [ $p_n \ll (n_n \approx n_{no})$ ] ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สมการที่ (2.60) ลดรูปสมการลงจะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (2.63)$$

ถ้าไม่คิดพจน์  $\mu_p p_n d\xi / dx$  แล้วสมการที่ (2.61) ก็เหมือนกับสมการที่ (2.59ข.) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ นอกบริเวณพ่วงพาหะจะไม่มีสนามไฟฟ้า, จากสมการที่ (2.63) จะได้

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{no}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (2.64) กับเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (2.58ข.) และ  $p_n(x = \infty) = p_{no}$ , จะได้ว่า

$$p_n(x) - p_{no} = p_{no} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) \quad (2.65)$$

ซึ่ง

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.66)$$

ที่  $x = W_{Dn}$  กระแสแพร่ซึมของโฮลคือ

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{W_{Dn}} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.67ก.)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในด้านพีคือ

$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{-W_{Dn}} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.67ข.)$$

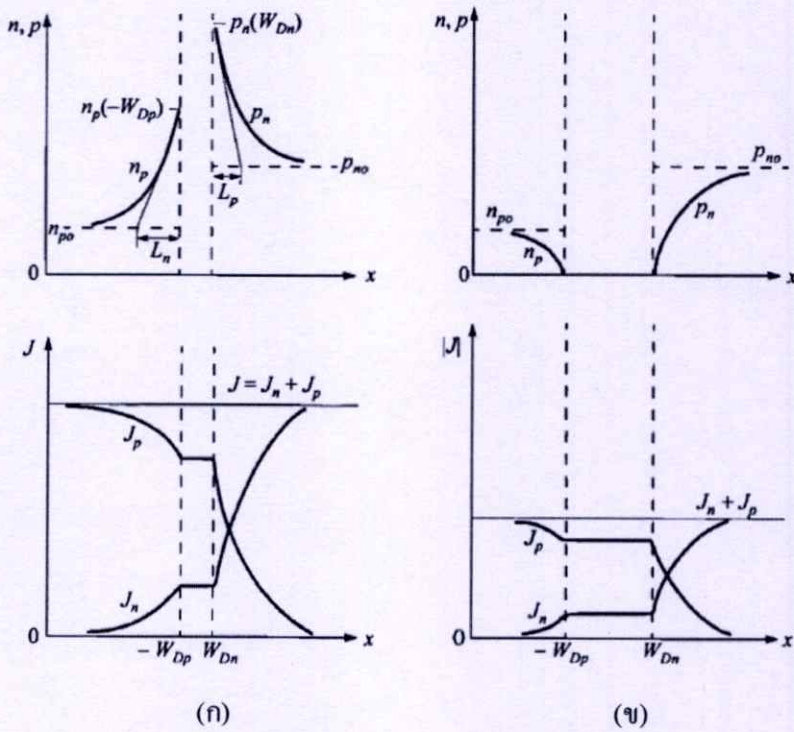
ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย และความหนาแน่นของกระแสภายใต้ไบแอสตรง และไบแอสกลับทาง แสดงไว้ในรูปที่ 2.31 เป็นที่น่าสนใจที่จะต้องกล่าวว่ากระแสโฮลจะถูกฉีดจากด้านพีไป

ด้านอื่น แต่ขนาดของกระแสโฮลจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์  $D_p, L_p$  และ  $p_{no}$  ที่อยู่ในด้านอื่น ส่วนการฉีดกระแสอิเล็กตรอนก็คล้ายคลึงกับกระแสโฮลเช่นเดียวกัน

ผลรวมของกระแสโฮลและอิเล็กตรอนได้จากการนำสมการที่ (2.67ก.) และ (2.67ข.) มารวมกันจะได้

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.68)$$

$$J_0 = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \equiv \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (2.69)$$



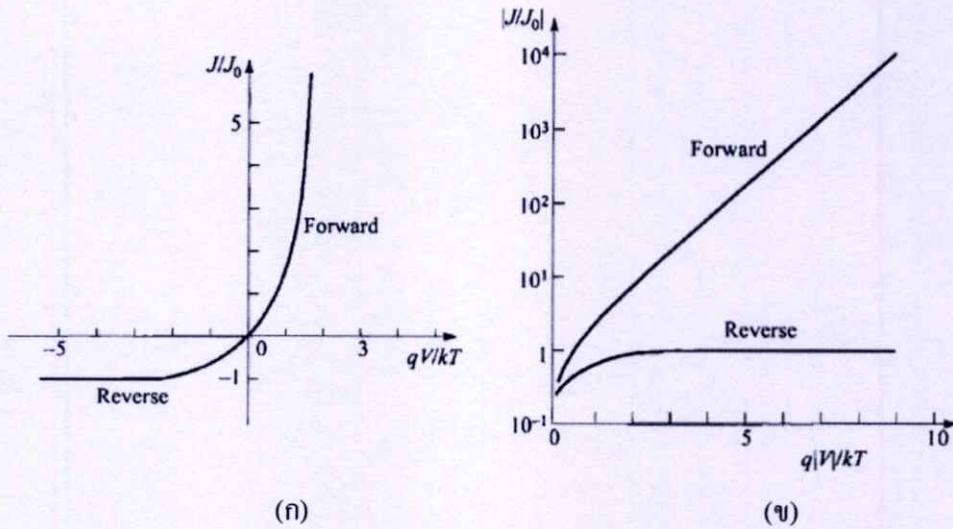
รูปที่ 2.31 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ

ก. เจ็อนไซไบแอสตรง

ข. เจ็อนไซไบแอสกลับทาง

สมการที่ (2.68) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของชอกก์เลย์ซึ่งเป็นกฎของไดโอดอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงไว้ในรูปที่ 2.32 (ก) และ 2.32 (ข) โดยเขียนกราฟแบบเชิงเส้นและแบบกึ่งลอการิทึมตามลำดับ ทางด้านไบแอสตรง (แรงดันไฟบวก

ทางด้านพี) สำหรับ  $V > 3kT/q$  จากรูปที่ 2.32 (ข) อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสจะเป็นแบบเชิงเส้นที่ 300 เคลวิน ที่ทุกๆ 10 มิลลิแอมป์, แรงดันจะเท่ากับ 59.5 มิลลิโวลต์ ( $2.3kT/q$ ) ส่วนทางด้านไบแอสกลับทางกระแสอิ่มตัวที่  $-J_0$



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ

ก. กราฟเชิงเส้น

ข. กราฟกึ่งลอการิทึม

พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว  $J_0$  พจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ของสมการที่ (2.69) มีลักษณะคล้ายกันดังนั้นเราจะพิจารณาเฉพาะพจน์ที่ 1 เท่านั้นก็เป็นการเพียงพอ สำหรับกรณีรอยต่อ  $p^+ - n$  แล้ว  $p_{no} \gg n_{po}$ , ปริมาณ  $n_i, D_p, p_{no}$  และ  $L_p (\equiv \sqrt{D_p \tau_p})$  จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้า  $D_p / \tau_p$  แปรตรงกับ  $T^\gamma$  ที่  $\gamma$  เป็นค่าคงที่แล้ว

$$J_0 \approx \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \approx q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \propto T^{\gamma/2} \left[ T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \right] \propto T^{(3+(\gamma/2))} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.70)$$

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

### 2.9.3 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะอิสระ (generation - recombination process)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการเกิดกระแสของพาหะอิสระภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง เนื่องจากขณะไบแอสกลับทางจะมีปริมาณพาหะอิสระน้อยมาก ( $pn \leq n_i^2$ ) กระบวนการเกิดพาหะอิสระจึงมาจากกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและปลดปล่อยโฮลออกมาจากกับดักประจุ อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้จากทฤษฎีของชอกล์เลย์-รีด-ฮอลล์ (SRH relation) โดยมีเงื่อนไขว่า  $p \leq n_i$  และ  $n \leq n_i$  และจะได้อัตราการทรานซิชันสุทธิ (net transition rate) คือ

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_i}{\sigma_n \exp[(E_t - E_i)/kT] + \sigma_p \exp[(E_i - E_t)/kT]} \right\} n_i \equiv - \frac{n_i}{\tau_g} \quad (2.71)$$

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

ซึ่ง

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

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

$$J_{ge} = \int_0^{W_D} q|U|dx \approx q|U|W_D \approx \frac{qn_i W_D}{\tau_g} \quad (2.72)$$

เมื่อ  $W_D$  คือ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ ถ้าช่วงชีวิตของการเกิดพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเล็กน้อย แล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะจะขึ้นกับอุณหภูมิตามค่า  $n_i$  ดังนั้นที่อุณหภูมิใดๆ  $\tau_{ge}$  จะแปรตามความกว้างของบริเวณพร่องพาหะซึ่งจะขึ้นกับแรงดันไบแอส

สำหรับรอยต่อฉนวน

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/2} \quad (2.73)$$

สำหรับรอยต่อเชิงเส้น

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/3} \quad (2.74)$$

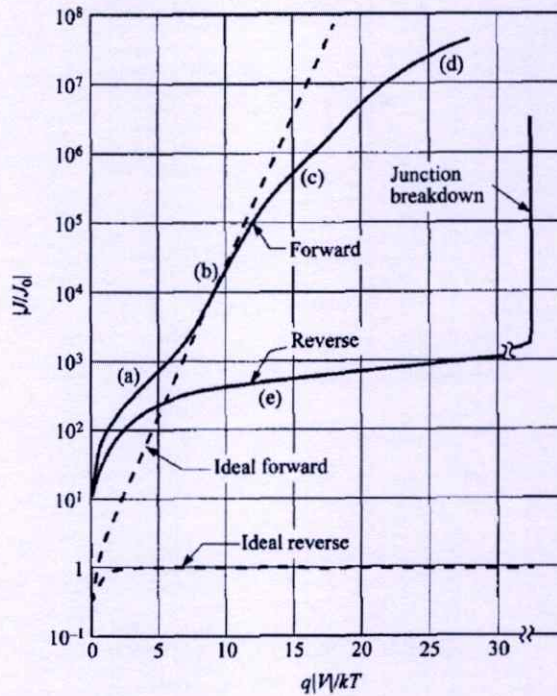
กระแสรวมขณะไบแอสกลับทาง (สำหรับ  $p_{no} \gg n_{po}$  และ  $|V| > 3kT/q$ ) สามารถหาได้จากผลรวมของกระแสแพร่ซึมที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะกับกระแสที่เกิดจากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะ

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_i W_D}{\tau_g}} \quad (2.75)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่  $n_i$  มีค่ามาก (เช่น เซอร์มาเนียม) กระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่นที่อุณหภูมิห้อง และกระแสไบแอสกลับทางจะเป็นไปตามสมการชอคเลย์ แต่ถ้า  $n_i$  มีค่าน้อยๆ (เช่น ซิลิคอน) กระบวนการเกิดพาหะจะมีบทบาทโดดเด่นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.33, เส้นโค้ง (จ) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอกระแสแพร่ซึมจะมีบทบาทโดดเด่น

ภายใต้ไบแอสตรงกระบวนการเกิด - การรวมตัวของพาหะในบริเวณพร่องพาหะเป็นกระบวนการจับพาหะผ่านกับดักประจุ เราจะได้กระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะนอกเหนือไปจากกระแสแพร่ซึม เมื่อแทนสมการที่ (2.54) ลงในสมการที่ (2.71) จะได้

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{\sigma_n \{n + n_i \exp[(E_i - E_i)/kT]\} + \sigma_p \{p + n_i \exp[(E_i - E_i)/kT]\}} \right\} \quad (2.76)$$



รูปที่ 2.33 ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน

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

ภายใต้สมมติฐาน  $E_i = E_i$  และ  $\sigma_n = \sigma_p = \sigma$  สามารถลดรูปสมการที่ (2.76) ได้ดังนี้

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n + p + 2n_i}$$

$$= \left\{ \frac{\sigma v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n_i \left\{ \exp[(E_{Fn} - E_i)/kT] + \exp[(E_i - E_{Fp})/kT] + 2 \right\}} \right\} \quad (2.77)$$

$U$  มีค่าสูงสุดอยู่ในบริเวณพร่องพาหะ เมื่อ  $E_i$  อยู่ที่ระดับครึ่งทางระหว่าง  $E_{Fn}$  และ  $E_{Fp}$  ดังนั้นตัวหารของสมการที่ (2.77) กลายเป็น  $2n_i [\exp(qV/2kT) + 1]$  ที่  $V > kT/q$  จะได้

$$U \approx \frac{1}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.78)$$

และ

$$J_{re} = \int_0^{W_D} qU dx \approx \frac{qW_D}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \approx \frac{qW_D n_i}{2\tau} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.79)$$

สมการที่ (2.79) เป็นการประมาณว่าบริเวณพ่องพาหะเกือบทั้งหมดมีอัตราการรวมตัวของพาหะได้สูงสุด ซึ่งจะได้ค่า  $J_{re}$  สูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นสมการที่ (2.80) จะให้ผลน่าเชื่อถือมากกว่าดังนี้ คือ

$$J_{re} = \int_0^{W_D} qU dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kT n_i}{\tau \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.80)$$

ที่  $\xi_0$  คือ สนามไฟฟ้าที่บริเวณที่มีอัตราการรวมตัวสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{qN(2\psi_B - V)}{\epsilon_s}} \quad (2.81)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะแปรตรงกับ  $n_i$  ผลรวมของกระแสไบแอสตรงสามารถหาได้จากผลรวมของสมการที่ (2.68) และสมการที่ (2.80) สำหรับรอยต่อ  $p^+ - n$  ( $p_{no} \gg n_{po}$ ) และ  $V \gg kT/q$

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kT n_i}{\tau_p \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.82)$$

ผลการทดลองทั่วไปสามารถแสดงในรูปแบบดังนี้ คือ

$$J_F \propto \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.83)$$

โดยที่แฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 2 เมื่อมีกระบวนการรวมตัวของพาหะโดดเด่นกว่า (รูปที่ 2.33, เส้นโค้ง (ก)) และแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีกระแสแพร่ซึมโดดเด่นกว่า (รูปที่ 2.33, เส้นโค้ง (ข)) เมื่อกระแสของการรวมตัวของพาหะและกระแสแพร่ซึมมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติจะมีค่าระหว่าง 1 และ 2

### 2.9.4 ความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance)

ค่าความจุของบริเวณพร่องพาหะที่ศึกษามาก่อนหน้าจะถือว่าเป็นความจุทั้งหมดของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับการไบแอสกลับทาง แต่ถักรอยต่อพี-เอ็นได้รับการไบแอสตรง จะมีค่าความจุอีกส่วนหนึ่งเพิ่มเติมเข้ามา เนื่องจากพาหะข้างน้อยซึ่งจะเรียกความจุนี้ว่าความจุแพร่ซึม หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง ความจุแพร่ซึมเกิดจากการฉีดประจุของพาหะข้างน้อยผ่านรอยต่อ ส่วนความจุที่วัดภายใต้ไบแอสกลับทางจะเป็นความจุของประจุค้างในบริเวณพร่องพาหะ เมื่อทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็ก (small ac signal) ให้กับรอยต่อพร้อมกับแรงดันไฟตรงขนาด  $V_0$  และความหนาแน่นของกระแสไฟตรงขนาด  $J_0$  เราจะได้ว่าแรงดันรวมและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมจะนิยามดังนี้ คือ

$$V(t) = V_0 + V_1 \exp(j\omega t) \quad (2.84)$$

$$J(t) = J_0 + J_1 \exp(j\omega t) \quad (2.85)$$

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

$$Y \equiv \frac{J_1}{V_1} \equiv G_d + j\omega C_d \quad (2.86)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ขอบของบริเวณพร่องพาหะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.58ก.) และ (2.58ข.) โดยการแทน  $V_0$  ด้วย  $V_0 + V_1 \exp(j\omega t)$

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

$$\begin{aligned} p_n(W_{Dn}) &= p_{no} \exp\left\{\frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT}\right\} \\ &\approx p_{no} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \frac{p_{no}qV_1}{kT} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \exp(j\omega t) \approx p_{no} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \tilde{p}_n(t) \end{aligned} \quad (2.87)$$

ส่วนรอยต่อด้านพี (p-side) จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังสมการ

$$n_p(W_{Dp}) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + n_p(t) \quad (2.88)$$

พจน์แรกของสมการที่ (2.87) คือ ความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากแรงดันไบแอสตรง ( $V_0$ ) ส่วนพจน์ที่สองเป็นความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าสลับ จากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ที่กล่าวว่า

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial \xi}{\partial x} - \mu_p \xi \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (2.89)$$

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

$$j\omega \tilde{p}_n = -\frac{\tilde{p}_n}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} \quad (2.90)$$

หรือ

$$\frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} - \frac{\tilde{p}_n}{D_p \tau_p / (1 + j\omega \tau_p)} = 0 \quad (2.91)$$

สมการที่ (2.91) จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.64) ถ้ากำหนดให้ช่วงชีวิตพาหะเป็นดังนี้

$$\tau_p^* = \frac{\tau_p}{1 + j\omega \tau_p} \quad (2.92)$$

และสามารถหาความหนาแน่นของกระแสได้จากสมการที่ (2.67) และจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม

$$\begin{aligned} J &= \left( q p_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + q n_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \exp \left\{ \frac{q [V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ &\approx \left( q p_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + q n_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \left[ \exp \left( \frac{q V_0}{kT} \right) \right] \left[ 1 + \frac{q V_1}{kT} \exp(j\omega t) \right] \quad (2.93) \end{aligned}$$

ความหนาแน่นไฟฟ้ากระแสสลับ  $J_1$  คือ

$$J_1 = \left( \frac{q D_p p_{no} \sqrt{1 + j\omega \tau_p}}{L_p} + \frac{q D_n n_{po} \sqrt{1 + j\omega \tau_n}}{L_n} \right) \left[ \exp \left( \frac{q V_0}{kT} \right) \right] \frac{q V_1}{kT}$$

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

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

$$G_{d0} = \frac{q}{kT} \left( \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \right) \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \quad \text{mho/cm}^2 \quad (2.94)$$

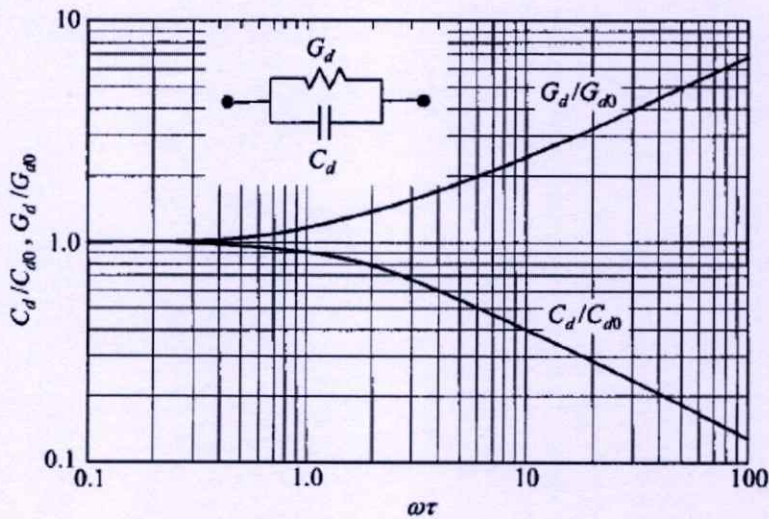
ที่ความถี่ต่ำความจุแพร่ซึมสามารถคำนวณได้โดยใช้การประมาณค่า  $\sqrt{1+j\omega\tau} \approx (1+0.5j\omega\tau)$

$$C_{d0} = \frac{q^2}{2kT} (L_p p_{no} + L_n n_{po}) \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.95)$$

ค่าความจุแพร่ซึมนี้จะแปรตามแรงดันไบแอสตรงสำหรับรอยต่อ  $n^+ - p$  จะได้ว่า

$$C_{d0} = \frac{qL_n^2}{2kTD_n} J_F \quad (2.96)$$

ความจุแพร่ซึมและความนำแพร่ซึมที่ขึ้นอยู่กับความถี่จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.34 ซึ่งแกนนอนจะเป็นค่า  $\omega\tau$



รูปที่ 2.34 แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ  $\omega\tau$  พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง

วงจรสมมูลของไฟฟ้ากระแสสลับแอดมิตแดนซ์จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.34 ด้วย เพื่อแสดงว่าค่าความจุแพร่ซึมจะลดลงเมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความถี่สูงๆ  $C_d$  จะสัมพันธ์กับ  $\omega^{-1/2}$

นอกจากนี้ความจุแพร่ซึมยังแปรตามไฟฟ้ากระแสตรง  $\propto \exp(qV_0 / kT)$  เพราะฉะนั้น  $C_d$  จึงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ต่ำ และภายใต้สภาวะไบแอสตรง

## 2.10 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์

[13-14, 16, 20, 28, 30-33]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.35 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสที่ขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแสยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบแอสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.97)$$

เมื่อ  $J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.98)$

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

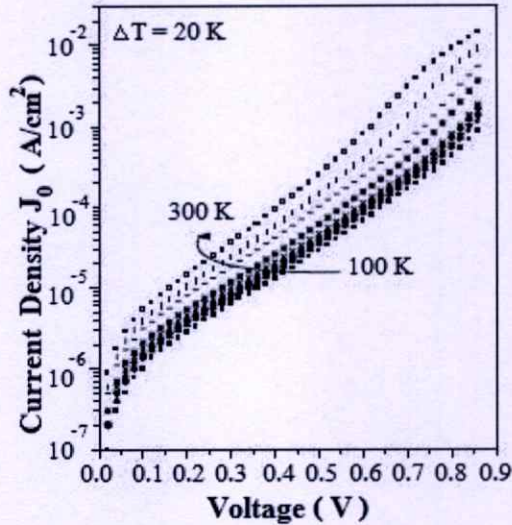
ซึ่ง  $J_{00}$  จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน ( $V_b$ ) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_V \left[ \frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[ \frac{-qV_n}{kT} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.99)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.100)$$

เมื่อ  $S_p$  คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล,  $N_v$  ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ( $\phi_p^0$ ) คือค่าแฟกต์ยกซ์วางกัน โฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อคังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  ที่แปรตามอุณหภูมิ

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

### 2.10.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุคังและที่บริเวณผิวรอยต่อ

ชอกล์เลย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกัณฑ์ประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

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

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างผลึกที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

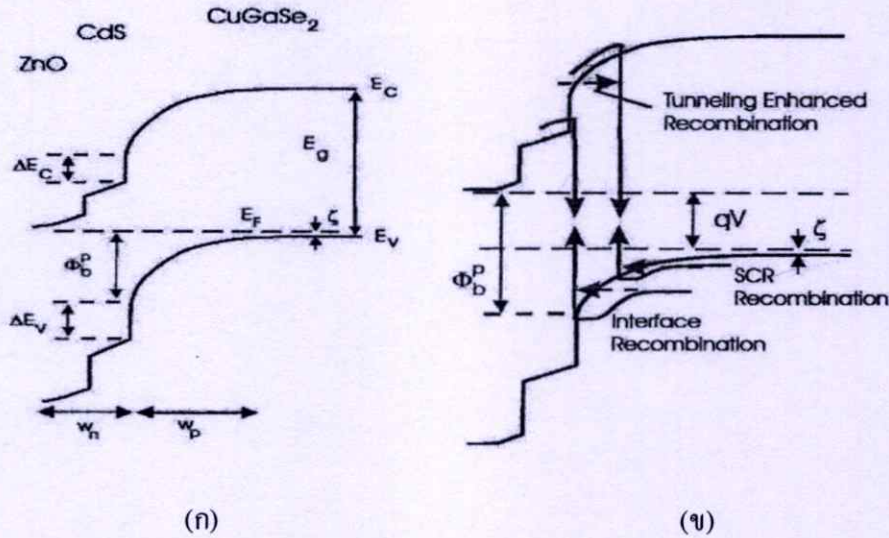
สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น  $p-n^+$ ) ปริมาณ  $N_d > N_A$  กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ  $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$  ซึ่ง  $N_D$  และ  $N_A$  คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ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

### 2.10.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.101)$$

โดยที่  $A$  คือ ความชันของกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับ  $V$  ซึ่งค่าของ  $A$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่าแฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น  $\ln J_0$  จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง  $\ln J_0$  ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อชอตต์กี การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับ โฮลจะชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องกัน จนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้  $J_0$  จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.36 แสดงกลไกผลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย

- ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

กลไกการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.102) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln(J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (2.102)$$

พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $n \ln J_0$  กับ  $1/T$  พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดจากการนำกระแสเกิดจากการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง พลังงานกระตุ้น  $E_a$  นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของตัวดูดกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสงชุด

อุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แฟกเตอร์อุณหคณิตของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.103)$$

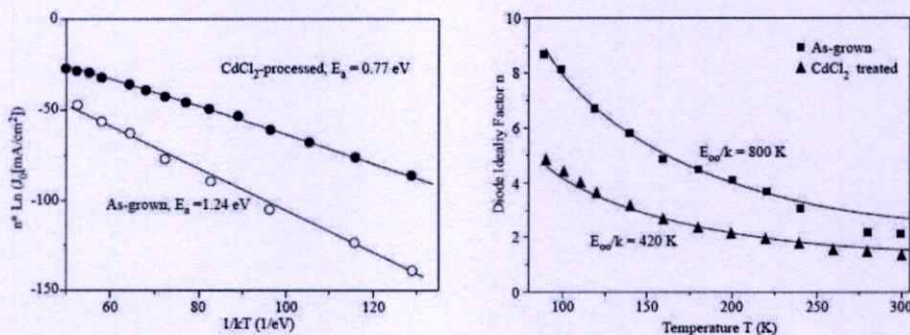
โดย  $E_{00}$  คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม  $E_{00}$  คือ

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.104)$$

เมื่อ  $N_A$  คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ  $\epsilon_s$  คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดุกคลื่นแสง แฟกเตอร์อุณหคณิตของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \quad (2.105)$$

ซึ่ง  $kT^*$  คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.37 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับ  $J_0$  และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่ผ่านการแอนนีสและเมื่อผ่านการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซ  $CdCl_2$

### 2.11 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [6, 13-14, 16, 19-20, 28, 30-33]

อัตราการรวมตัวของพาหะ ( $R$ ) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \tag{2.106}$$

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

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

ซึ่ง  $N_C$  และ  $N_V$  คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกัณฑ์ประจุ,  $n$  และ  $p$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ,  $n_i$  คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิค แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือ โฮล (electron/hole cross section:  $\gamma_{n/p}$ ) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1 + \Gamma)] \tag{2.107}$$

หรือ

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

เมื่อ  $S_{n/p}$  คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กทรอนิกส์ หรือ โฮล,  $\tau_{n/p}$  คือ ค่าชีวิตของอิเล็กทรอนิกส์และโฮลอิสระ ส่วน  $\Gamma$  คือ แฟกเตอร์แก้ไข (correction factor) ของการ ขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\Gamma = 2(3\pi)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ \left( \frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left( \frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.108)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลา ดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (W-x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.109)$$

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

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.110)$$

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

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.94) ร่วมกับสมการ (2.110) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดูคกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.111)$$

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

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*}\right) \quad (2.112)$$

จากสมการที่ 2.112) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ( $n$ ) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดูคกลืนแสงที่มีกักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ  $T^* \rightarrow \infty$  กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี  $E_{00} \rightarrow 0$  จะได้ว่า  $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$  ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกส์เลย์-ริด-ฮอลล์ โดยผ่านกักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนั้นยังได้ฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) สามารถจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.113)$$

เมื่อ  $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ถ้าประมาณว่าทั้ง  $n$ ,  $J_{sc}$  และ  $J_{00}$  ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  และ  $T$  ควรจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันคือ  $-\frac{nk}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right)$  และจุดตัดแกน  $V_{oc}$  (เมื่อ  $T = 0$  เคลวิน) ก็คือค่า  $E_g/q$  ในกรณีของการรวมตัวกันของพาหะโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อโดยไม่มีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องและความสูงของกำแพงศักย์ยังขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าจะได้ว่า  $E_a = \phi_b^p$  ซึ่ง  $\phi_b^p$  ก็คือ  $\phi_b^p$  นั่นเองเมื่อ  $\phi_b^p$  คือกำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่า

ช่องว่างพลังงานของตัวดุกกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ซึ่ง  $V_{oc}$  นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ชอกค์เลย์-รีค-ฮอลล์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องกับ แพกเตอร์ อุณหภูมิของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $T$  ในสมการ (2.113) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.97) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_s$ )

## 2.12 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [13-14, 16, 20, 28, 30-33]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีกรไบแอสกระแสดังรูปที่ 2.38 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอสหรือไม่มีกรไบแอส ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.38 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

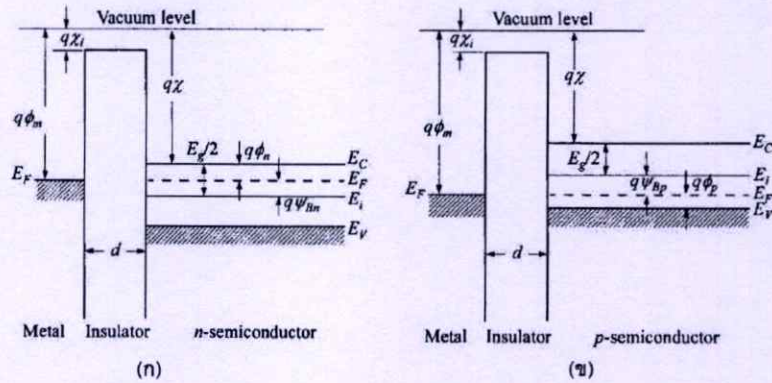
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad (2.114ก)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad (2.114ข)$$

เมื่อ  $\chi, \chi_n$  คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

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

$\phi_n, \phi_p$  คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน

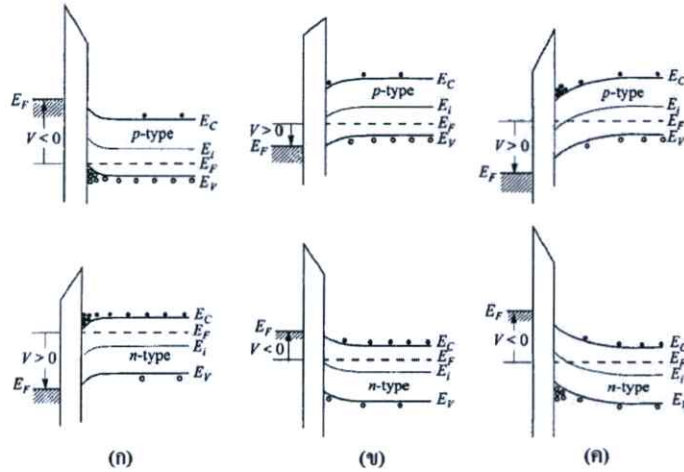


รูปที่ 2.38 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุล เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V=0$ )

ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้น โดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.39 (ก) โดย กรณีแรกตามรูปที่ 2.39(ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟลบให้กับขั้วโลหะ ( $V<0$ ) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ของด้าน โลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการ โค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมขมของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ โดยกรณีนี้จะเรียกว่าบริเวณขมขมพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นไฟบวก ( $V>0$ ) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก ( $E_i$ ) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าบริเวณพร่องพาหะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.39(ข) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มีชนิดอินทรีนสิก ( $E_i$ ) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.39(ค)ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าบริเวณชั้นกลับกลาย (inversion case)

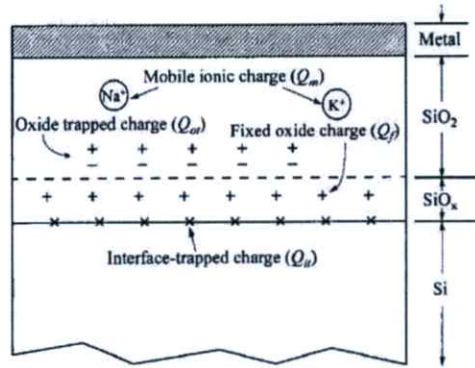


รูปที่ 2.39 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้เกิด

- ก. บริเวณหุมนุมพาหะ
- ข. บริเวณพร่องพาหะ
- ค. บริเวณชั้นกลับกลาย

### 2.13 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน[13, 16, 20-23]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะคงที่ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.40 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) และประจุค้างภายในกัณฑ์ ( $Q_{it}$ ) ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO<sub>2</sub> โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ  $Q_{it}$  จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้น อาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ ( $Q_{ox}$ ) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ ( $Q_{ox}$ ) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอกซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนร้อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



รูปที่ 2.40 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

## 2.14 กับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [13, 16, 20-23]

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

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้ให้

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

$$= \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]} \quad (2.115 \text{ ก})$$

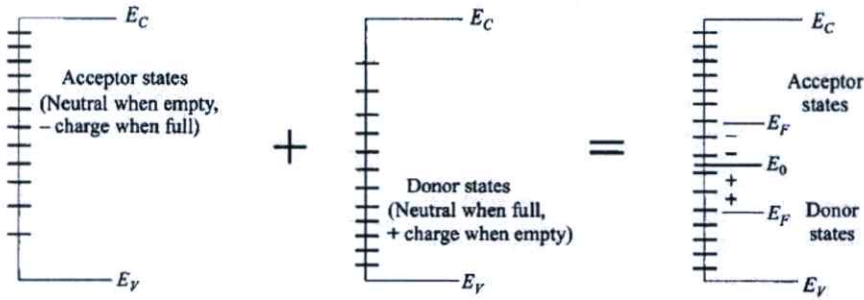
สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้รับ

$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_t - E_F)/kT]} \quad (2.115 \text{ ข})$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$g_D$  คือ สภาวะข้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้ให้

$g_A$  คือ สภาวะข้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้รับ



รูปที่ 2.41 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากรูปที่ 2.41 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ  $E_0$

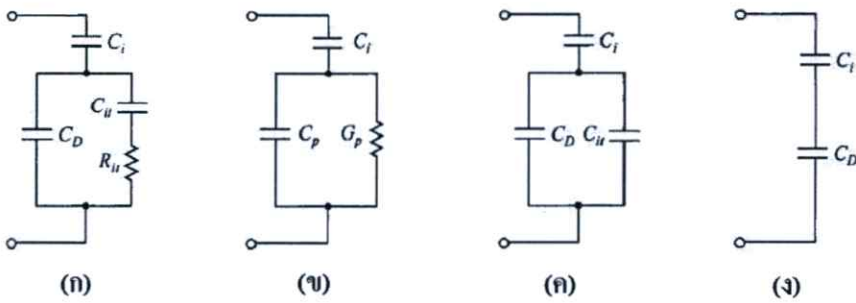
ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\
 &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0
 \end{aligned} \tag{2.116}$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น อนุกรมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \tag{2.117}$$

สมการที่ (2.117) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด  $Q_{it}$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มี ( $E_F$ ) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_s$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.42 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี  $C_{ii}$  และ  $R_{ii}$  ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อยู่ด้วย  
 ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ  
 ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกับดักประจุนี้จะส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน (C-V) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกับดักประจุรวมอยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.42(ก) โดยที่  $C_i$  และ  $C_D$  เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ  $C_{ii}$  และ  $R_{ii}$  คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกับดักประจุซึ่งกับดักประจุนี้เป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ  $C_{ii}R_{ii}$  จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ( $\tau_{ii}$ ) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก  $C_p$  และ  $G_p$  จะต่อขนานกัน ทั้ง  $C_p$  และ  $G_p$  จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกันโดยที่

เมื่อ

$$C_p = C_D + \frac{C_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.118)$$

และ

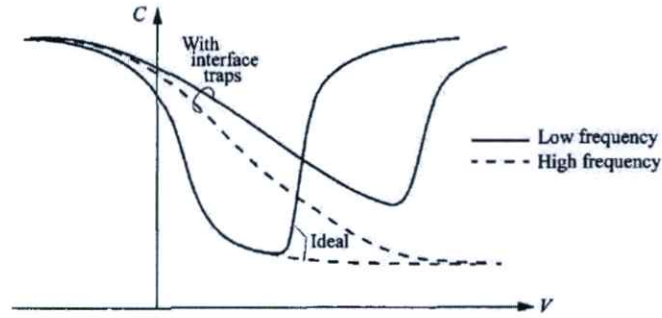
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{ii} \omega \tau_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.119)$$

สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ  $R_{ii}$  ของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.42(ก) จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์แล้ว  $C_D$  จะขนานกับ  $C_{ii}$  ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด  $C_{ii}$  และ  $R_{ii}$  ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนที่ท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

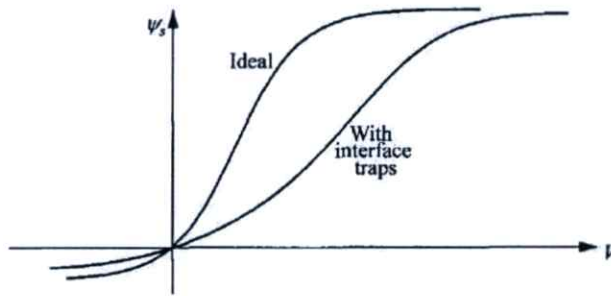
$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ } (C_{LF}) \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{ii})}{C_i + C_D + C_{ii}} \quad (2.120)$$

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง } (C_{HF}) \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.121)$$

รูปที่ 2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ ( $C$ ) กับแรงดัน ( $V$ ) ที่ความถี่สูง และที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ  $C-V$  ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า ( $\psi_s$ ) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า  $\psi_s$  ในรูปที่ 2.40ข. จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\psi_s - V$  สามารถนำไปคำนวณหา  $D_{ii}$  ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า  $C$  ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ  $C$  นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ  $D_{ii}$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.43 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS

ข. แสดงการขี้ออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ  $\psi_s$

## 2.15 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ

[13-14, 16, 20, 28, 30-35]

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการเจือสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ (2.121) และสมการที่ 2.120 จะเขียนได้ว่า

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

$$= \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \quad (2.122)$$

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

$$\begin{aligned} D_{ii} &= \frac{C_i}{q^2} \left[ \left( \frac{1}{\Delta C / C_i + C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} \right] \\ &= \frac{\Delta C}{q^2} \left[ \left( 1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_i} \right)^{-1} - \left( 1 - \frac{C_{HF}}{C_i} \right)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (2.123)$$

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

### 2.15.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโกปี

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ความแตกต่างของของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.40 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพิกค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่เดียวกัน

จากภาพวงจรสมมูลในรูปที่ 2.42(ก) ความจุของฉนวน  $C$  ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการรบกวนพหุอย่างมา ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวน

จะถูกนำไปหักออกจากค่าอิมพีแดนซ์สุดท้ายแล้ววงจรสมมูลจะเป็น  $C_D$  ต่อขนานกันกับ  $R_i C_{ii}$  สำหรับค่า  $\frac{G_p}{\omega}$  ในสมการที่ (2.119) จะไม่มีพจน์  $C_D$  ปรากฏอยู่นั้นคือ  $\frac{G_p}{\omega}$  จะสัมพันธ์กับกับค่าประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแดนซ์ที่วัดได้ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อให้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_m}{G_m^2 + \omega^2 (C_i + C_m)^2} = \frac{C_{ii} \omega \tau_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.124)$$

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

$$D_{it} = \frac{2}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.125)$$

โดยที่  $\frac{G_p}{\omega}$  จะมีหน่วยเป็นฟารัดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.125) นี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุมักมีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q D_{it}}{2\omega \tau_{it}} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2) \quad (2.126)$$

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

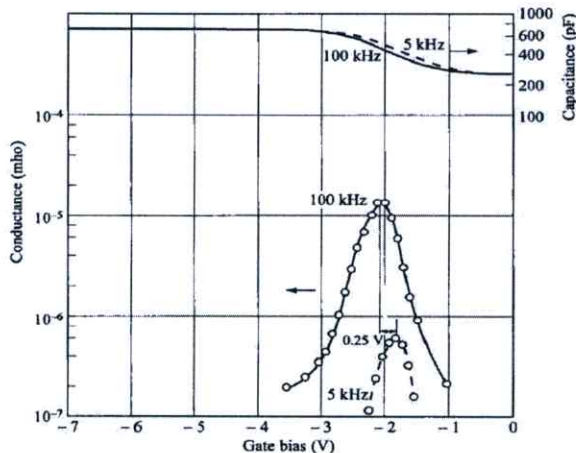
$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{\max}}{0.402q}$$

$$\approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{\max} \quad (2.127)$$

และ

$$\tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_{C,V})^{-1} \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.128)$$

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



รูปที่ 2.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS

## 2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน [13-14, 16, 19-20, 28, 30-35]

### 2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

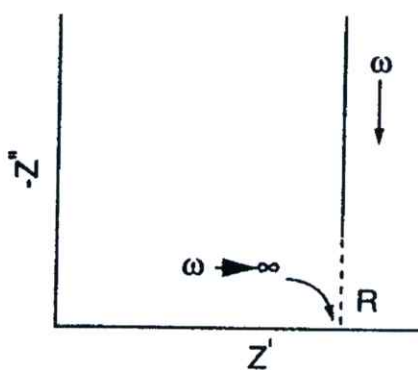
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.129)$$

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

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.130)$$

โดยที่  $R_S$  เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน  $1/\omega C$  เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่ค่า  $R_S$  จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

### 2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

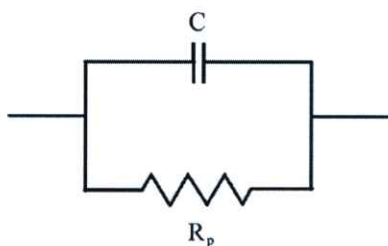
ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.46 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.131)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังรูปที่ 2.46 ดังนั้นสมการ (2.131) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.132)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.133)$$



รูปที่ 2.46 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $1 - j\omega R_p C$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการ (2.100) จะได้

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p(j\omega R_p C - 1)}$$

$$= - \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \right]$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.134)$$

$$Z_{RC} = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right)$$

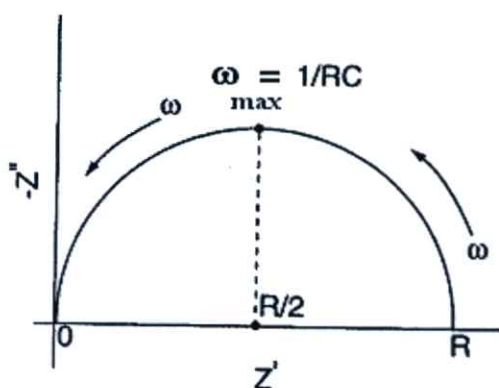
$$= Z' - jZ''$$

โดยที่ 
$$Z' = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.135)$$

และ 
$$Z'' = \frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = R_P \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.136)$$

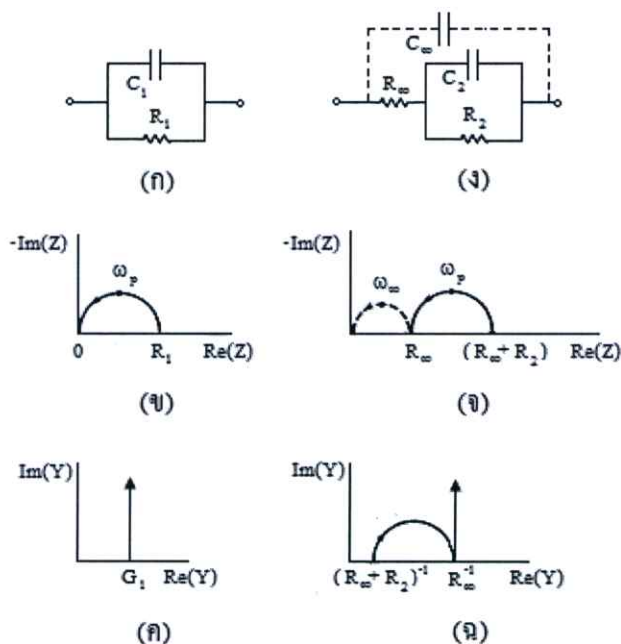
เมื่อ  $\tau = R_P C =$  ค่าคงตัวเวลา (time constant)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ  $\omega = 1/RC$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.48 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี (ข,จ) และ แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโคปี (ค,ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance :  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.48 ส่วน ความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance:  $R_b$ ) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่าคงตัวเวลา  $\tau = R_{\infty} C_{\infty} = R_1 C_1$  ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก ( $\tau_D$ ) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z'$  มีค่าสูงสุด คือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.48(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7}$  วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z'$  ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดคุณสมบัติของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \geq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

นอกจากกรณีที่  $R_1 = R_{\infty}$  และ  $C_1 = C_{\infty}$  ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน  $C_R$  คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณ โพลาริเซชัน

(polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.48(ง) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูปที่ 2.48(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลาคือ  $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$  และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไขปลาดังรูปที่ 2.48(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี 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  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.48(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัทซ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.137)$$

กราฟของสมการที่ (2.137) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.48(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.48(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.138)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.138) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.48(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.48(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

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

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.139)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.140)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.48 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0 และ  $R$

### 2.16.3 กราฟของโบลด์ (Bode plot)

อิมพีแดนซ์  $Z = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในแบบพิกัดตั้งฉาก (rectangular coordinate) และพิกัดเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.49 ดังนี้คือ

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi$$

และ

$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.141)$$

โดยที่ โมดูลัสคือ

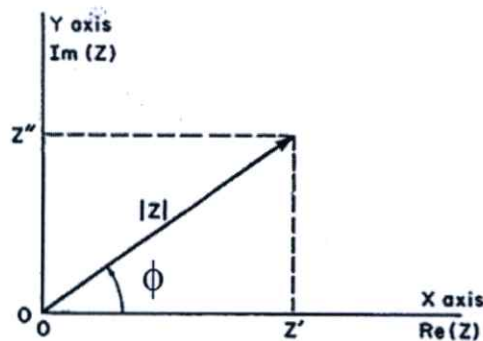
$$|Z| = \left[ (Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.142)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$$

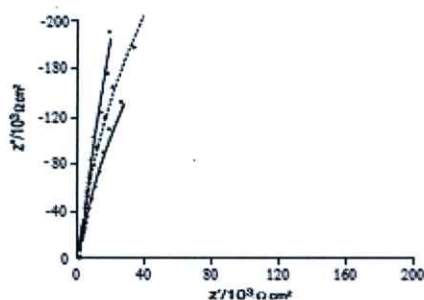
ดังนั้น

$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.143)$$

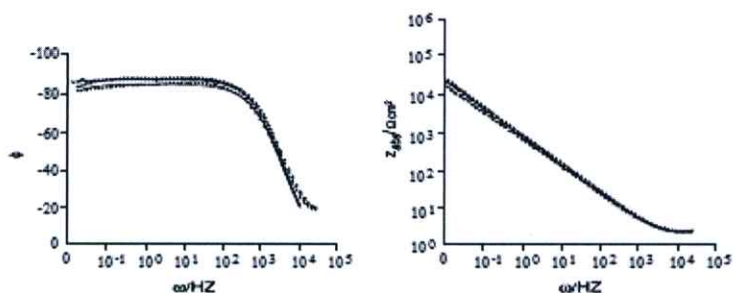


รูปที่ 2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับ โคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส  $\phi = -90$  องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของ โปดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|z|$  กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของ โปดคือ น้ำหนัก(weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของ ไนควิสต์ ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega \rightarrow 0$  แล้วมุมเฟส  $\phi = -90$  องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90$  องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโปดสำหรับอิมพีแดนซ์(Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.49 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.50 แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของ โปด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ P และ n เมื่อ P คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน n เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 \leq n \leq 1$  แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ Z(CPE) จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า และแปรตาม  $\omega^{-n}$  ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(i\omega)^n} \quad (2.144)$$

ส่วนความจุสองชั้น (double-layer capacitance:  $C_{dl}$ ) เนื่องจากบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้ว อิเล็กโทรดจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = \sqrt[n]{\frac{P}{R_s(n-1)}} \quad (2.145)$$

พารามิเตอร์  $P$  จะสัมพันธ์กับมุมเฟส  $\phi$  ดังนี้คือ  $\phi = n\left(\frac{\pi}{2}\right)$  ถ้ามุมเฟส  $\phi$  เข้าใกล้ 1 ก็จะประพฤติตัว เป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์ โดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

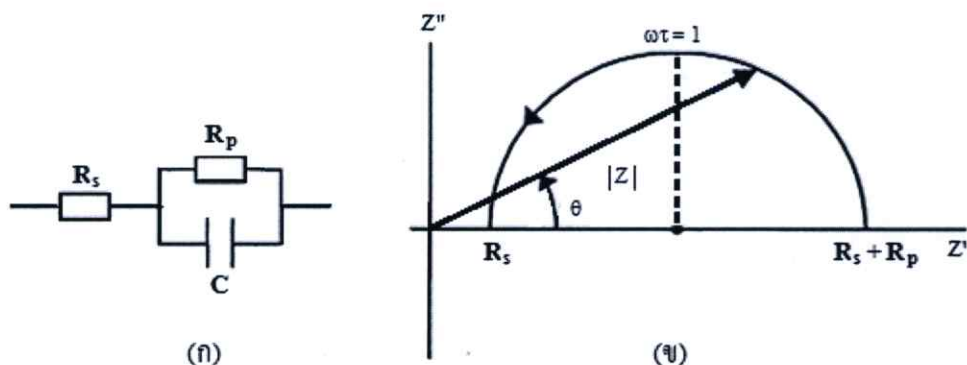
#### 2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ [13,17,27-28]

พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความจุของรอยต่อความต้านทานชั้นที่ และความต้านทานอนุกรมสามารถหาคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ขณะทำการวัด จะต้องป้อนแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก (small ac signal) แล้วทำการบันทึกว่าค่ากระแสสลับ จากนั้นอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V \sin \omega t}{I \sin (\omega t + \phi)} = Z' - jZ'' \\ &= \frac{1}{G} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \end{aligned} \quad (2.146)$$

เมื่อ  $Z' = \frac{1}{G}$  และ  $Z'' = \frac{1}{\omega C}$

$G$  คือความนำไฟฟ้า (conductance) ซึ่ง  $G = \frac{1}{R}$  และ  $\phi$  คือมุมเฟสระหว่างแรงดันไบแอสกับ กระแสสลับ วงจรสมมูลแบบง่ายสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงดังรูปที่ 2.51 โดยที่  $R_p$  คือความต้านทานชั้นที่หรือความต้านทานขนาน (parallel resistor),  $C$  คือ ความจุของรอยต่อและ  $R_s$  คือ ความต้านอนุกรมของวงจร



รูปที่ 2.51 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว

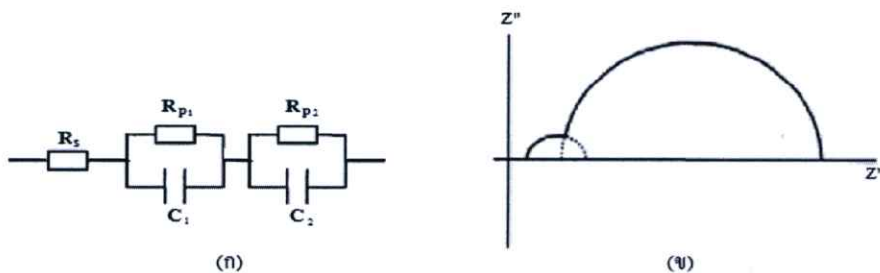
จากกราฟของไนควิสต์จะได้จุดศูนย์กลางของครึ่งทรงกลมจะอยู่บนแกน  $Z'$  โดยมีรัศมีเท่ากับ  $\frac{R_p}{2}$  จุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่  $R_s$  และ  $R_s + R_p$  ส่วน  $Z''$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$Z'' = R_p = \frac{1}{\omega_{\max} C} \tag{2.147}$$

ค่าความจุ  $C$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.147) จากวงจรสมมูลจะมีส่วนของ RC ที่ต่อขนานกัน 1 ชุด ส่งผลให้ได้รูปครึ่งวงกลมซึ่งจะมีค่าคงตัวเวลา 1 ค่า ดังสมการ

$$\omega_{\max} = \tau^{-1} = (R_p C)^{-1} \tag{2.148}$$

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) ต่อกันเหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdTe วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.52(ก) ส่วนสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่าจะแสดงในรูปที่ 2.52(ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้น ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง



รูปที่ 2.52 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์(ข)

แบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษานี้ ซึ่งเป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น เกรนและขอบของเกรน เป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน  $Z'$  (ดังรูปที่ 2.53(ข)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย  $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$  ซึ่งอิมพีแดนซ์ของอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะแสดงในสมการ(2.149) ดังนี้คือ

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(j\omega)^n}$$

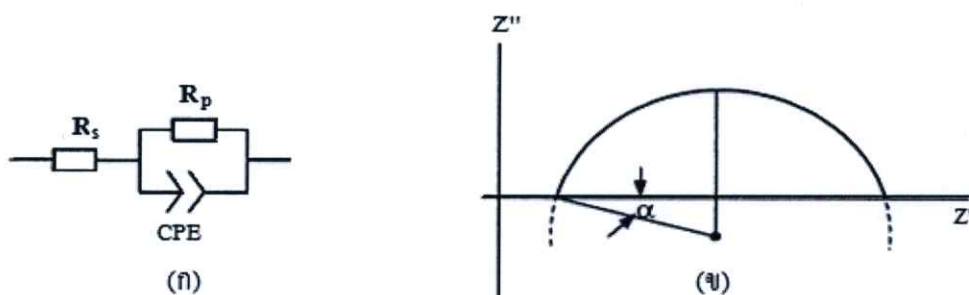
อิลีเมนต์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R,C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า n และ P ดังนั้นคือ

$$P = C^n (R_s^{-1} + R_p^{-1})^{1-n} \quad (2.149)$$

ถ้า  $n = 1$  แล้ว  $Z(\text{CPE})$  จะประพฤติเป็นตัวเก็บประจุในอุดมคติ แต่ถ้า  $n = 0$  แล้ว  $Z(\text{CPE})$  จะเท่ากับ  $R_s^{-1} + R_p^{-1}$  ซึ่งถ้า n มีค่าแตกต่างไปจาก 1 มากๆ แสดงว่าตัวเก็บประจุมีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมาก ส่วนมุมกด (depression angle:  $\alpha$ ) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{\pi}{2}(1-n)$$

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.53 แสดงแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ก) และกราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัว (ข)

### 2.16.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี [13-14, 16, 19-20, 28, 30-35]

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประจุที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่  $\omega$  ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.150)$$

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) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับพื้น ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจากพาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริกดังสมการ

$$\tau_D = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2.151)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือสภาพนำไฟฟ้าและ  $\epsilon$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก แต่ถ้าความถี่สูงกว่าค่า  $\frac{1}{\tau_D}$  แล้วพาหะข้างมากจะไม่ตอบสนองต่อความถี่และถ้าความถี่ยิ่งสูงขึ้นไปอีก สารกึ่งตัวนำนี้จะประพฤติตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า และ  $C$  จะมีค่าลดลงจนกลายเป็นความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่าขึ้นกับรูปทรงของสารตัวอย่างซึ่งเรียกว่า ความจุเรขาคณิต ความถี่การผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (dielectric relaxation frequency) ของความจุเรขาคณิตนี้ จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารตัวอย่างได้ถ้า  $\sigma$  เปลี่ยนตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในสารตัวอย่างที่เป็นสารพหุพันธ์ (polycrystalline materials) พลังงานการกระตุ้น (activation energy) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายพาหะอิสระซึ่งถูกจำกัดโดยกำแพงศักย์ที่อยู่ภายในเกรนหรือที่บริเวณรอยต่อเกรน (grain-boundaries)

รอยต่อชนิดดีก็ก็เป็นรอยต่อที่ง่ายสุด ความจุของรอยต่อนี้เกิดขึ้นที่บริเวณพร่องพาหะส่วนรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe จะประมาณว่าเป็นรอยต่อ  $n^+p$  โดยความจุของรอยต่อนี้จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{SCR} = \frac{\epsilon_s}{W} = \left( \frac{\epsilon_s q N_a}{2V_{bi}} \right)^2 \frac{1}{\sigma} \quad (2.152)$$

เมื่อ  $W$  คือความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะ,  $N_A$  คือความหนาแน่นของผู้รับ,  $\epsilon_s$  คือคงที่ไดอิเล็กทริก และ  $V_{bi}$  คือแรงดันในตัว (built-in voltage) กับดักประจุที่อยู่ในบริเวณพร่องพาหะก็มีผลต่อความจุของรอยต่อด้วยกล่าวคือกับดักประจุที่มีพลังงานเท่ากับระดับพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอน ( $E_F^n$ ) หรือของโฮล ( $E_F^p$ ) กับดักประจุนั้นจะมีการให้ประจุและมีการคายประจุ (charging and discharging) สำหรับกับดักประจุนิดเดียว (single trap) จะส่งผลทำให้ความจรวมเป็นดังนี้คือ

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{if} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^*{}^2} \quad (2.153)$$

เมื่อ  $C_{if}$  คือค่าความจุที่ความถี่ต่ำซึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นกับดักประจุ (trap density :  $N_T$ ) และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_A$ ) ส่วน  $\tau^*$  คือค่าคงตัวเวลา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $N_T$ ,  $N_A$  และ  $W$  ของบริเวณปลอดพาหะในกรณี  $N_T \ll N_A$  ค่าคงตัวเวลา  $\tau^*$  จะมีค่าเข้าใกล้ค่า  $\tau^* = \tau_0 = \frac{1}{\omega_0}$

เมื่อ  $\omega_0$  คือความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\omega_0 = 2N_V v_{th} \sigma_p \exp\left(-\frac{E_T - E_V}{kT}\right) \quad (2.154)$$

โดยที่  $N_V$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์,  $v_{th}$  คือ ความเร็วของโฮลเนื่องจากพลังงานความร้อน,  $E_T$  คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ และ  $\sigma_p$  คือ ความน่าจะเป็นหรือ ภาคตัดขวางของการจับ โฮล (capture cross section of hole) แต่เนื่องจาก  $N_V$  และ  $v_{th}$  ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น สมการ (2.154) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.154)$$

เมื่อ  $E_T - E_V = E_a$  ซึ่งก็คือขนาดของระดับพลังงานกับดักประจุเมื่อเทียบกับขอบของแถบวาเลนซ์ และนิยมเรียก  $E_a$  ว่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นกับดักประจุจะสามารถจับประจุหรือคายประจุได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของการวัด  $\omega$  มีค่าน้อยกว่า  $\omega_0$  นั่นคือ  $\omega_0$  จะสัมพันธ์กับอัตราการคายประจุของกับดักประจุนั้นเอง ส่วน  $\xi_0$  เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการคายโฮลออกจากกับดักประจุซึ่ง  $\xi_0$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม  $\xi_0$  คงยังขึ้นกับ  $E_a$  ดังความสัมพันธ์

$$\xi_0 = \xi_{00} \exp\left(\frac{E_a}{E_{00}}\right) \quad (2.155)$$

เมื่อ  $\xi_{\omega_0}$  และ  $E_{\omega_0}$  คือค่าคงที่ของกลไกการขูดจูงโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์

ในกรณีที่กักขังประจุไม่เป็นกักขังประจุชนิดเดียว แต่จะเป็นกักขังประจุชนิดที่มีระดับพลังงานจำนวนมาก การแจกแจง (distribution of trap) กักขังประจุ ( $N_T$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ [25-26]

$$N_T(\omega) = c(E_\omega) \frac{\omega}{kT} \frac{dC(\omega)}{d \ln \omega} = \frac{c(E) dC(\omega)}{kT d \ln \omega} \quad (2.156)$$

ฟังก์ชัน  $c(E_\omega)$  จะครอบคลุมการแจกแจงความหนาแน่นของกักขังประจุ ซึ่งจะขึ้นกับตำแหน่งของระดับพลังงานของกักขังประจุ ถ้าแทนสมการ (2.155) ลงในสมการ (2.151) และเปลี่ยนตัวแปร  $E_u$  เป็น  $E_\omega$  จะได้ว่า

$$E_\omega = \frac{kTE_{\omega_0}}{E_{\omega_0} - kT} \ln\left(\frac{\xi_{\omega_0} T^2}{\omega}\right) \quad (2.157)$$

ซึ่ง  $E_\omega$  ของสมการที่ (2.157) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน  $E_u$  จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกักขังประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงที่เวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F^N$ ) หรือ ( $E_F^P$ ) จะหาได้จากความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง  $\omega_0$  สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ  $C(\omega)$  ค่าพลังงานกระตุ้นของ  $\omega_0$  จะขึ้นกับแรงดันไบอัสโดยที่แรงดันไบอัสจะเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F^N$ ) หรือ ( $E_F^P$ ) เว้นเสียแต่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะพลังงานระหว่างผิวรอยต่อที่สูงมาก จากแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากสมการ (2.149) ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  ที่สอดคล้องกับ  $\tau_D$  จะแสดงได้ดังสมการ

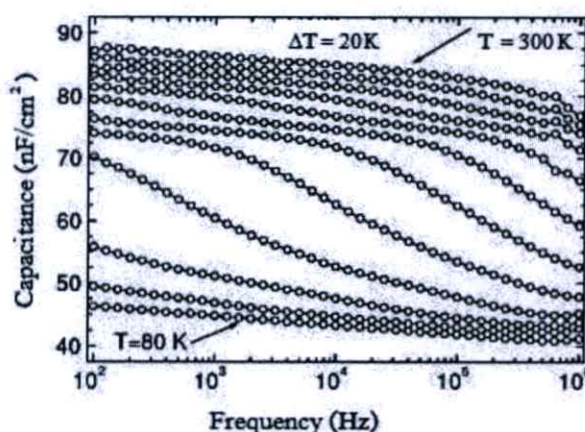
$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

พิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ความถี่เชิงมุม  $\omega$  ที่ใช้ในการวัด  $\omega$  มีค่ามากกว่า  $\omega_D$  ( $\omega > \omega_D$ ) พหะอิสระไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุจากชนิดคือ

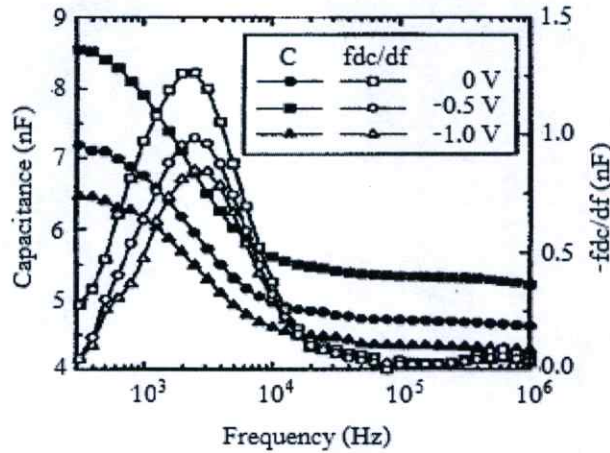
$$C_{geo} = \frac{\epsilon_s}{d} \tag{2.158}$$

เมื่อ  $d$  คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ความถี่เชิงมุม  $\omega_D$  จะมีค่าสูงกว่า  $\omega$  และถ้ามีกับดักประจุอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่สอดคล้องกับความถี่เบี่ยงเบน  $\omega_0$  สถานการณ์ใดสถานการณ์หนึ่งต่อไปนี้จะเกิดขึ้น

1. สำหรับ  $\omega_0 < \omega < \omega_D$  เราจะวัดได้แต่เฉพาะค่า  $C_{SCR}$  แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เคลวินไปเป็น 300 เคลวิน การทรานซิชั่นครั้งที่ 2 ของความจุเกิดขึ้นโดยเปลี่ยนจาก  $C_{SCR}$  ไปเป็น  $C_{if}$  ที่ความถี่เชิงมุม  $\omega = \omega_0$  ตามสมการ (2.152) การทรานซิชั่นของความจุครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะแสดงได้ดัง รูปที่ 2.54 ส่วนรูปที่ 2.55 จะแสดงค่า  $C$  ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าลดลง การทรานซิชั่นของค่าความจุจากช่วงความถี่ต่ำไปยังช่วงความถี่สูงจะแสดงได้ด้วยกราฟ  $-\frac{dC}{df}$  ซึ่งพิกของกราฟ  $-\frac{dC}{df}$  จะแสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 2.54 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า  $C_{SCR}$  แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจรวม



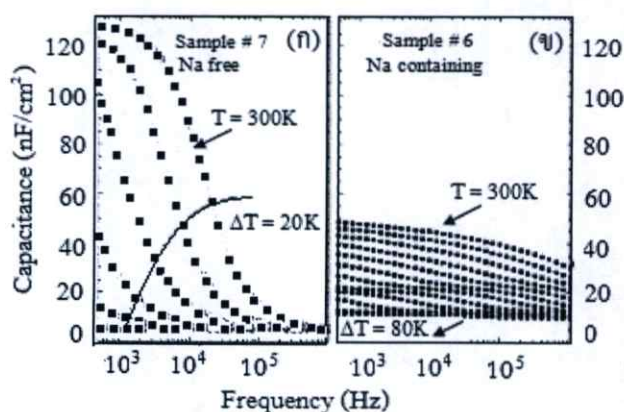
รูปที่ 2.55 แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ  $\frac{fdC}{df}$  ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง

2. สำหรับ  $\omega < \omega_D < \omega_0$  ในแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีจะเห็นการทรานซิชั่นเพียงหนึ่งเดียวซึ่งเกิดจากความจุเรขาคณิต ( $C_{geo}$ ) ที่ความถี่สูงไปเป็นค่าความจุที่ความถี่ต่ำ ( $C_p$ ) ซึ่งการทรานซิชั่นนี้เกิดขึ้นที่  $\omega = \omega_D$  พฤติกรรมชนิดนี้จะพบในสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อโอห์มิกที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) เข้าสู่ย่านปลอดพาหะจะเกิดร่วมกับกลไกการจับพาหะ และการคายพาหะของกักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะรูปที่ 2.56 แสดงการทรานซิชั่นเพียงหนึ่งเดียวจากความจุเรขาคณิต ( $C_{geo}$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 6 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ไปยังค่าความจุที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีความถี่ประมาณ 13 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่าความจุเปลี่ยนแปลงอย่างมากแบบขั้นบันได เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นกลางของเนื้อสาร (neutral bulk) ของสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub> ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการทรานซิชั่นที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก ( $\tau_D$ ) ของเนื้อสาร ความถี่ทรานซิชั่นที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความหนาแน่นของโฮลอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s} = \frac{q\mu_p}{\epsilon_s} = \frac{qN_V\mu_p}{\epsilon_s} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2.126)$$

ถ้าทราบค่า  $\mu_p$  และ  $\epsilon_s$  ก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของโฮล (p) ได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า  $C_f$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกไอออไนซ์ซึ่งก็คือมีการจับประจุและการคายประจุในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่วนกับดักประจุที่อยู่นอกบริเวณเขตปลอดพาหะจะเป็นกลาง

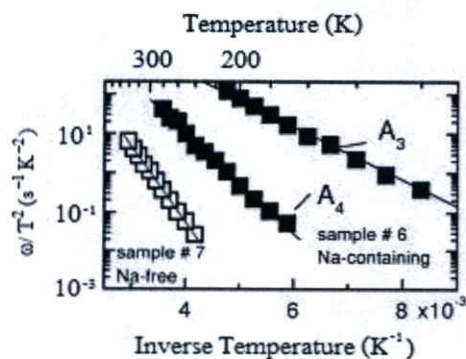
ทางไฟฟ้า การทรานซิชันในรูป 2.56(ก) เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเวลาผ่อนคลายไดโพลีอิเล็กทริก ก่อนข้างสูงอยู่ในราว  $\tau_D = 10^{-5}$  s (ที่ 300 เคลวิน) ซึ่งส่งผลให้  $\omega_D = \omega_0$  ดังนั้นจากการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจึงไม่เห็นความถี่เบี่ยงเบน ( $\omega_0$ ) ของกับดักประจุนี้คือไม่สามารถตรวจวัดระดับพลังงานของกับดักประจุได้



รูปที่ 2.56 แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe<sub>2</sub> ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ

- ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na
- ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na

รูปที่ 2.57 แสดงการหาพลังงานกระตุ้นจากการวัดสเปกตรัมความจุที่ปรากฏในรูปที่ 2.56 พลังงานกระตุ้นค่า 381 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ได้จากสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na ส่วนสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub> ที่เจือด้วย Na จะมีพลังงานกระตุ้น 2 ค่า



รูปที่ 2.57 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ที่สำหรับใช้ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe<sub>2</sub>

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับ ในกรณีที่เป็นกระจกสไลด์รวมทั้งในกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ

n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศมีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้ [15-23]

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO ที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับทำเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
3. อุปกรณ์บดสารครกอาเกต (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. ครูซิเบิล
8. เครื่องอัดไฮดรอลิก



**รูปที่ 3.1** แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9×9 ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคีบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
  - 9.1 น้ำยาล้างจาน
  - 9.2 น้ำปอกคอประจุ
  - 9.3 อะซีโตน
  - 9.4 เอทานอล

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

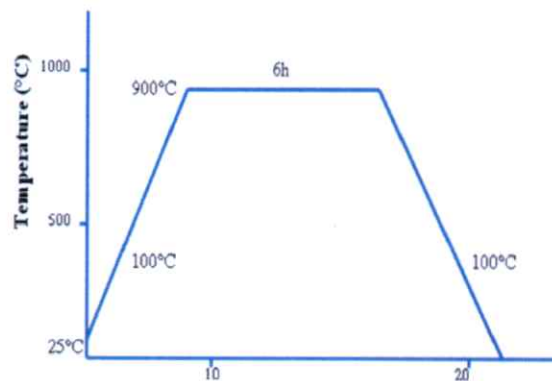
1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ออกแบบ และติดตั้งโดย ดร.ชาญวิทย์ จิตรยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. สารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS ที่ถูกนำมาบดให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
5. เมทธานอล
6. อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต
7. เตาเผาสาร
8. ครุชิวิล

3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง [15-30]

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับการเตรียมเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง
2. นำผงผลึกของสารประกอบ CuO มาบดในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดมากคล้ายแป้งฝุ่น

3. นำผงผลึกที่บดแล้วมาทำการไล่ความชื้นและขจัดสารอินทรีย์ออกให้หมด โดยทำการเผาแคลไซน์ (calcination) ภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำผงผลึกที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมาทำการอัดให้เป็นเม็ดกลมที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยใช้แรงอัดขนาด 4 ตัน
5. นำเม็ดสารตั้งต้นไปใส่ไว้ในครุชีเบล เพื่อนำไปทำการเผาผนึกหรือการอบผนึกหรือการเผาซินเทอร์ (sintering) ภายใต้บรรยากาศด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จึงปิดเตาให้รอนจนกระทั่งเตาเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง จึงนำครุชีเบลออกมาจากเตา
6. เมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงนำเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ออกมาจากเตา เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO



รูปที่ 3.3 แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO

3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

### 3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25×75 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่นเล็กมีขนาด 9×9 ตารางมิลลิเมตร
7. ทำการล้างด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที โดยขั้นตอนในข้อ 2-7 จะนำปิกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากในข้อ 8 นำไปอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

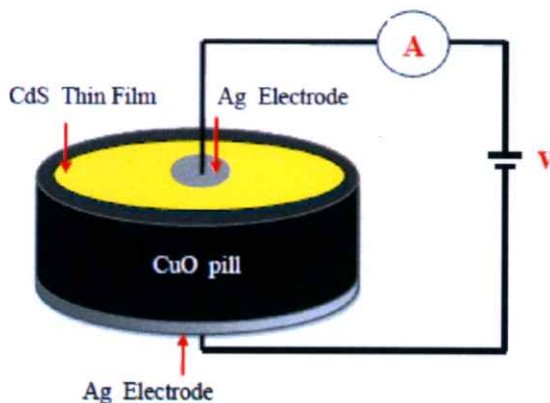
1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซีโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็งที่เป็นกระจกสไลด์โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS ตามลำดับมาบดให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัมแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงไปในเข้าภาชนะระเหยสาร(boat)ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นฐานรองรับทั้งในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิก ของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ทำการเตรียมไว้แล้วตามลำดับมาวางลงบนหน้า กาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกล โรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์จนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย ( shutter ) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จน กระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์

แล้วแช่พัก สักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 100 - 130 แอมแปร์ จนได้ความหนาประมาณ 500 - 800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที

8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหย และทำการปิดแบริแอคโดยค่อยๆลดกระแสลงอย่างช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิกายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
12. ทำการแอนนیلฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100- 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
13. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนิลและกรณีที่มีการแอนนิล ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{CuK}_\alpha$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จาก

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $He \lambda$  ions  $\alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 190-1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ )

14. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน ต่อไป



**รูปที่ 3.4** แสดงแผนภาพของโครงสร้างของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

**3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส [15-30]**

### 3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

### 3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400



รูปที่ 3.6 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

### 3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ( $He\ \lambda\ \text{ions}\ \alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง

220-1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ )



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios

### 3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน

**3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ( I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูงในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส**

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 0.5 โวลต์
- มัลติมิเตอร์ รุ่น METEC 8007
- เครื่องทำความเย็นไครโอเจนิกและไครโอสเตต ยี่ห้อLeybold รุ่นRW2
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟ



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น



**รูปที่ 3.10** แสดงภาพถ่ายของไดโอดแอดดที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน



**รูปที่ 3.11** แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน



**รูปที่ 3.12** แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

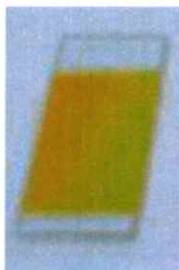
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทำการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดค่าความต้านทานระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20–300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO วัดความต้านทานระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ความนำไฟฟ้ากับกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน และยังได้ทำการศึกษาความต้านทานระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ

#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีสีเหลืองส้ม ผิวหน้าเรียบ สะท้อนแสงและยึดติดแน่นกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO นั้นมีสีดำ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO จะเห็นว่ามีฟิล์มบางสีเหลืองส้มเคลือบอยู่บนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO



**รูปที่ 4.1** แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



**รูปที่ 4.2** แสดงสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

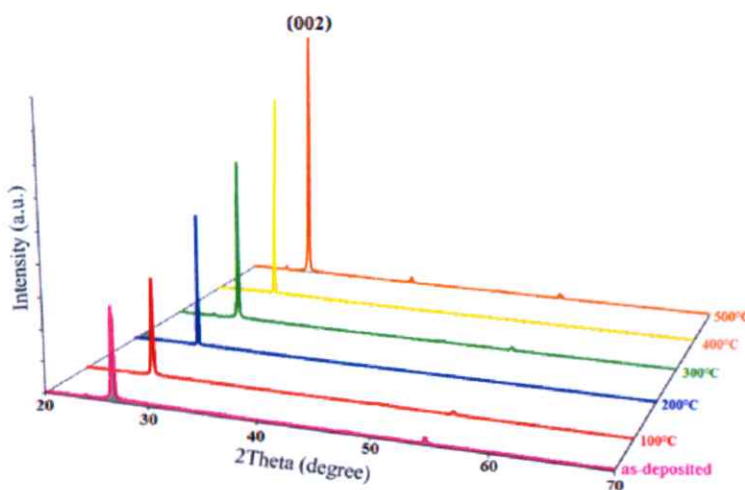
#### 4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

##### 4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

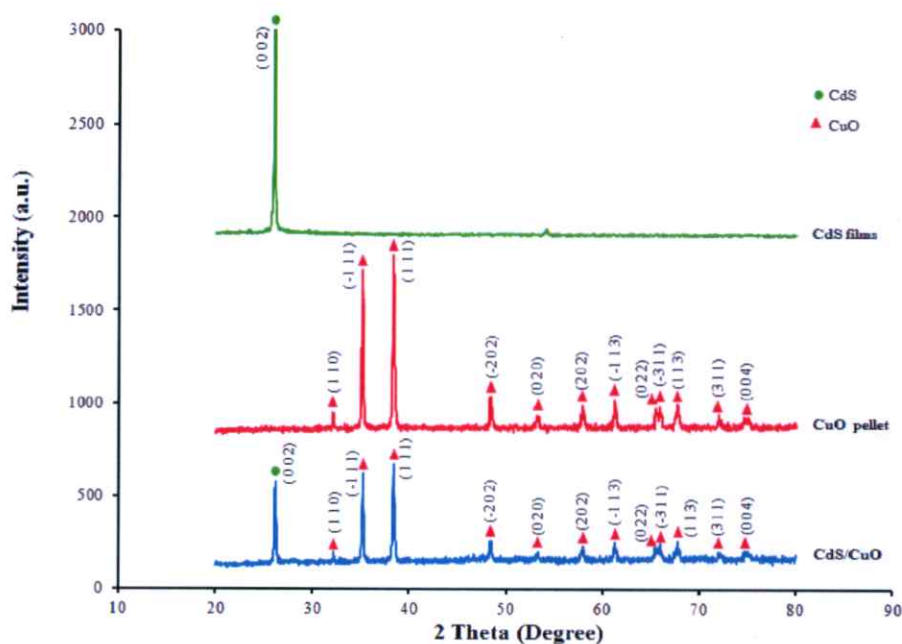
การศึกษาศเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา

30 นาที พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) เด่นชัดที่สุดอยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26.50$  องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS มาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกับไฟล์มาตรฐานเป็นการบ่งบอกว่าระนาบการเลี้ยวเบน (002) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัลดังรูปที่ 4.3

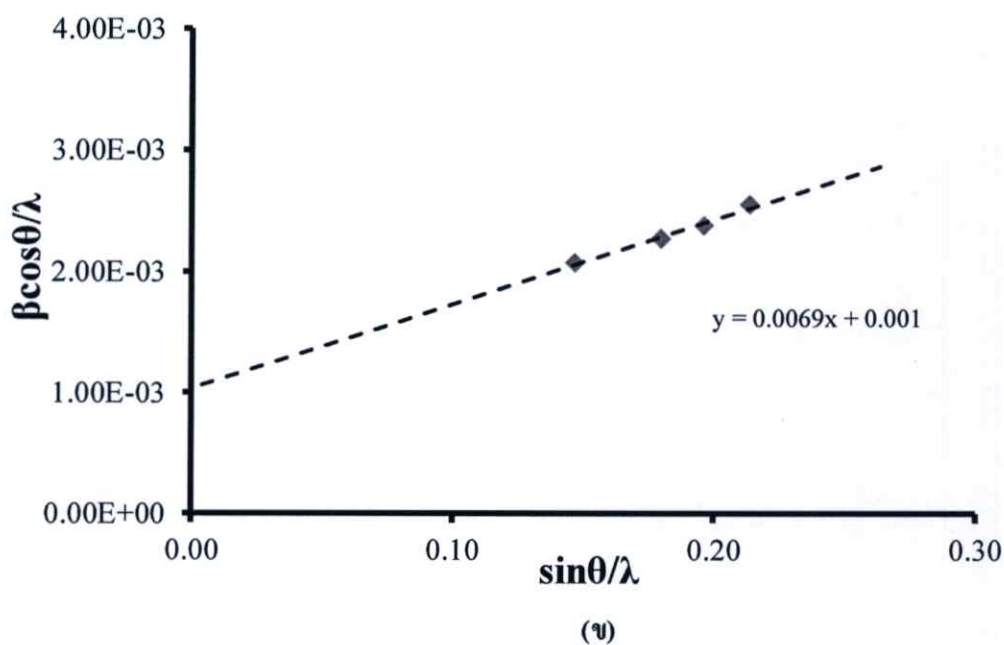
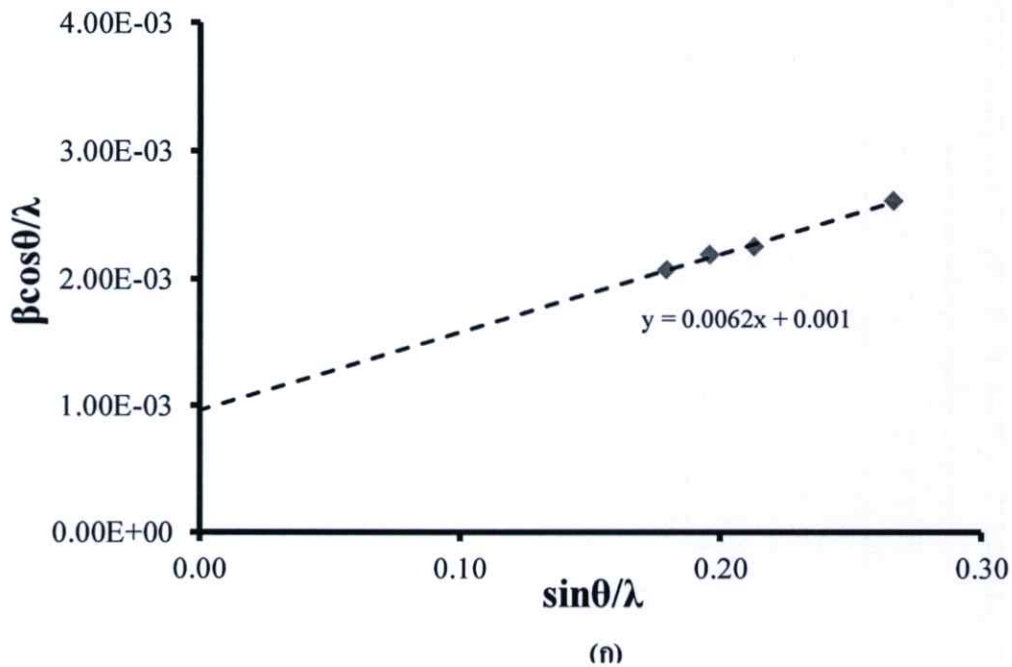
การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่ามีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม  $2\theta \approx 26.50$  องศาซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ส่วนพีคการเลี้ยวเบนที่เหลือสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ระนาบเลี้ยวเบนของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO จะปรากฏที่มุม  $2\theta \approx 32.47, 35.49, 38.68, 48.65, 53.40, 58.25, 61.45, 65.72, 66.14, 67.84, 72.32$  และ  $74.92$  องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (110), (-111), (111), (-202), (020), (202), (-113), (022), (-311), (113), (311) และ (004) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



**รูปที่ 4.3** แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 30 นาที



รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหาขนาดของเกรนและความเครียดของ

- ก. เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติมาตรฐานของแข็ง
- ข. เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิห พันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิธานของแข็ง และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

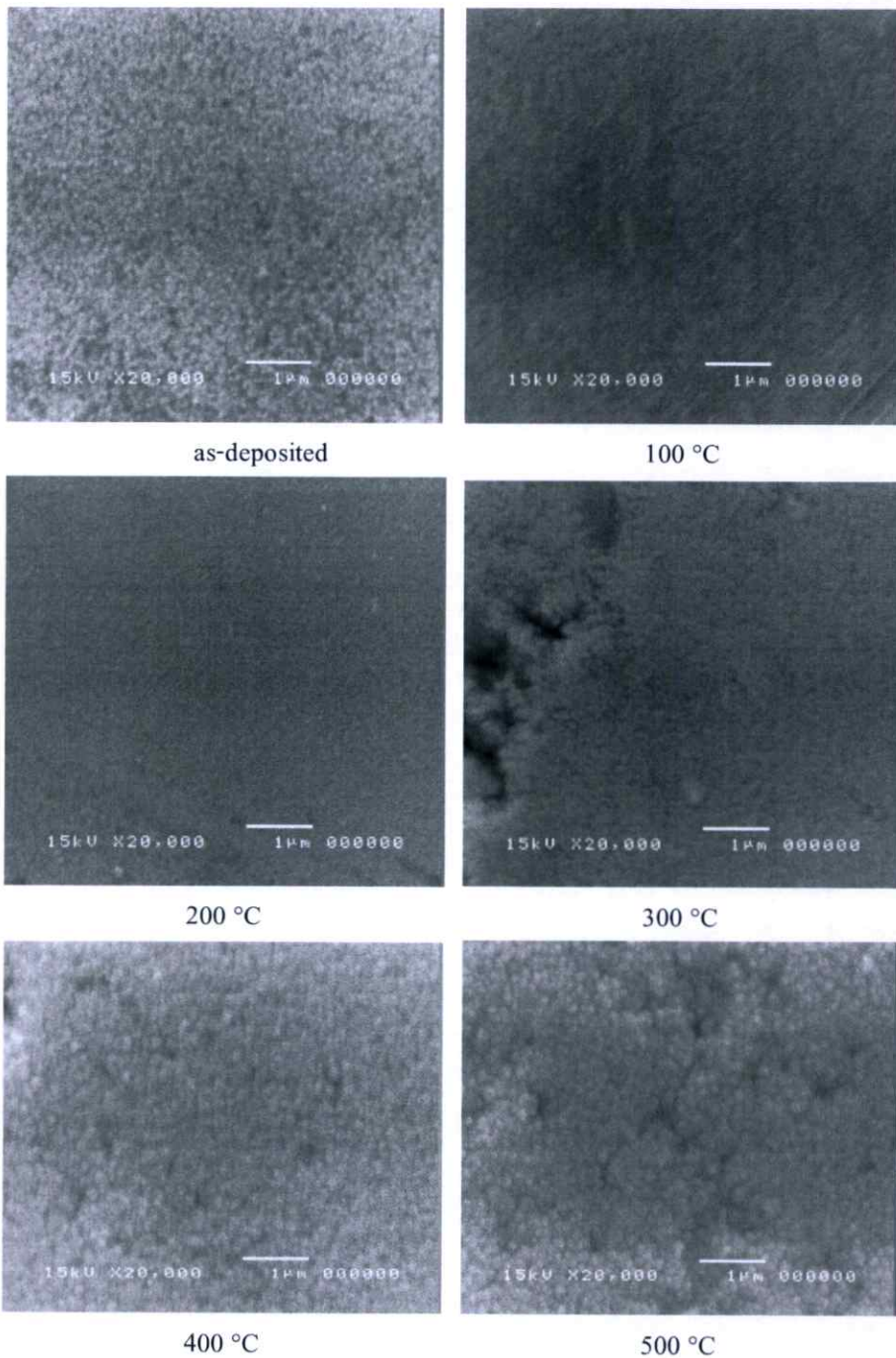
CuO ceramic	Lattice Constant (Å)				Grain size ( $\mu\text{m}$ ) from XRD	Strain
	a	b	c	$\beta$		
pellet	4.809	3.438	5.038	99.777	3.02	0.0094
CuO/CdS diode	4.899	3.433	5.025	99.678	2.11	0.0060

**4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ และรอยต่ออวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ**

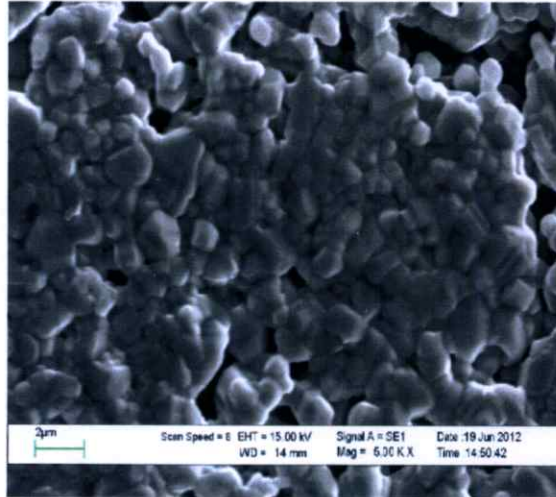
การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบาง จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนคือทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นประมาณ 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติวิธานของแข็ง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงบริเวณผิวหน้าของเม็ดของเซรามิก จากภาพถ่าย SEM ของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO พบว่าเกรนมีขนาดประมาณ 3.00 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.7

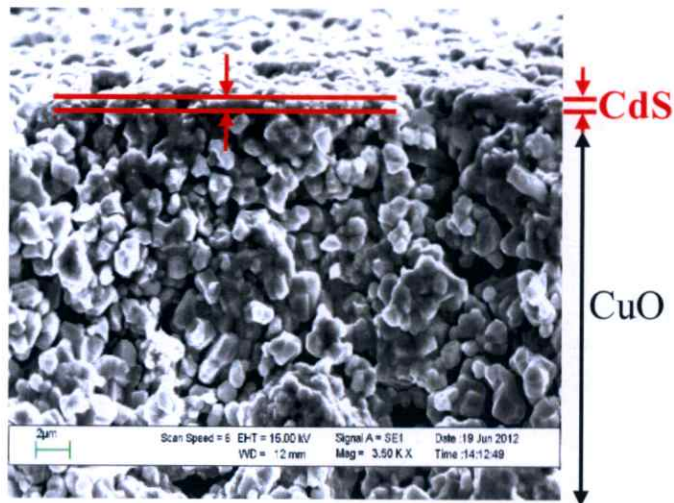
การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพถ่าย SEM ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เกรนมีขนาดประมาณ 2.00 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO



**รูปที่ 4.6** แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



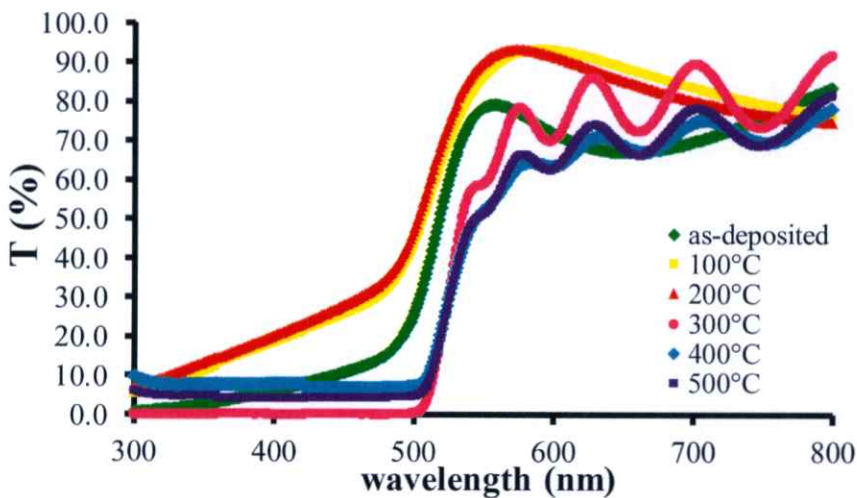
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



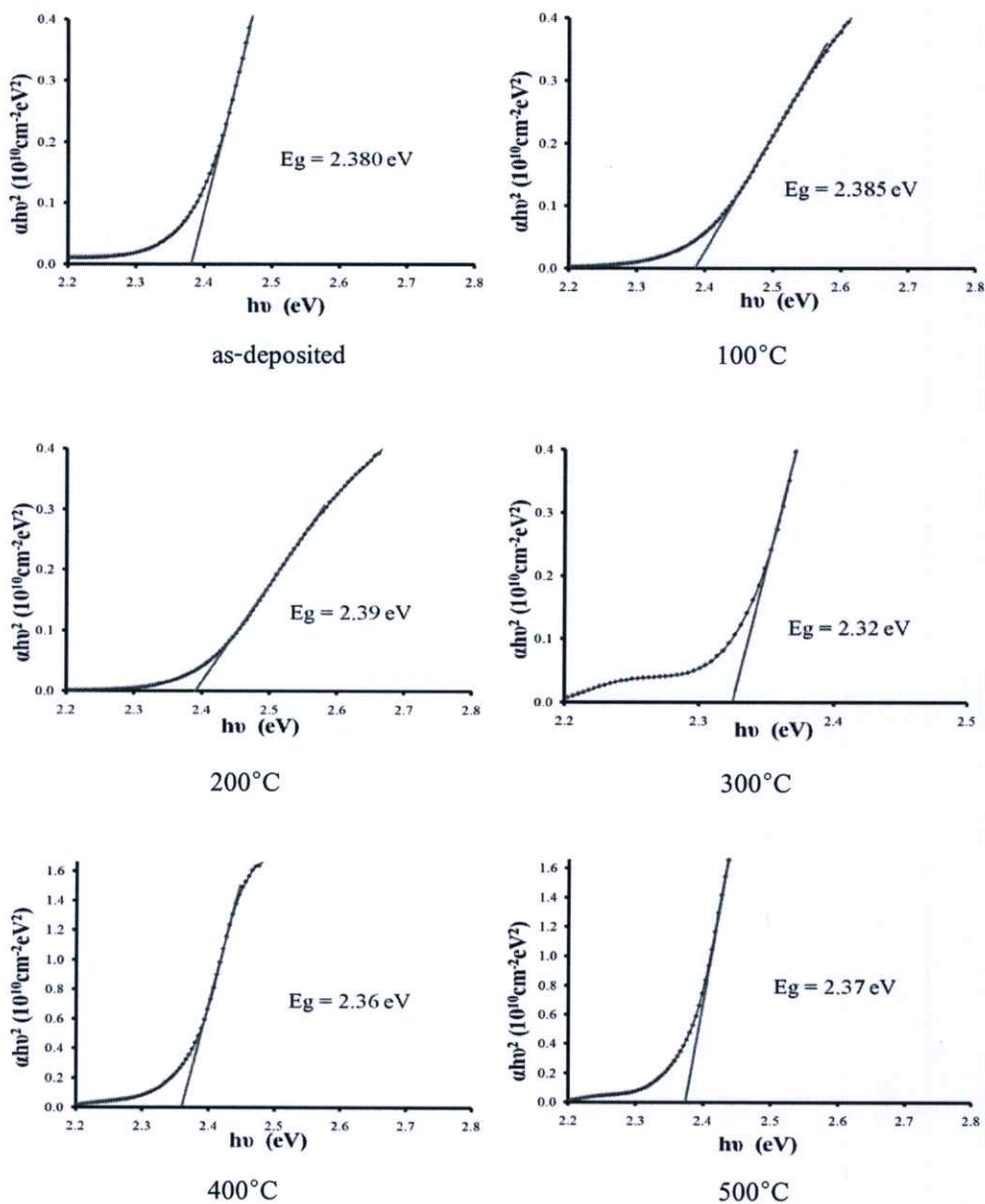
รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

**4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cds ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที**

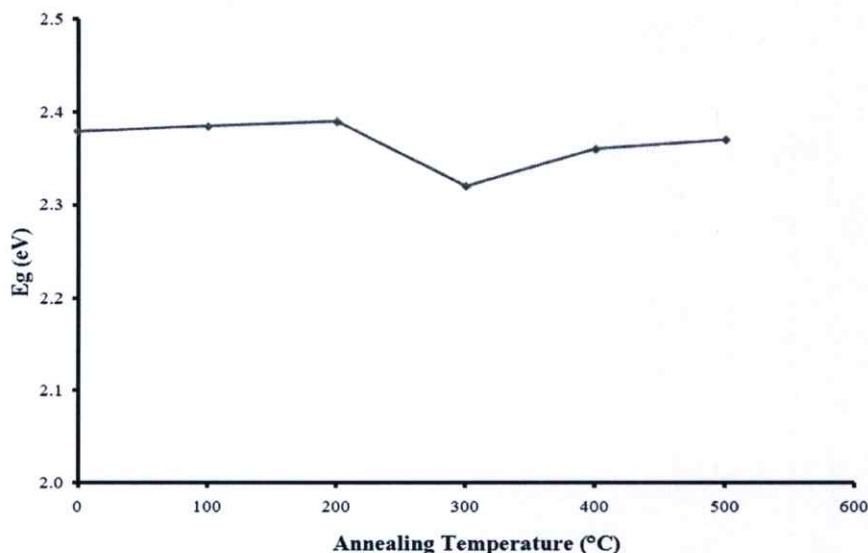
ได้ทำการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cds ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cds มีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนิลเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิแอนนิลเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนิลสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิแอนนิล 500 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $ahv$ )<sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) แล้วลากส่วนต่อของเส้นตรงให้ตัดกับแกนพลังงานของโฟตอน โดยที่จุดตัดแกนคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการแอนนิลพบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนิลสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิแอนนิล 300 องศาเซลเซียสจะมีการลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานดังรูปที่ 4.10



**รูปที่ 4.9** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cds ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.10 แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.11** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานและอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

#### 4.3 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ

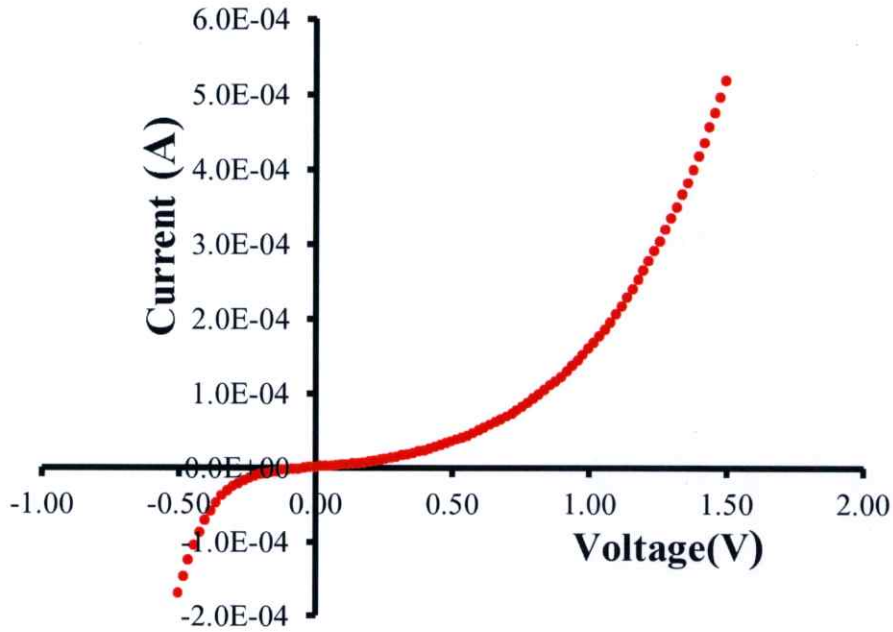
##### n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ ความสูงของกำแพงศักย์ ( $\Phi_{c-v}$ ) และความสูงของกำแพงศักย์ในสถานะแถบแบนราบ ( $\Phi_{br}$ ) อีกทั้งยังได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ ความนำไฟฟ้ากับความถี่ภายใต้แรงดันไบแอส -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ ระดับพลังงานของกักประจุที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ และพลังงานกระตุ้น เป็นต้น

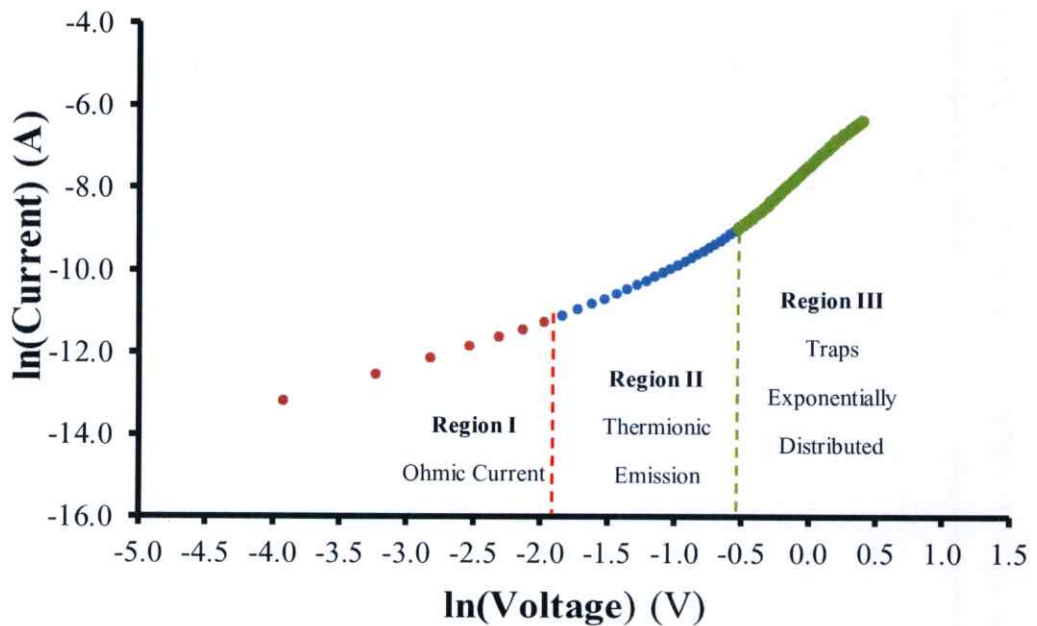
#### 4.3.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องดังปรากฏในรูปที่ 4.12 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ CuO และของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ  $10^{16}$  และ  $10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ p<sup>+</sup>-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชนิด p-n โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS

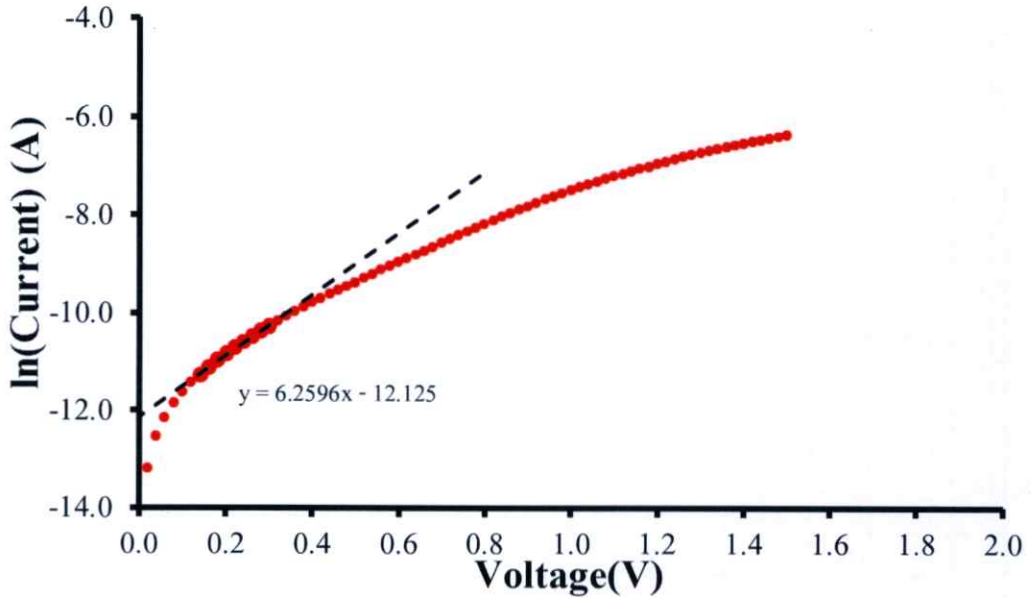
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.50 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 4.13 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ดังรูปที่ 4.14 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อแบบชนิด p-n ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน การจำลองข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะเป็นวิธีหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุดมคติได้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/dnI$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจากกราฟนี้จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.16 จะหาค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟลอการิทึมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



**รูปที่ 4.14** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I)$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ  
 วัสดุของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuO}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ  
 ร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.14 คือกราฟความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้  
 ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) โดยอาศัยกราฟ  
 เส้นตรงของช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิตชันดังสมการ

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการ  
 ลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันตัดแกน  $\ln I$  โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ  
 $\ln I_s$  และความชันของกราฟเท่ากับ  $\frac{q}{nkT}$  ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ได้จาก  
 สมการที่ 4.2 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

$$\phi_{B0} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_s}\right) \quad (4.3)$$

ความสูงกำแพงศักย์  $\phi_{B0}$  ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ  $A^*$  เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อ (ตารางเซนติเมตร – เคลวินยกกำลังสอง)

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

ในความเป็นจริงแล้วสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ( $R_s$ ) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ (Region III) เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CdTe ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_s)\right) - 1 \right\} \quad (4.5)$$

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.6)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\frac{q}{nkT}(V - IR_s) [1 - \exp(-qV/kT)] \right\} \quad (4.7)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของช่วง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้าโดยการแทนสมการที่ (4.6) ลงในสมการที่ (4.5) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (4.8)$$

หาอนุพันธ์ของ  $V$  เทียบกับ  $\ln I$  เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.9)$$

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.20 โดยความชันของกราฟนั้นคือค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรถวาย ( $R_s$ ) และจุดตัดแกน  $dV/d(\ln I)$  มีค่าเท่ากับ  $nkT/q$

ส่วนการหาความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ 4.8 ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ  $H(I)$  ดังนี้

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (4.11)$$

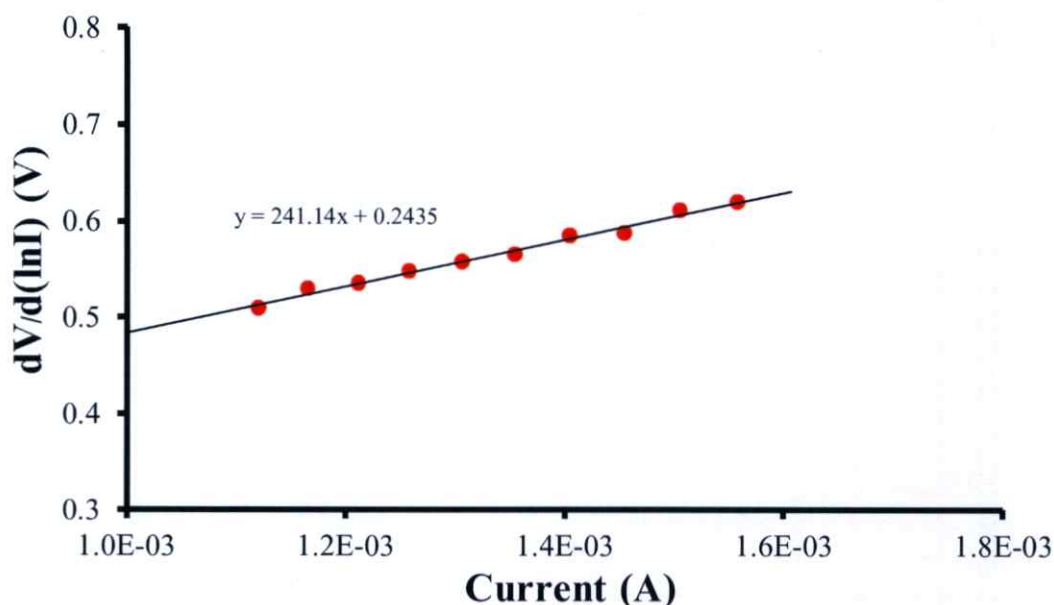
เมื่อทำการคำนวณค่า  $H(I)$  จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  ก็จะได้ผลดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.21 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ( $n\phi_B$ ) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วนอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน  $H(I)$  นั้นก็คือค่าความต้านทานอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

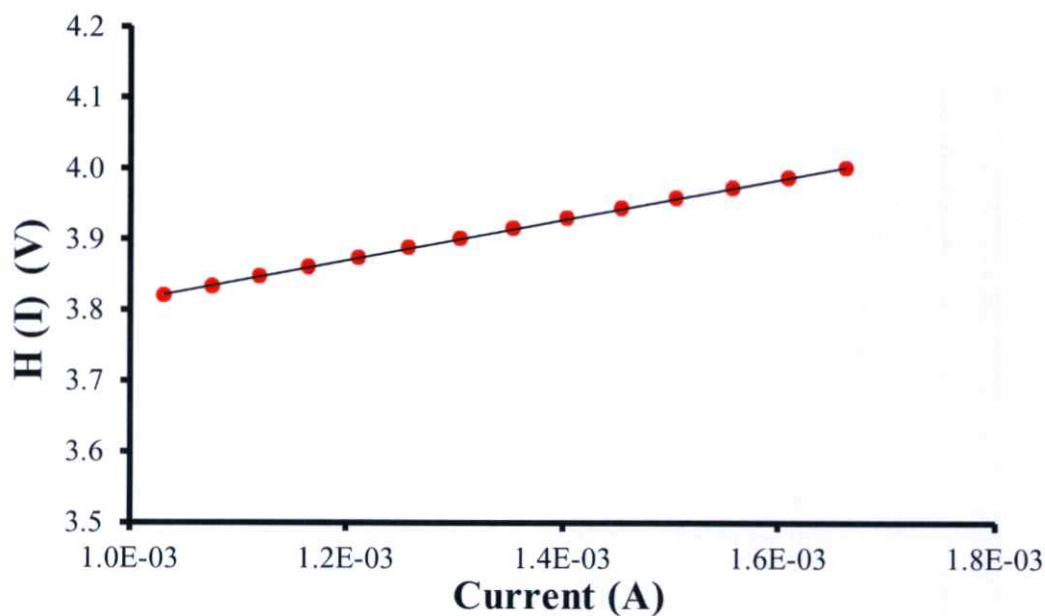
$$I = kV^m \quad (4.12)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

เมื่อ  $m$  คือความชันของกราฟ ถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m$  เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า  $m$  เท่ากับ 2.42 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

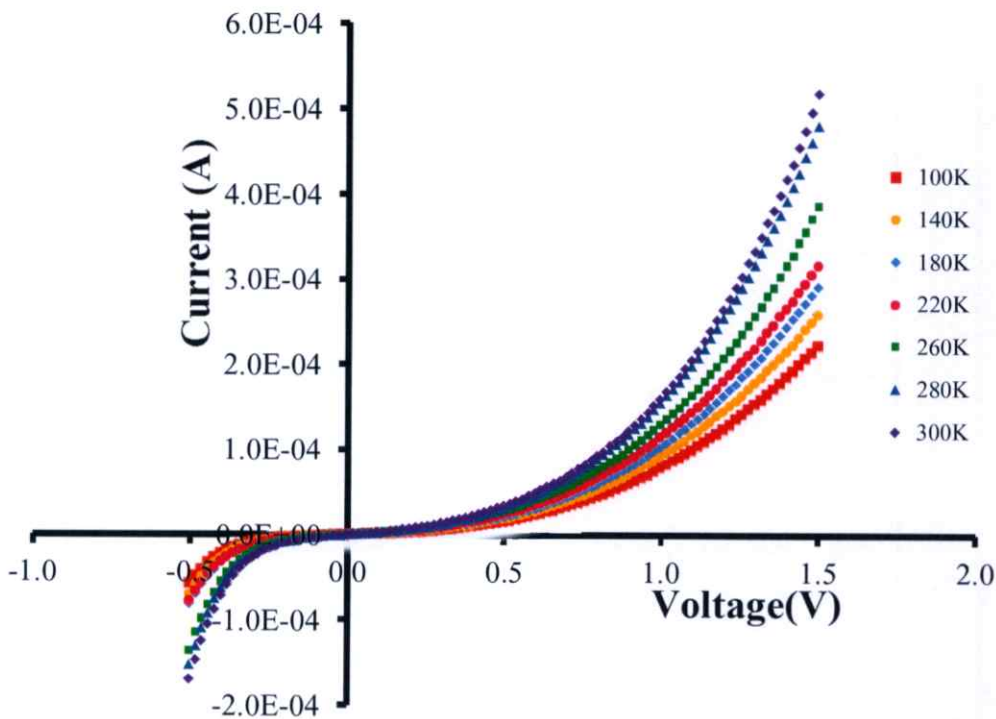
**ตารางที่ 4.2** แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{B0}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จาก การคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Temperature (K)	Saturation Current $I_s$ (A)	Ideality Factor $n$		Barrier Height $\phi_{B0}$ (eV)		Series Resistance $R_s$ ( $\Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)]-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)]-I
300	$5.10 \times 10^{-6}$	6.1741	6.4500	0.5374	0.5467	286.07	241.14

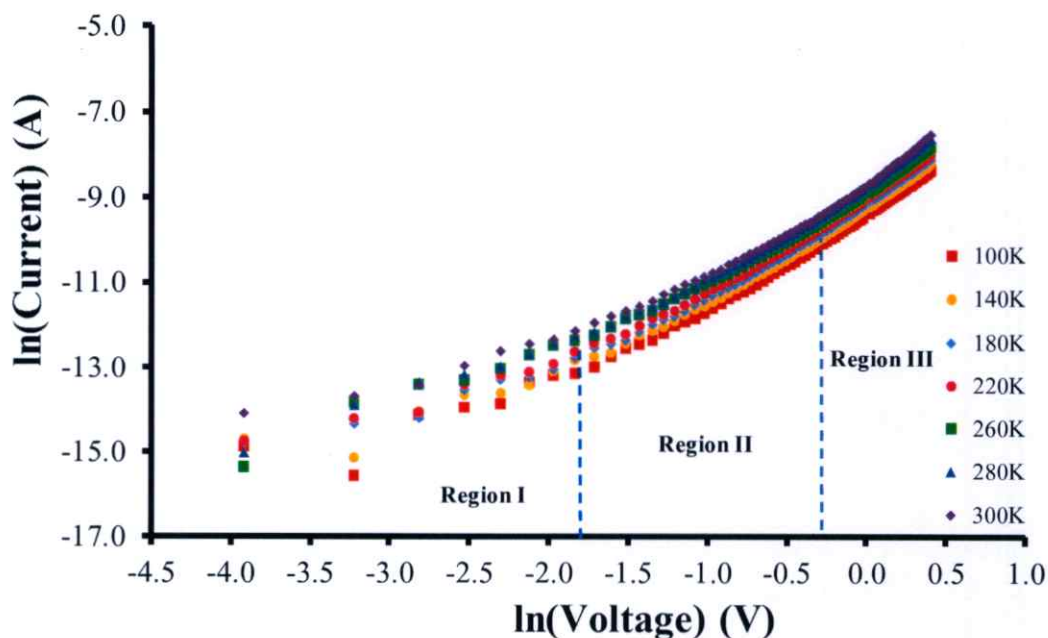
#### 4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านกำแพงศักย์ค่าสูงได้โดยไม่ต้องใช้แรงดันไบแอสมากนัก จากรูปที่ 4.17 จะพบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีกับดักประจุที่ปรากฏที่บริเวณผิวเชื่อมต่อซึ่งจะช่วยทำให้เกิดกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ (tunneling enhance recombination) โดเด่นขึ้นจึงส่งผลให้แฟกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไบแอส -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.17 โวลต์ (Region

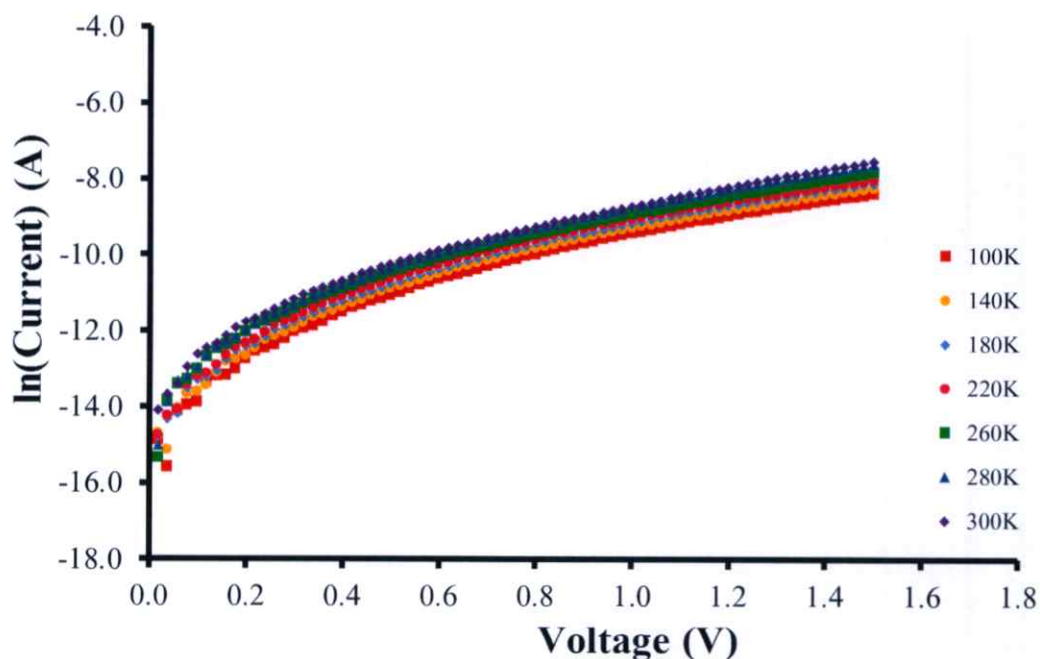
I) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.17 – 0.61 โวลต์ (Region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มियोอนิกอนิสมิสชัน และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.61 โวลต์ (Region III) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแสดงดังรูปที่ 4.18 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  แสดงดังรูปที่ 4.19 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตัวและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อเทียบกับผลจากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เป็นกลไกเทอร์มियोอนิกอนิสมิสชันแสดงดังรูปที่ 4.19 เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ และ แฟกเตอร์อุณหภูมิตัวให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวง ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 โดยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตัว ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มियोอนิกอนิสมิสชัน และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.3



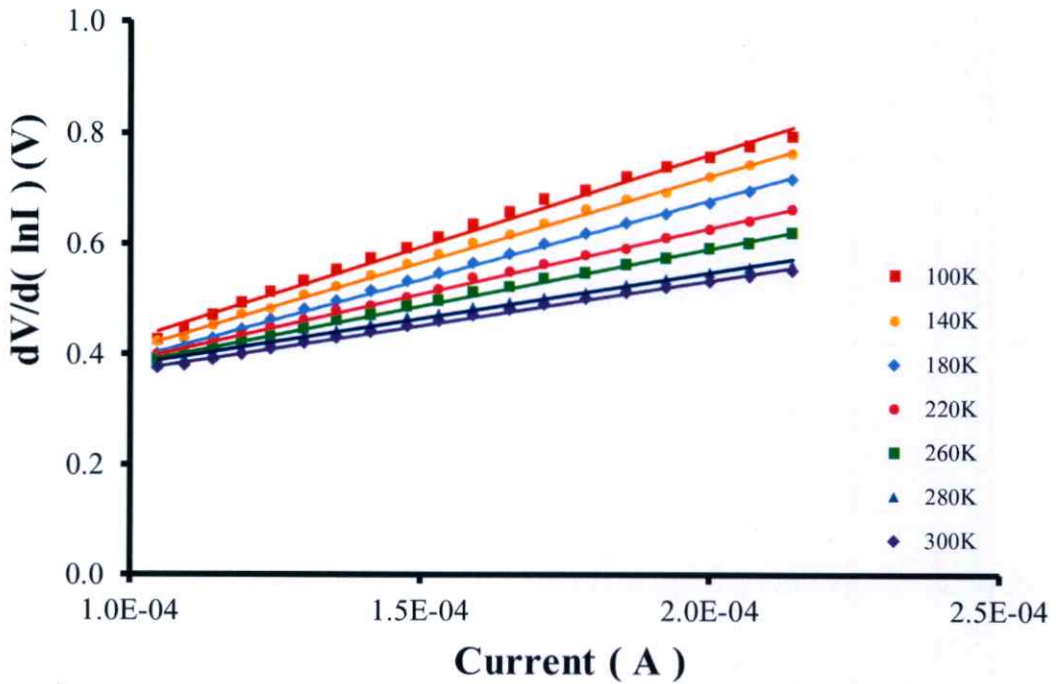
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



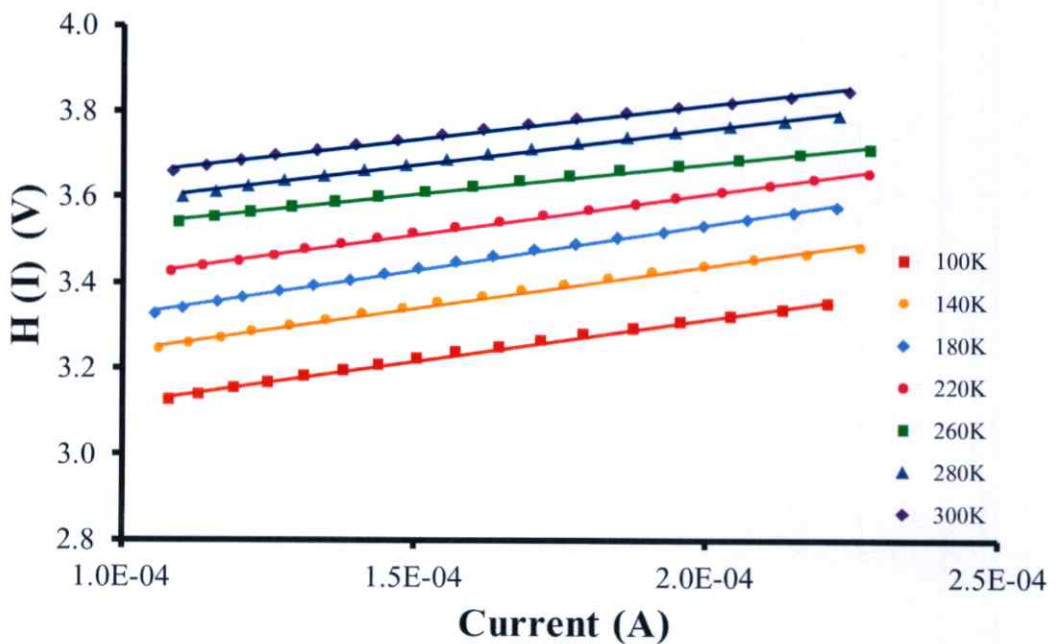
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟลอการิทึมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuO}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-CdS/p-CuO}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Temperature (K)	Saturation Current ( $I_s$ ) (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance ( $\Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	TE	Cheung
		I-V	$dV/d(\ln I)-I$	I-V	$H(I)-I$	$H(I)-I$	$dV/d(\ln I)-I$
20	1.70E-06	87.26	95.00	0.5374	0.5467	347.06	399.47
40	1.56E-06	42.35	42.85	0.0618	0.0672	876.81	844.26
60	1.30E-06	25.42	26.42	0.0979	0.1007	1591.50	1652.00
80	8.20E-07	19.02	21.02	0.1377	0.1356	1734.60	1727.30
100	9.00E-07	16.05	17.00	0.1602	0.1823	2460.50	2303.80
120	6.69E-07	12.74	12.96	0.1960	0.2367	2060.40	2104.00
140	1.15E-06	11.00	12.50	0.2504	0.2547	2170.00	2205.20
160	9.44E-07	9.49	9.50	0.2926	0.3217	1404.10	1419.70
180	1.06E-06	8.62	8.80	0.3310	0.3529	1613.60	1648.80
200	1.46E-06	8.23	8.50	0.3659	0.4007	1059.00	1038.10
220	1.40E-06	7.61	7.60	0.4069	0.4171	2047.40	2076.20
240	1.50E-06	7.17	7.50	0.4460	0.4807	1153.60	944.98
260	1.40E-06	6.02	6.20	0.4883	0.5115	1725.40	1703.30
280	1.60E-06	6.13	6.50	0.5263	0.5649	862.89	898.80
300	1.70E-06	5.54	5.85	0.5659	0.6130	618.24	656.72

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตัวย้อนกลับและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 4.22 ค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตัวย้อนกลับ  $n = \frac{q}{kT} \left( \frac{1}{\text{slope}} \right)$  จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  และที่ได้จากวิธีของชวง  $n = \frac{(\text{intercept } Y) \cdot q}{kT}$  จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $I$  สามารถนำไปหาค่า  $E_{00}$  ได้ จากความสัมพันธ์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth \left( \frac{E_{00}}{kT} \right) \quad (4.14)$$

โดย  $E_{00}$  คือค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 0.130 และ 0.128 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับแสดงไว้ในรูปที่ 4.22

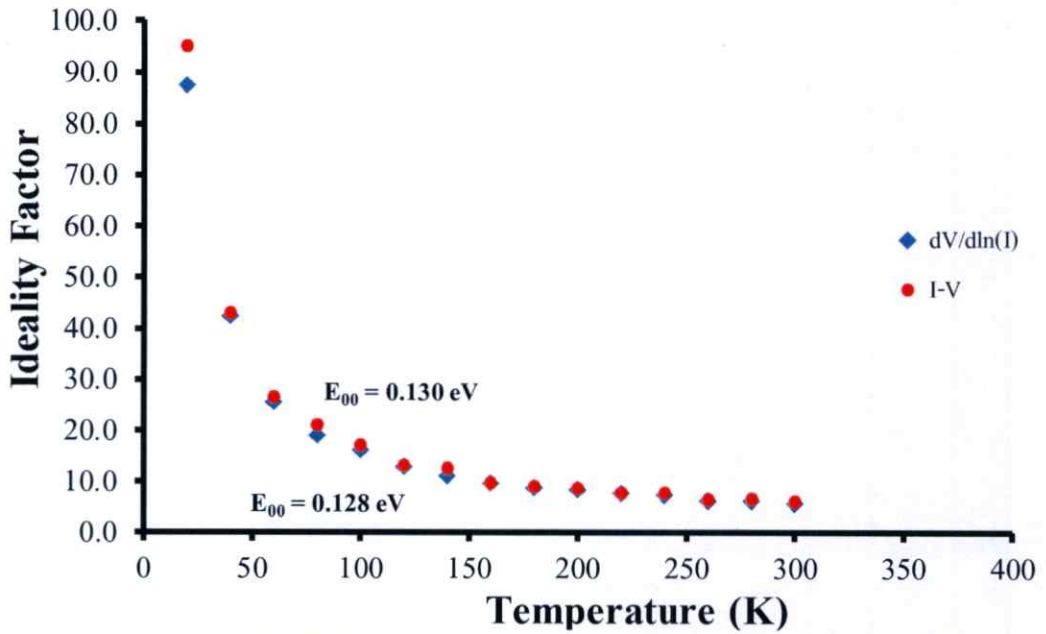
จากทฤษฎีเทอร์มอไดนามิกอิมิตัวย้อนกลับจะได้ว่า

$$E_{00} = \left( \frac{q\hbar}{2} \right) \left[ \frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right] \quad (4.15)$$

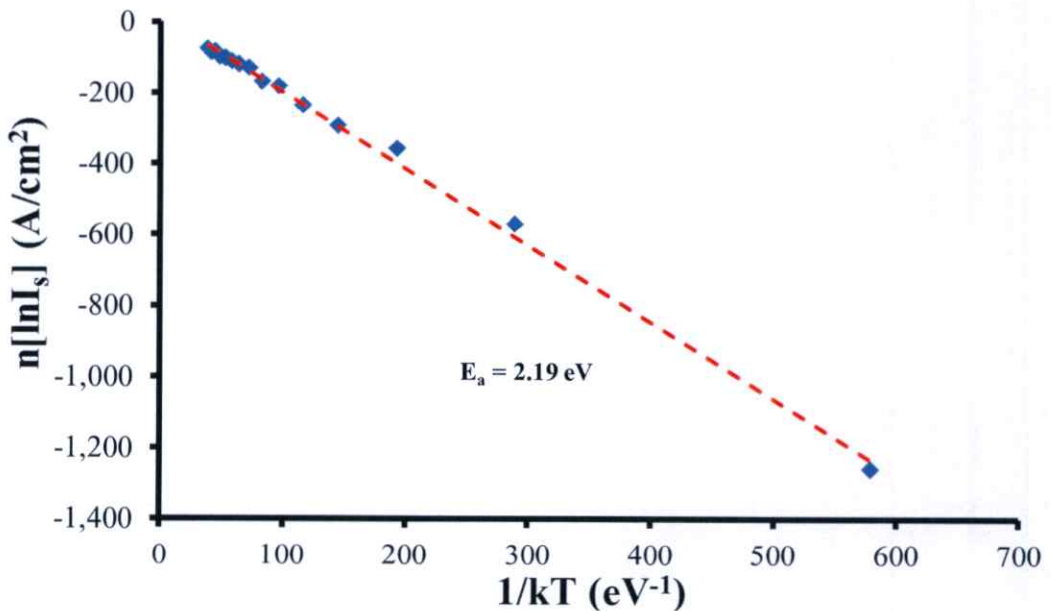
และคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

$$n \ln (J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln (J_{00}) \quad (4.16)$$

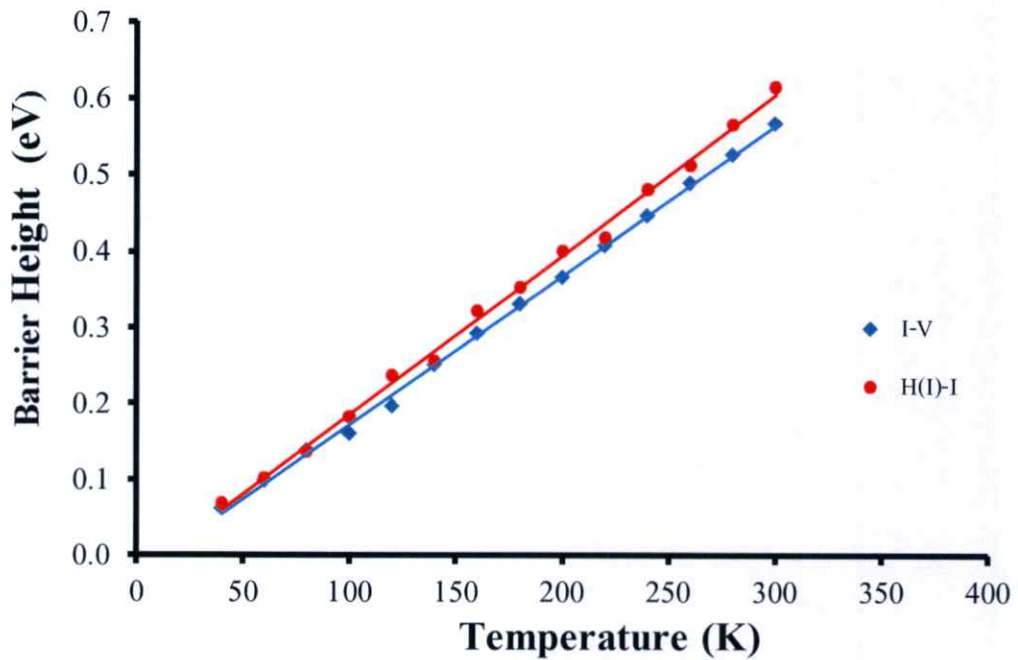
จากรูปที่ 4.23 แสดงกราฟอาร์เรเนียสซึ่งความชันที่ได้คือ ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 2.19 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CuO แสดงว่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2.19 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งหมายถึงมีการเกิดชั้นอัลลอยด์ของสารประกอบ  $Cd_{1-x}Cu_xO$  ขึ้นตรงบริเวณรอยต่อ และชั้นอัลลอยด์นี้มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 2.19 – 2.40 อิเล็กตรอนโวลต์ และเป็นชนิดเอ็น ส่วน  $E_{00}$  ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์มาก แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลโดดเด่นกว่ากลไกเทอร์มอไดนามิกอิมิตัวย้อนกลับ จากนั้นโฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อในบริเวณพร่องพาหะ



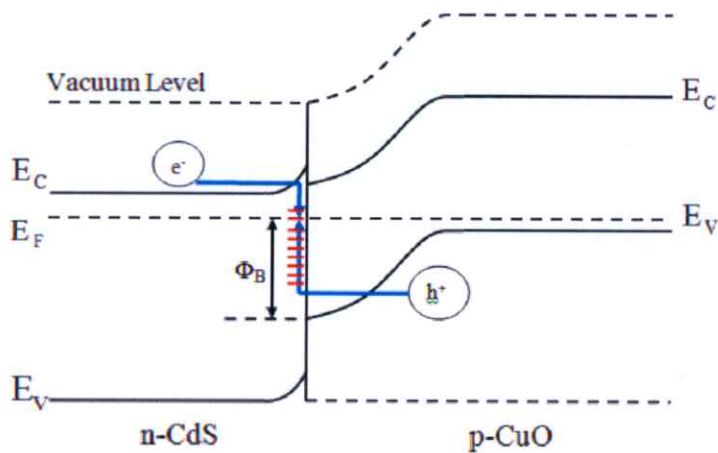
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d(\ln I)$  กับ  $T$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสาร กึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สูญญากาศ



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n \ln I_s$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากการใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

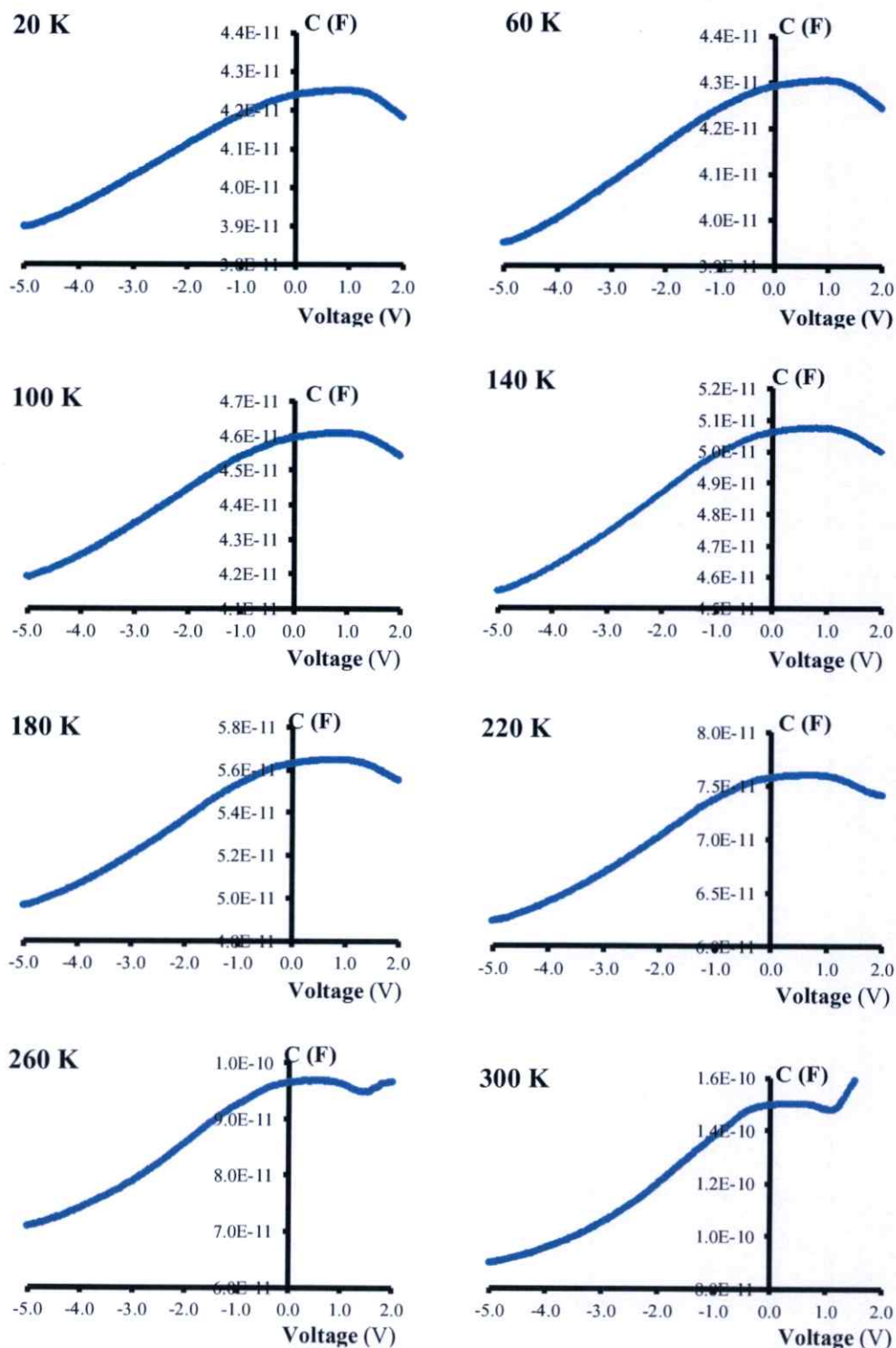


รูปที่ 4.25 แสดงแผนภาพการขุดคูมอังก์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนในบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

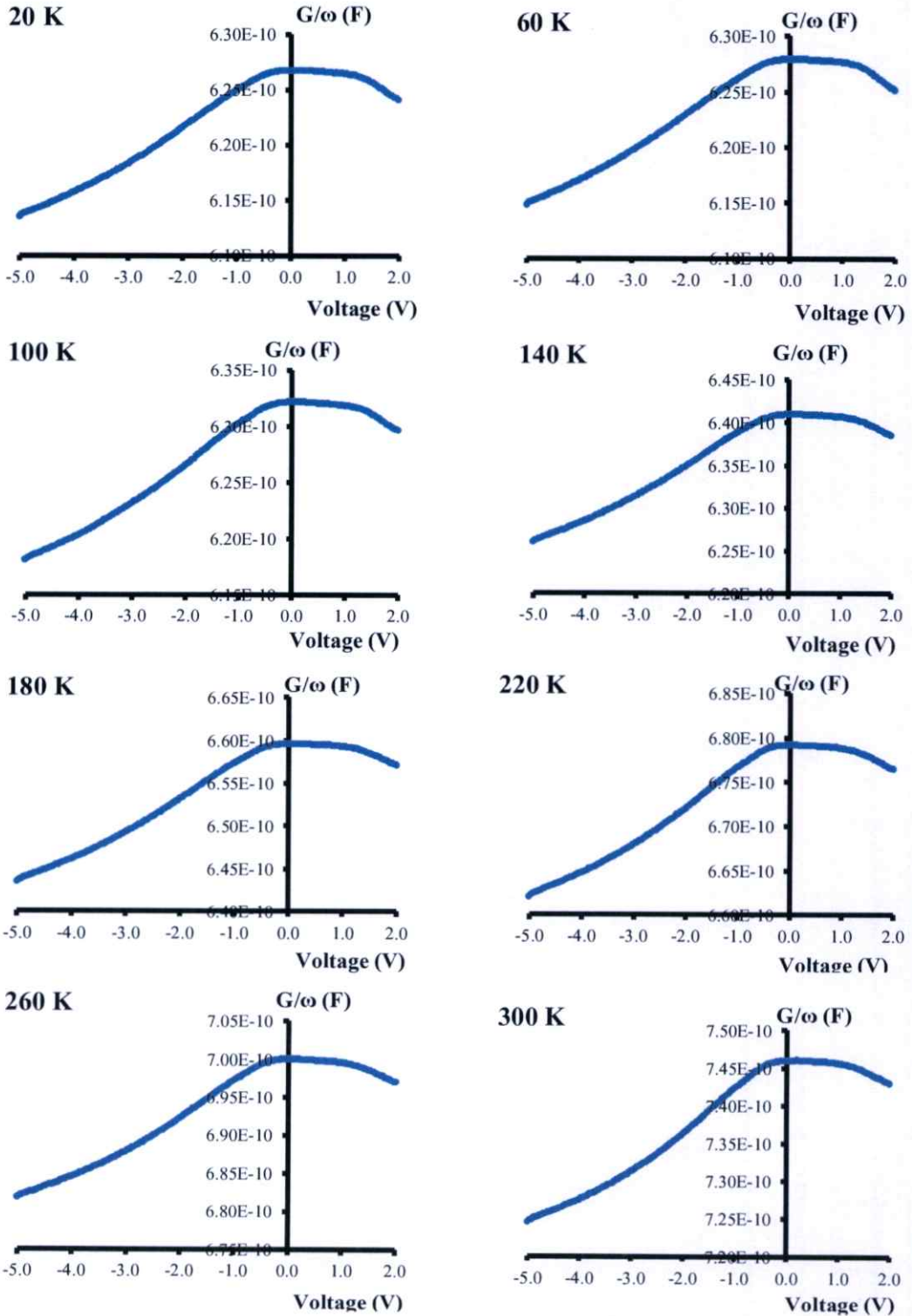
การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ชอตต์ก็มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิตชัน ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะทำให้พาหะอิสระมีพลังงานสูงขึ้นและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการชดเชยอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุณหภูมิต่ำ ( $n$ ) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันน้อยลง

#### 4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยใช้แรงดันไบแอสในช่วง -5 ถึง 2 โวลต์ ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ และที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 พบว่าค่าสูงสุดของความจุไฟฟ้าจะเลื่อนเข้าใกล้แรงดันไบแอสที่มีค่าเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความจุไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอีกด้วย ที่แรงดันไบแอสย้อนกลับค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น และสำหรับกรณีไบแอสไปข้างหน้าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อ พี-เอ็นนั้นหายไปชั่วขณะ



**รูปที่ 4.26** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิค่า ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่ออวิวิพันธุ์ของ สารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สูญญากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรูปที่ 4.26 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 4.28 จะได้ความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเชิงเส้นและลากเส้นตรงมาตัดแกนแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดคือ  $V_i$  ซึ่งสามารถนำไปหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ได้ และความชันสามารถนำมาใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อลดลง และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\frac{1}{C^2} = \left( \frac{2}{\epsilon_s q N_d A^2} \right) \left( V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.17)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้า  $\epsilon_s$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า ( permittivity ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยที่  $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$  ซึ่ง  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าเท่ากับ 9.8 ส่วน  $A$  คือ พื้นที่ของรอยต่อมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.17) จะเลือกเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันย้อนกลับตั้งแต่ -5 ถึงช่วง 2 โวลต์ โดยประมาณ แล้วทำการลากเส้นตรงจนตัดผ่านแกนตัดแกนนอนหรือแกนแรงดันไฟฟ้า จะทำให้ได้ค่า  $V_i$  ซึ่ง  $V_i$  สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ดังนี้คือ

$$V_i = V_{bi} - \frac{kT}{q} \quad (4.18)$$

แล้วแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) คือ

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.19)$$

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้สามารถคำนวณได้จากความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของสมการที่ (4.17) คือ

$$\text{slope} = \frac{2}{q\epsilon_s N_d A^2} \quad (4.20)$$

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{slope})} \quad (4.21)$$

ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่วัดจากความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( $\Phi_{c-v}$ ) ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้[13]

$$\phi_{c-v} = V_{bi} + qV_n \quad (4.22)$$

เมื่อ

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} N_c &= 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (4.24) \\ &= 4.83 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e^* / m_0)^{3/2} \end{aligned}$$

มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่าเท่ากับ  $0.165m_0$  ดังนั้น  $N_c$  ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าดังนี้คือ

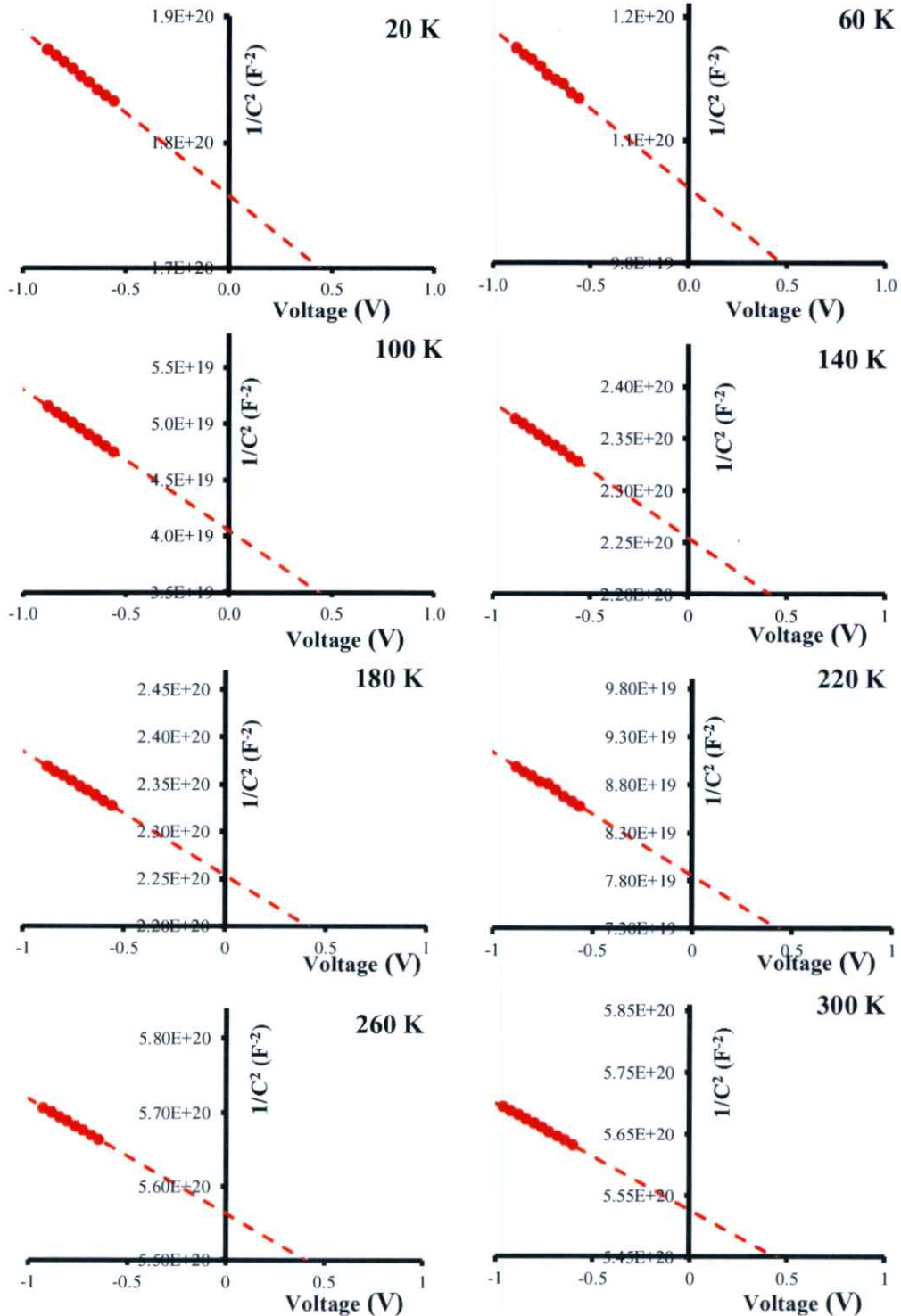
$$N_c = 3.24 \times 10^{14} T^{3/2}$$

ทั้งค่า  $N_d$  และ  $N_c$  จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

จากนั้นสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์[14]

$$\phi_{Bf} = n\phi_{B0} - (n-1) \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.25)$$

ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบนำ ( $N_c$ ) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.30 การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ เป็นเงื่อนไขกำหนดให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบนราบซึ่งขจัดปัญหาการโกฟิวด์อิมิสชันและผลของขอต็ค์ก็ได้ รวมทั้งลดอิทธิพลของความสูงของกำแพงศักย์ย้อนกลับที่ลดทอนผิวสัมผัส

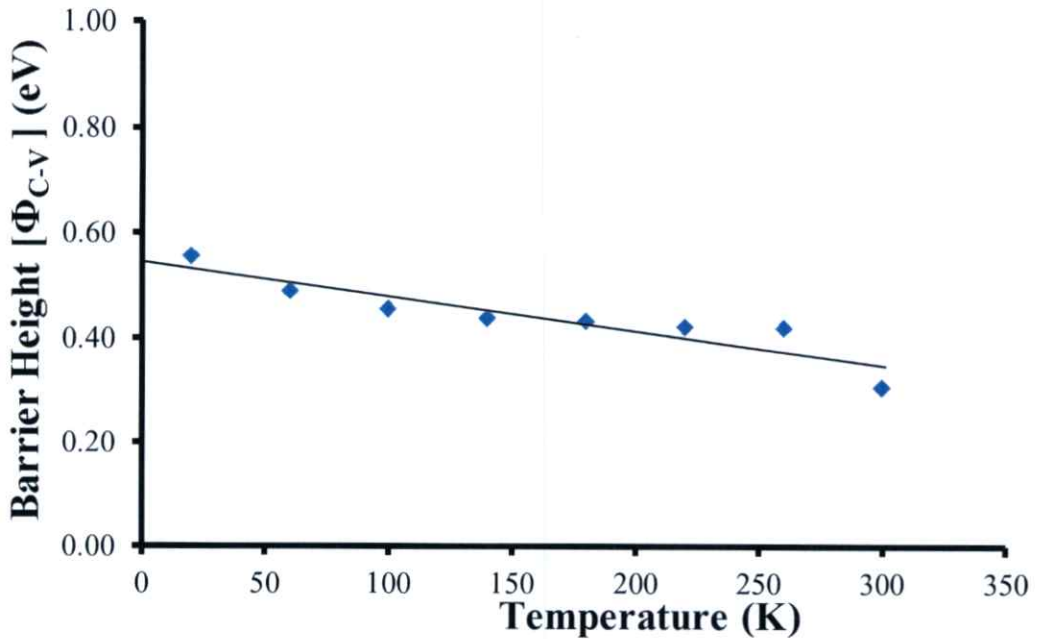


รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่ออวิจรพินท์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

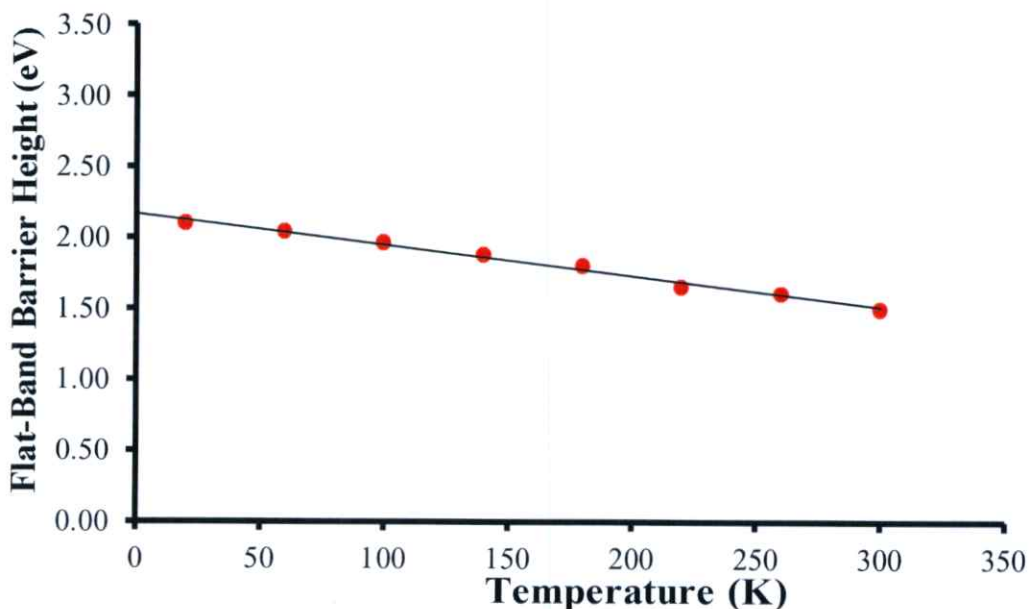
จากรูปที่ 4.28 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 0.393 โวลต์ที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากการศึกษาสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเช่นกัน และมีความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เท่ากับ  $2.45 \times 10^{14}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการทดลองทั้งหมดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) แรงดันตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ความสูงของกำแพงศักย์ ( $\Phi_{c-v}$ ) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ ( $\Phi_{br}$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 -300 เคลวินโดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

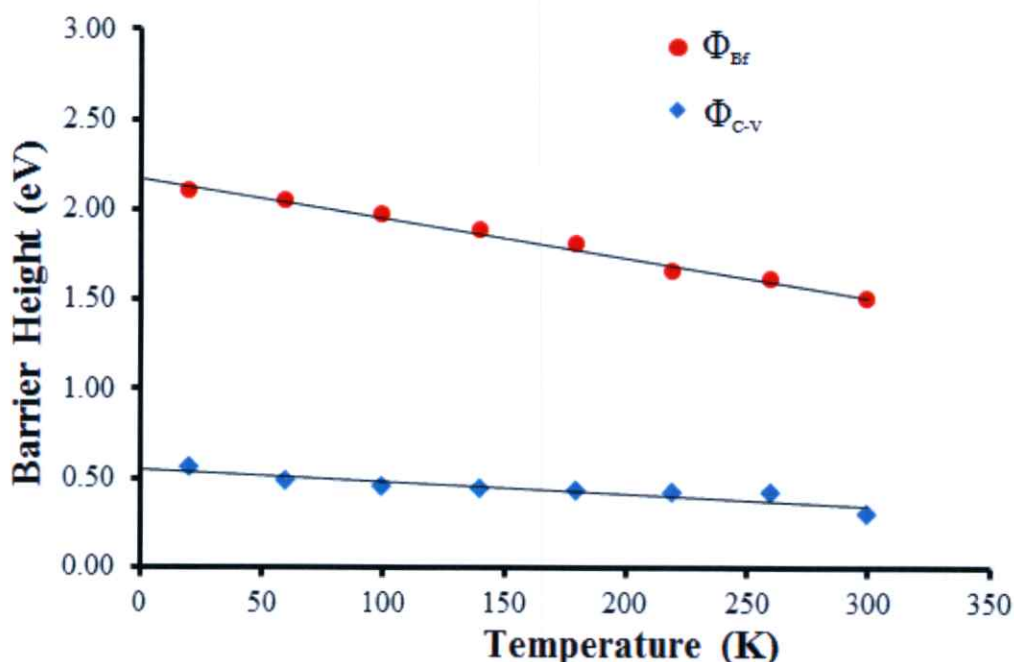
Temperature (K)	$V_{bi}$ (V)	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\Phi_{c-v}$ (eV)	$\Phi_{br}$ (eV)
20	0.505	1.76E+14	0.556	2.100
60	0.472	1.97E+14	0.489	2.043
100	0.462	2.08E+14	0.456	1.964
140	0.439	2.10E+14	0.437	1.882
180	0.433	2.14E+14	0.432	1.803
220	0.430	2.33E+14	0.422	1.652
260	0.421	2.38E+14	0.419	1.612
300	0.393	2.45E+14	0.305	1.500



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ กับอุณหภูมิเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ ( $\Phi_{C-V}$ ) และความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบ ( $\Phi_{Br}$ ) กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน โดยใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

#### 4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากราฟของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง  $-2$  ถึง  $2$  โวลต์ นั้นมีลักษณะเป็นกราฟระฆังคว่ำตามแบบพฤติกรรมของค่าตัวเก็บประจุแบบรอยต่อพีเอ็น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้านั้นลดลงตามความถี่ที่สูงขึ้นตามรูปที่ 4.33 เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้นกับดักประจุจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลบได้น้อย ส่วนรูปที่ 4.34 นั้นจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับแรงดัน ซึ่งจะพบว่าในช่วงความถี่ที่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ไปจนถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์นั้น มีลักษณะเป็นกราฟระฆังคว่ำ

แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการไบแอสตรงรอยต่อวิวิธพันธุ์จะสามารถนำกระแสได้ดีขึ้น ความนำไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร ( $R_s$ ) จะลดลง สำหรับในขณะที่มีการไบแอสกลับทาง กระแสอ้อมตัวย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสกลับทางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรมีค่าลดลงตามไปด้วยดังที่แสดงในรูปที่ 4.35 อีกทั้งจุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์  $G/\omega$ - $V$  จะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความนำไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรมาก และในรูปที่ 4.35 จะเห็นว่าค่าความต้านทานอนุกรมยังขึ้นกับแรงดันไบแอสและความถี่ด้วย

จากรูปที่ 4.34 นั่นคือกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับแรงดันที่ได้มาจากการนำค่าความนำไฟฟ้ามาหารด้วยความถี่เชิงมุมที่ป้อนเข้าไปโดยมีค่าเท่ากับ  $\omega = 2\pi f$  และพบว่าในช่วงความถี่ 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ไปจนถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์นั้นก็ยังคงได้ลักษณะของกราฟที่เป็นระฆังคว่ำ นอกจากนี้จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับแรงดันนี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS/p-CuO ซึ่งตั้งสมมติฐานได้ว่ามีชั้นบางๆของ อินทรีนิก CuO กั้นอยู่จากสมการของความนำไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อ คือ [20]

$$\frac{G_{it}}{\omega} = \frac{\omega G_m (C_{dep}^{i-CuO})^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{dep}^{i-CuO} - C_m)^2} \quad (4.26)$$

เมื่อ  $G_m$  และ  $C_m$  คือค่าความนำไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดที่ค่าความถี่ใดๆ ส่วน  $C_{dep}^{i-CuO}$  คือความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะของชั้นอินทรีนิกของสารกึ่งตัวนำ CuO จากสมการที่ (4.26) เมื่อทำให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นของกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) จะได้ว่า

$$\frac{G_{it}}{\omega} = \frac{q\omega\tau_{it}D_{it}}{1 + (\omega\tau_{it})^2} \quad (4.27)$$

และจากสมการที่ (4.27) ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ  $\left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{max}$  เพื่อใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อได้ดังนี้ คือ

$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{\max}}{0.402qA} \text{ หรือ } D_{it} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{\max} \quad (4.28)$$

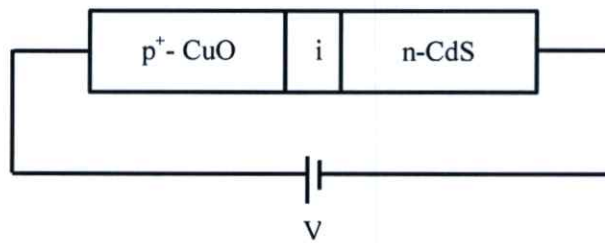
ซึ่ง  $\frac{G_p}{\omega}$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\omega\tau_{it}=1.98$

และสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$R_s = \frac{G_{acc}}{G_{acc}^2 + \omega^2 \cdot C_{acc}^2} \quad (4.29)$$

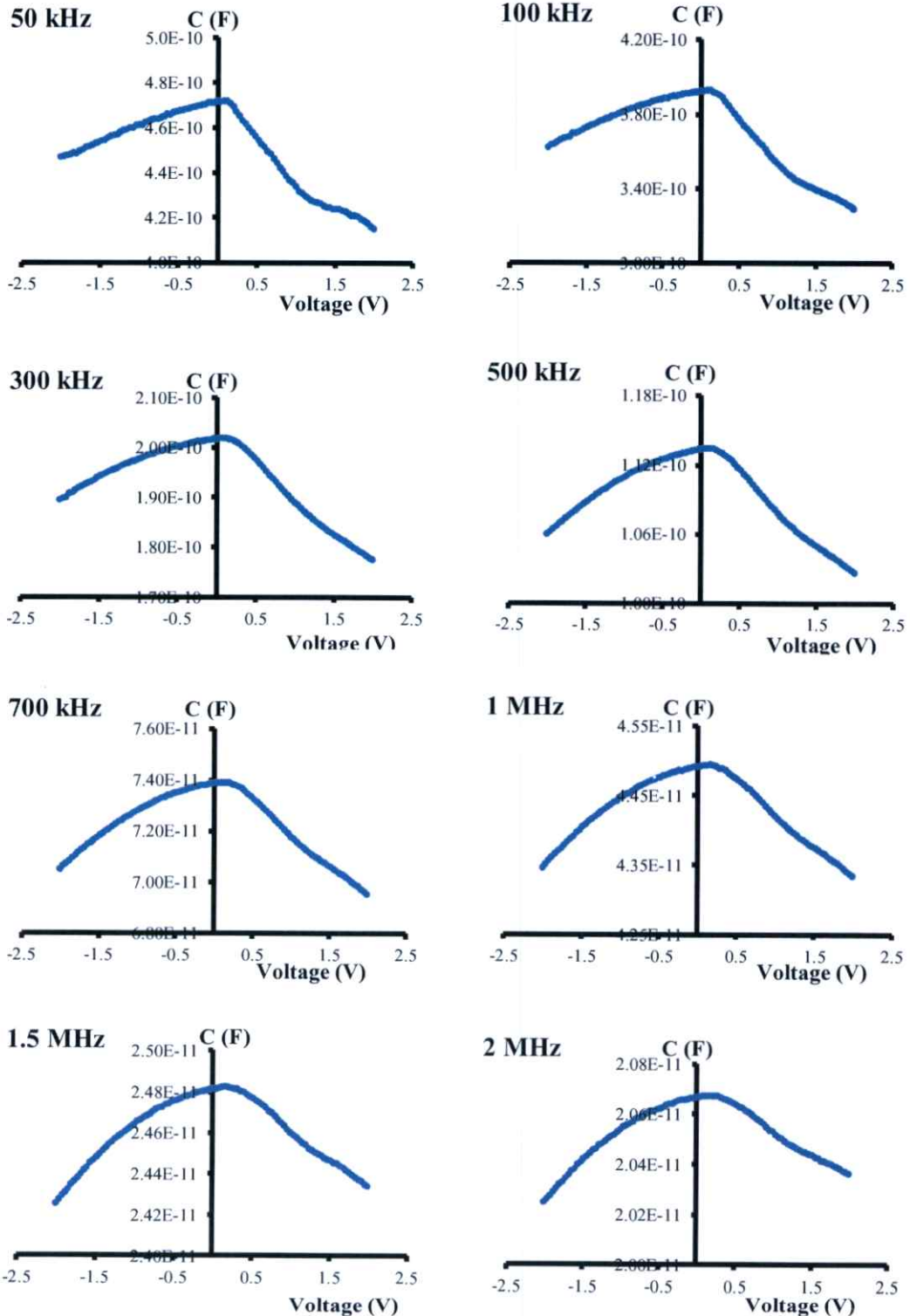
ที่  $G_{acc}$  คือ ความนำไฟฟ้าในบริเวณขุมนุมาพาหะ

$C_{acc}$  คือ ความจุไฟฟ้าในบริเวณขุมนุมาพาหะ

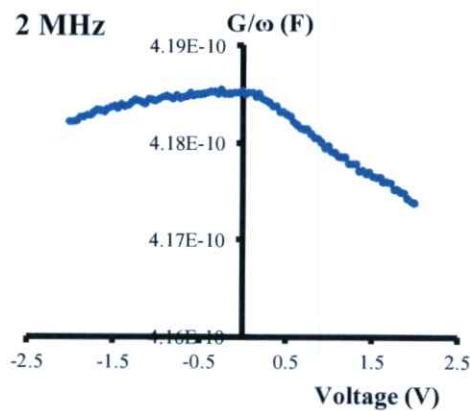
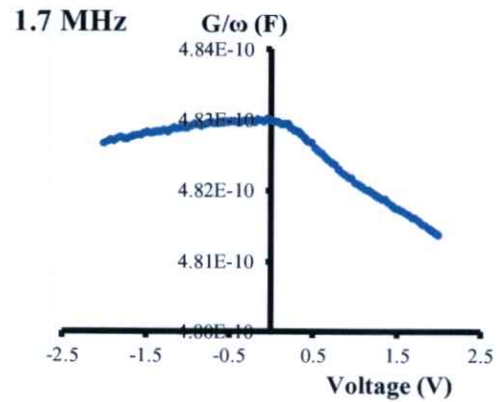
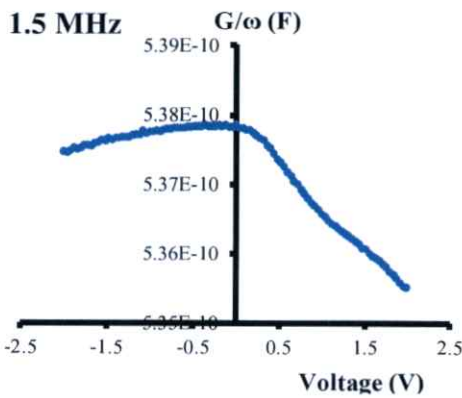
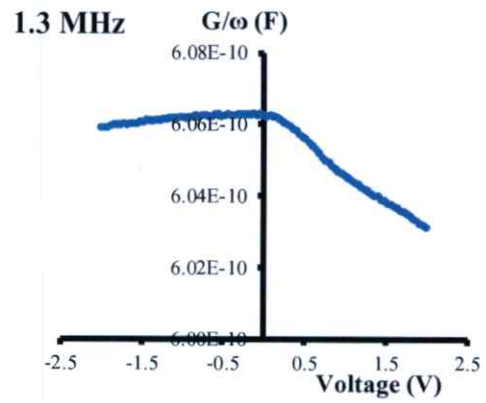
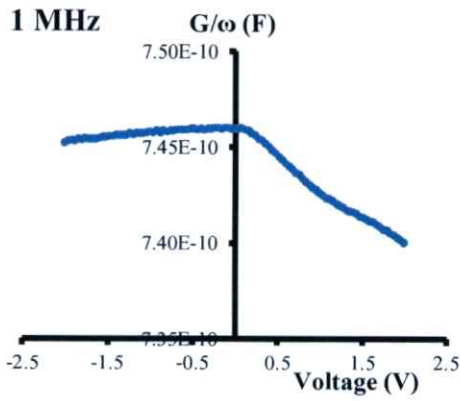


รูปที่ 4.32 แสดงแผนภาพรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในบริเวณขุมนุมาพาหะ โดยตั้งสมมุติฐานว่ามีชั้นอินทรินสิก (i) ของสารกึ่งตัวนำ CuO ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ

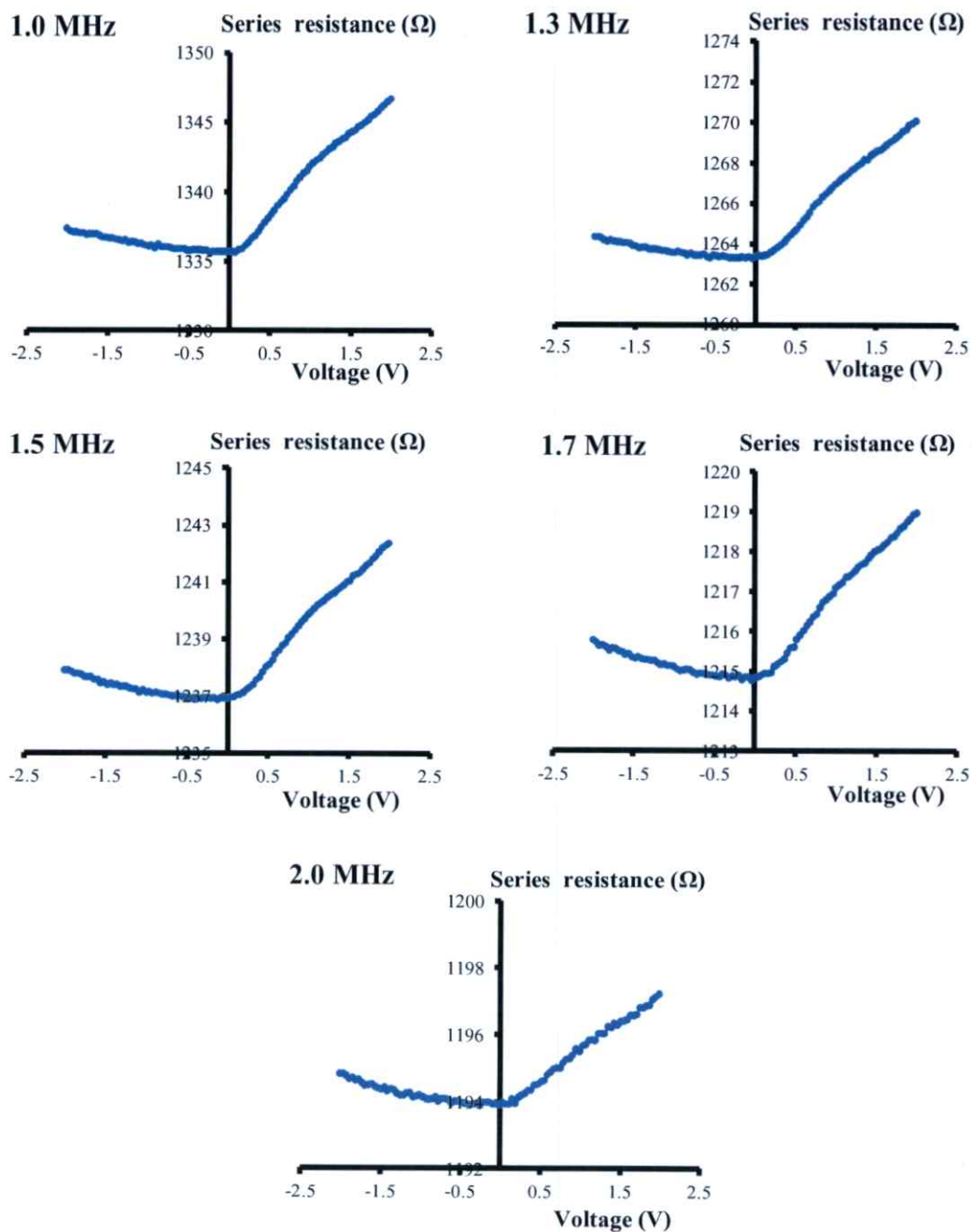
กรณีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในบริเวณขุมนุมาพาหะจะเกิดเมื่อแรงดันที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ p-CuO เป็นไฟบวก (+) ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_s$  กับ แรงดันไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 4.35 ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ค่าค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่าสูงสุด จากรูปที่ 4.33 รูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งสอดคล้องดีกับสมการที่ (4.29) ค่าความต้านทานอนุกรมลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ามีก็จะลดลงด้วย



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวินของรอยต่อวิวิชพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



**รูปที่ 4.34** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า ( $G/\omega$ ) กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิชนันท์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

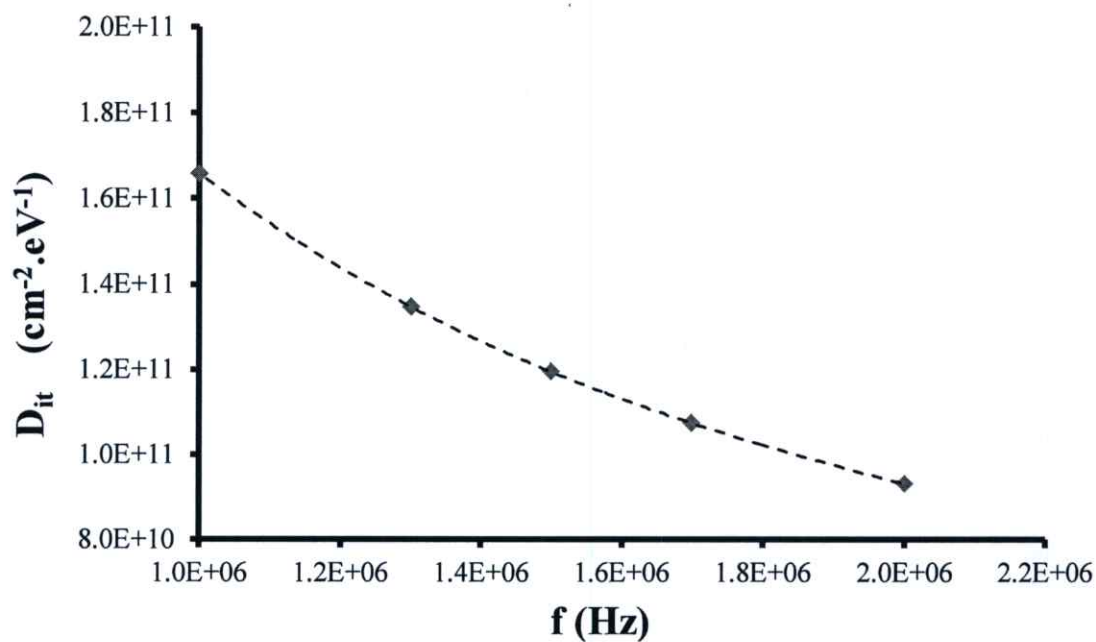


รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_s$  กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิรตซ์ และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความหนาแน่นของกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.36 นอกจากนี้ในตารางที่ 4.5 ยังแสดงค่าของค่าความจุไฟฟ้าและค่า  $G_m/\omega$  สูงสุด ซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ของสถานะผิวเชื่อมต่อ กล่าวคือเมื่อมีค่าความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้สถานะกับกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนองโดยการจับและปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด ดังนั้นความหนาแน่นของกักที่ประจักษ์จึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

**ตารางที่ 4.5** แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_m$ ) ความจุไฟฟ้าสูงสุด ( $C_m$ ) ความนำไฟฟ้าสูงสุด ( $G_m/\omega$ ) ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) และค่าความต้านทาน ( $R_s$ ) เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิรตซ์และที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของรอยต่อวิธีพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p- CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Frequency (Hz)	$V_m$ (V)	$C_m$ ( $\times 10^{-10}$ F)	$G_m/\omega$ ( $\times 10^{-10}$ F)	$D_{it}$ ( $\times 10^{11}$ cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> )	$R_s$ (k $\Omega$ ) (bias = 1V)
50 k	0.18	4.72	-	-	-
100 k	0.16	3.92	-	-	-
200 k	0.14	2.78	-	-	-
300 k	0.12	2.01	-	-	-
500 k	0.11	1.13	-	-	-
700 k	0.11	0.78	-	-	-
1.0 M	0.10	0.44	7.46	1.65	1.33
1.3 M	0.09	0.30	6.06	1.34	1.26
1.5 M	0.08	0.24	5.38	1.19	1.23
1.7 M	0.08	0.20	4.83	1.07	1.21
2.0 M	0.07	0.16	4.19	0.93	1.19



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับความถี่ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.44 พบว่าในกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิสูง ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น และค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิสูง พบว่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น และค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย

จากนั้นจึงทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ดังรูปที่ 4.39 ถึงรูปที่ 4.43 และความนำไฟฟ้ากับความถี่จากรูปที่ 4.45 ถึงรูปที่ 4.49 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่แรงดันศูนย์โวลต์ไปจนถึงแรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 0.5 โวลต์จะมีค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าสูงที่สุด จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าก็จะลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -0.5 โวลต์ โดยขึ้นกับสมการความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ว่าเมื่อมีระดับพลังงานของกับดักประจุมีเพียงค่าเดียว (single trap)

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.30)$$

โดย  $C_{it} = qD_{it}$  และ  $\omega\tau = 1$

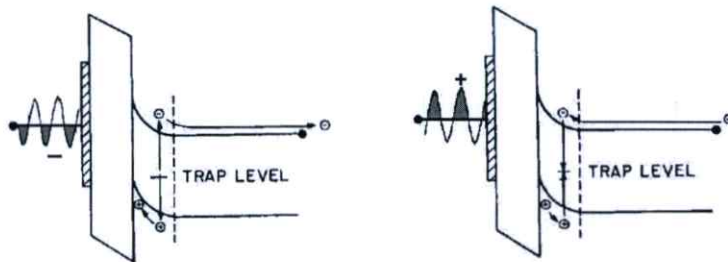
และถ้ากรณีที่มีกับดักประจุมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \tan^{-1}(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}} \quad (4.31)$$

เมื่อ  $C_D$  คือ ความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน  $C_{it}$  คือความจุไฟฟ้าของกับดักประจุ

โดย  $C_{it} = qD_{it}$  และ  $\omega\tau = 1.98$

พฤติกรรมการจับและคายประจุของตัวเก็บประจุภายในบริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นจะเป็นดังรูปที่ 4.37 กล่าวคือ เมื่อมีสัญญาณไฟลปที่มีค่าความถี่ต่ำเข้ามาสู่รอยต่อ แบบ MIS อิเล็กตรอนที่อยู่ในกับดักประจุจะถูกเหนี่ยวนำให้หลุดออกจากกับดักประจุแล้วเคลื่อนที่ไปยังบริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะ และจะเหนี่ยวนำให้โฮลมาชุมนุมกันที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และเมื่อได้รับสัญญาณไฟบวกเข้ามาอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะจะถูกดึงเข้ามายังกับดักประจุในบริเวณพร่องพาหะส่วนโฮลที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำจะถูกผลักกลับไปสู่กับดักประจุเช่นเดิม โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ไปมาอยู่เสมอเมื่อมีการจ่ายสัญญาณไฟสลับที่มีค่าความถี่ต่ำให้กับรอยต่อ



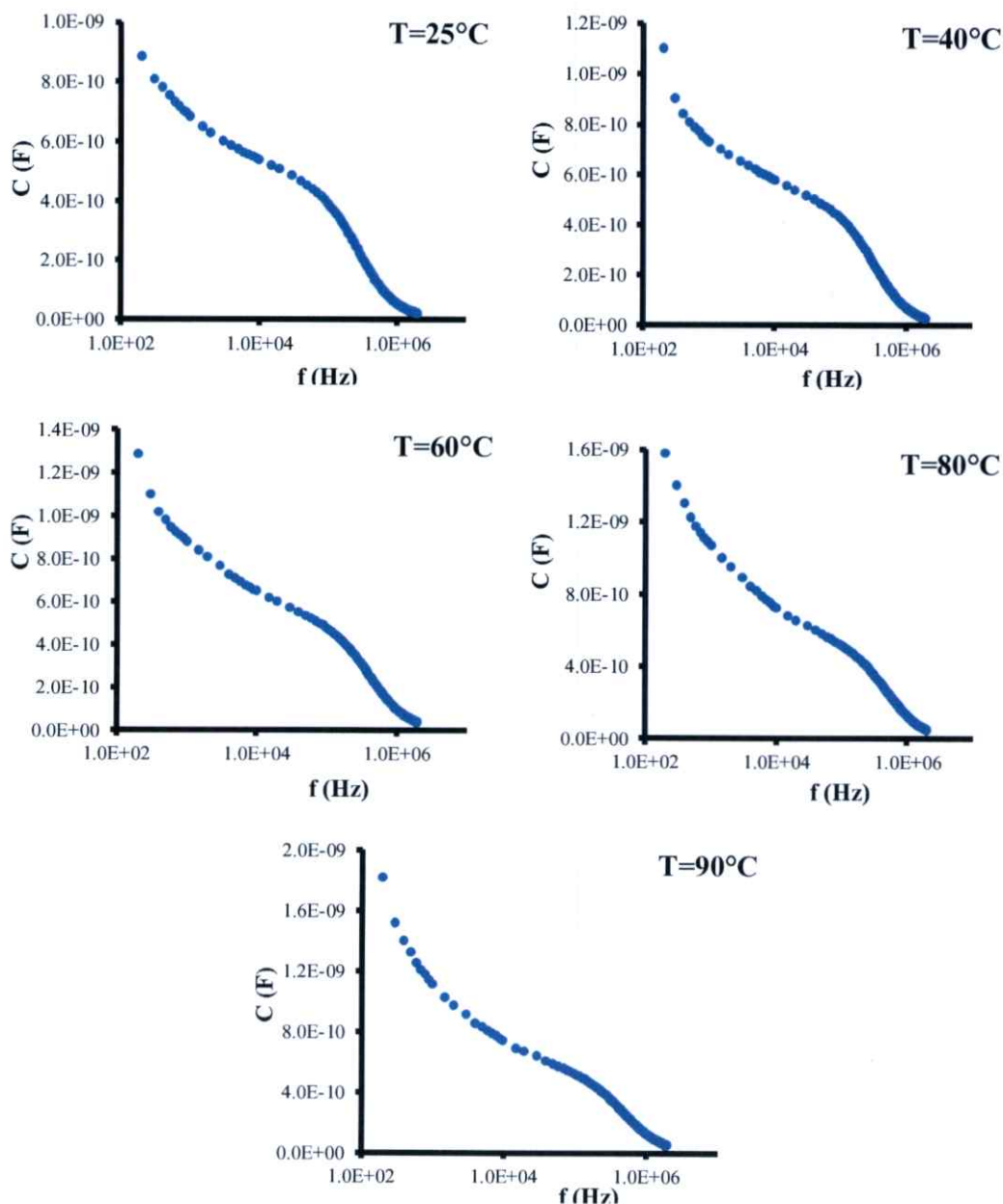
รูปที่ 4.37 แสดงการจับและคายประจุของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ

จากรูปที่ 4.44 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่พบว่าความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ จอนเชอร์ (Joncher relation) [31] คือ

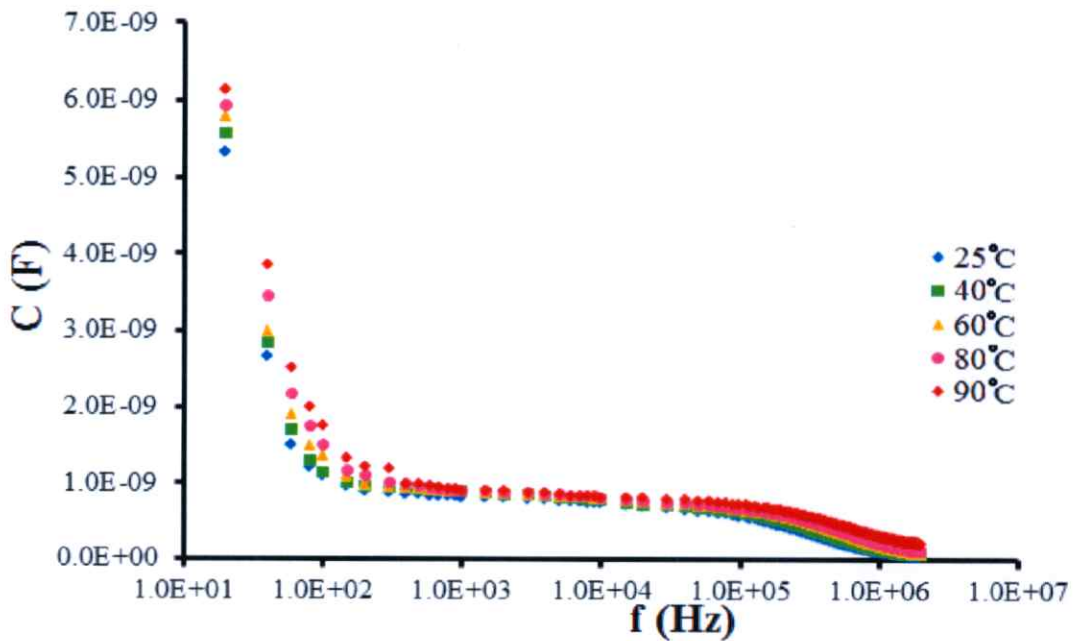
$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^s \quad (4.32)$$

เมื่อ  $A$  คือค่าคงที่ ส่วนเลขยกกำลัง  $s$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 และนอกจากนี้เมื่อนำค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาเขียนเป็นกราฟของค่า  $G/\omega$  กับความถี่ดังรูปที่ 4.50 ถึง รูปที่ 4.54 ก็ยังคงแสดงให้เห็นช่วงของการตอบสนองของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ความถี่เป็นสองช่วง ได้อย่างชัดเจนโดยค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับความถี่เฉพาะที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักประจุ ( $\omega_0$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

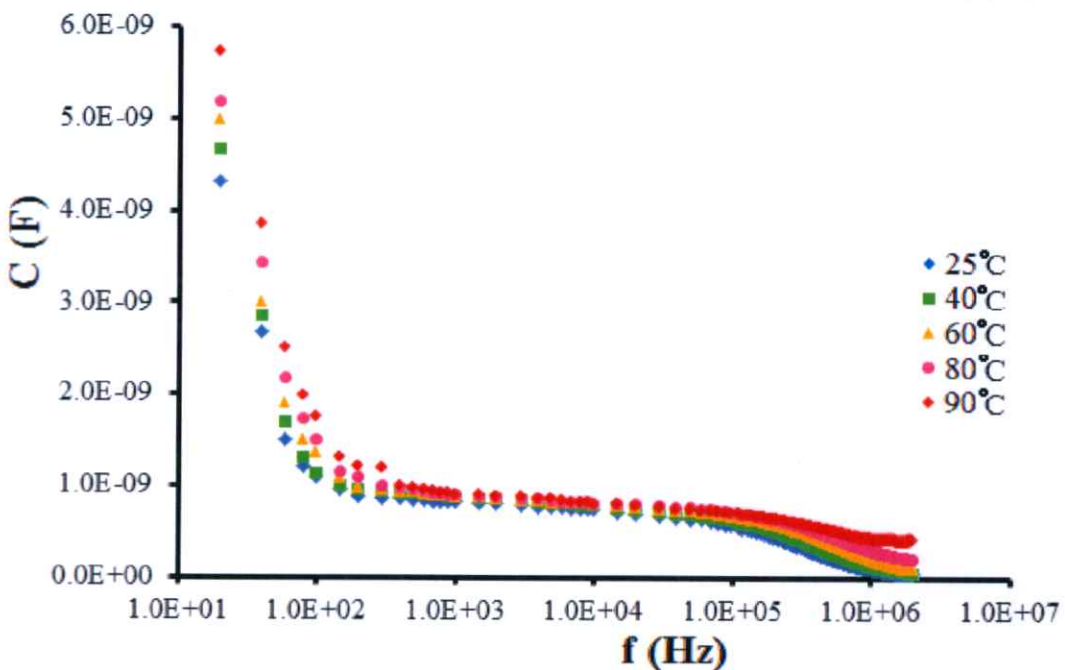
การหาค่าความถี่เฉพาะ ( $\omega_0$ ) นอกจากความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่แล้วก็ยังสามารถหาได้หลายวิธีด้วยกัน โดยเริ่มจากการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับลอการิทึมของความถี่เชิงมุมจะทำให้ช่วงจุดเปลี่ยนโค้งของค่าความจุกลายเป็นจุดสูงสุดของรูปที่ 4.58 ถึง รูปที่ 4.62 ซึ่งค่า  $\omega_0$  ที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงดังที่แสดงในตารางที่ 4.6



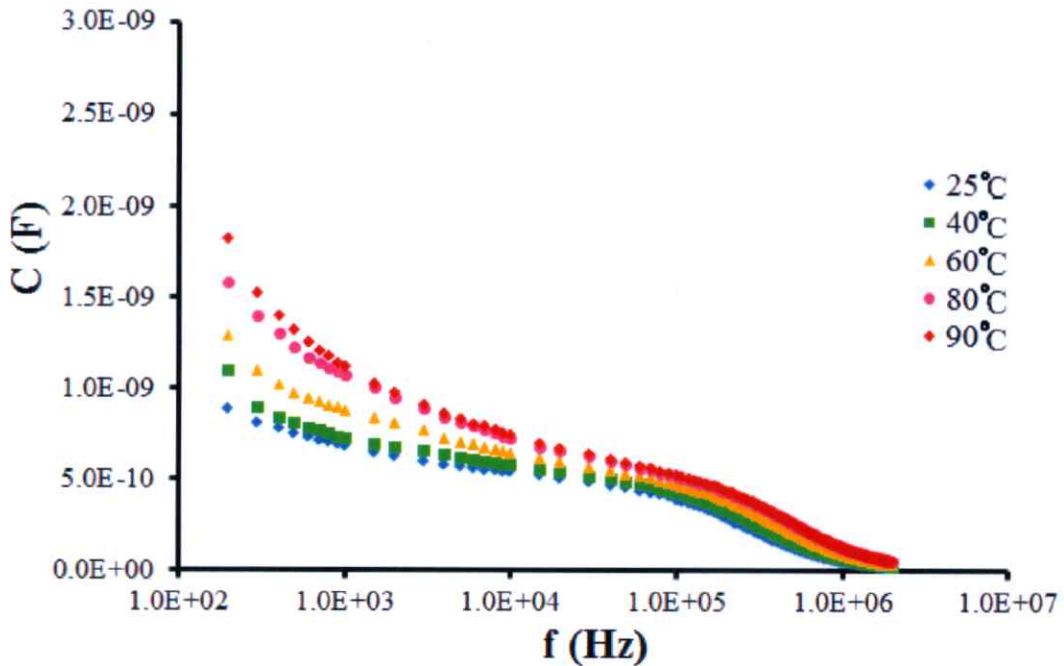
**รูปที่ 4.38** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่ออวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



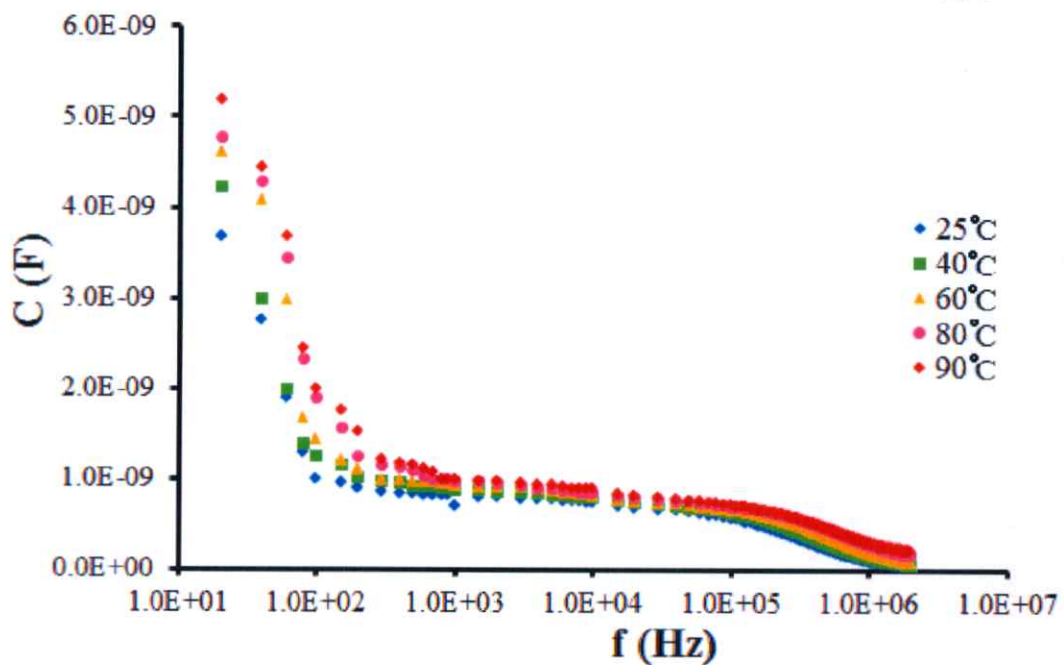
รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



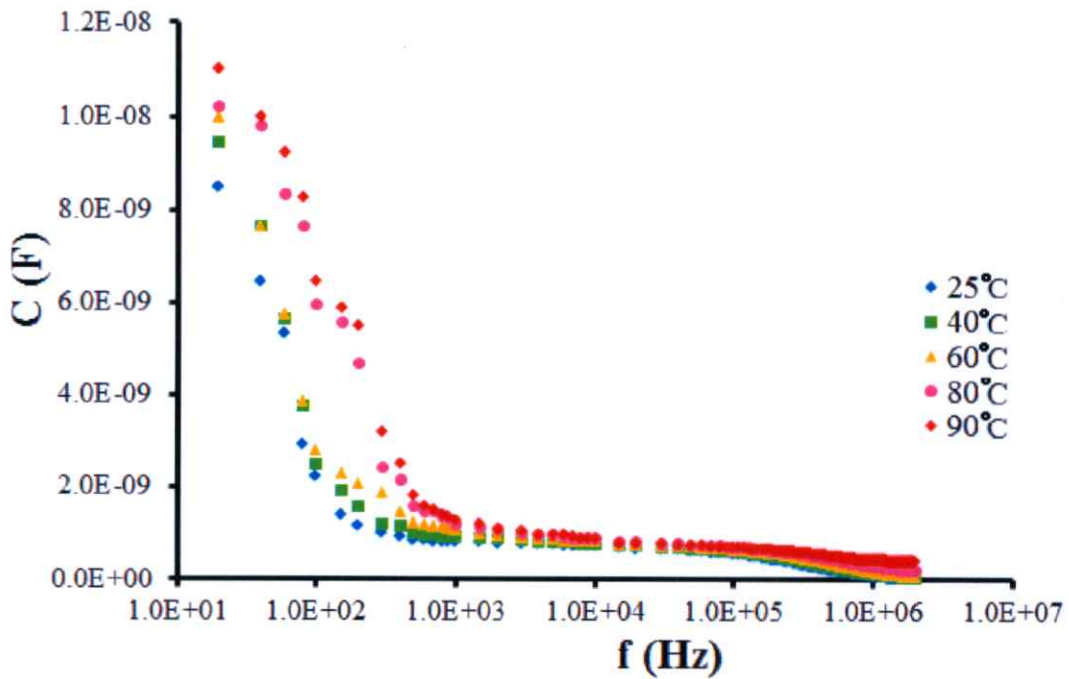
รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



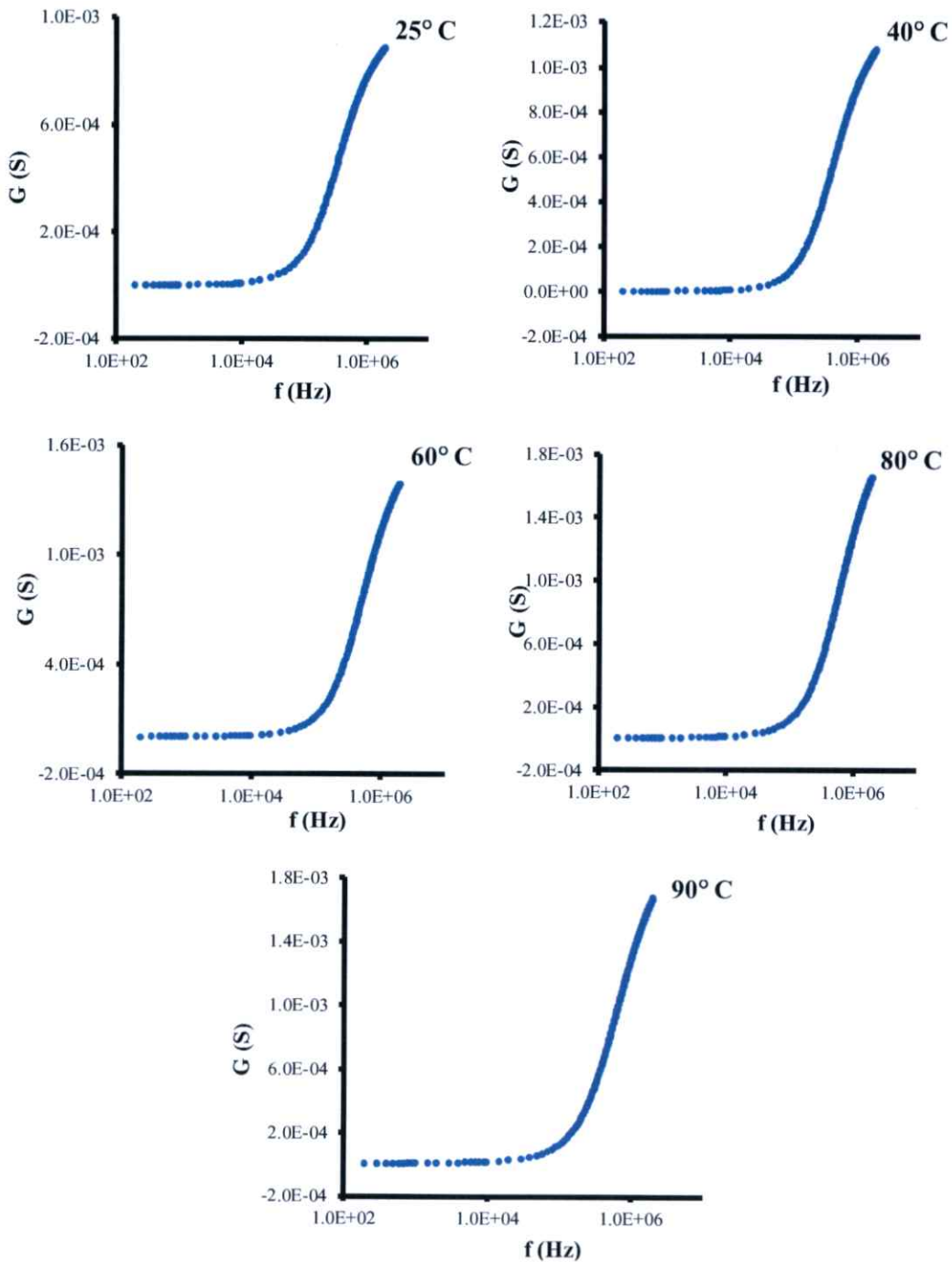
รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



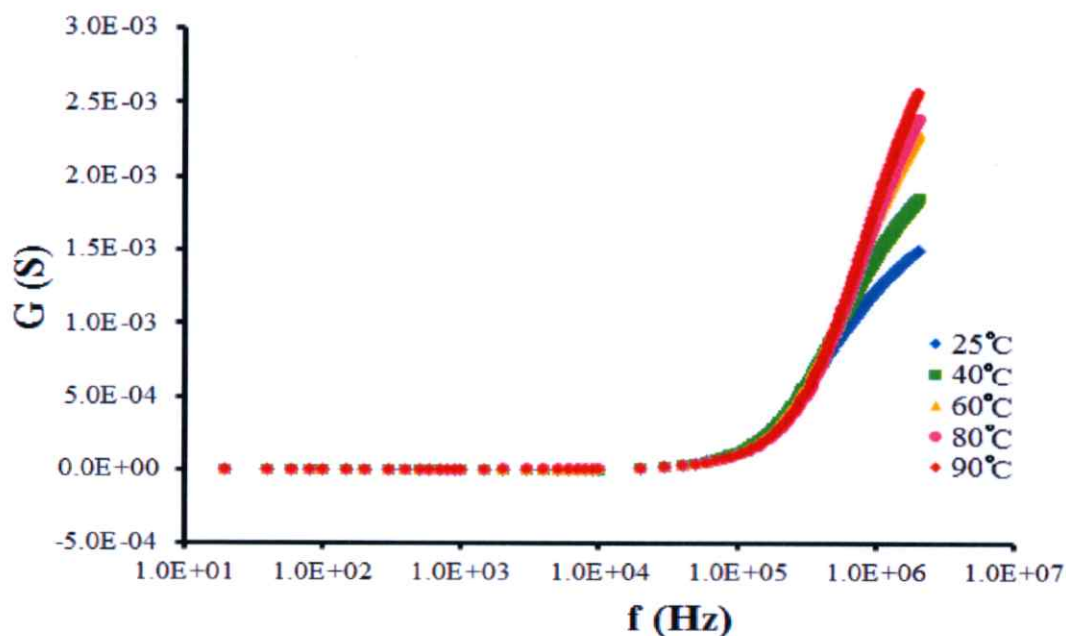
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



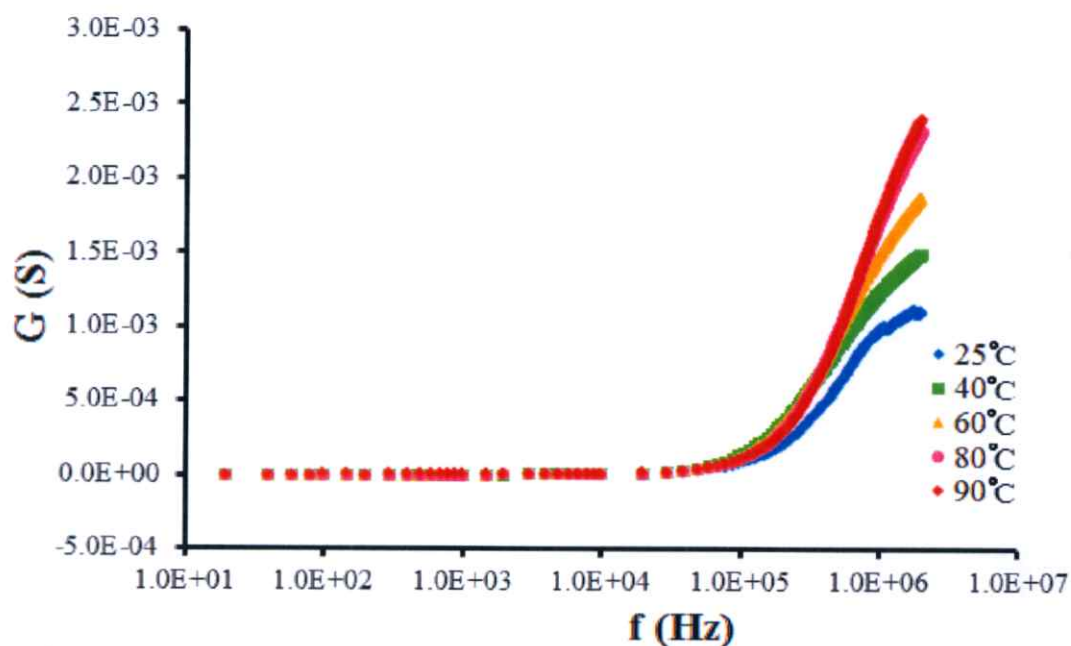
รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



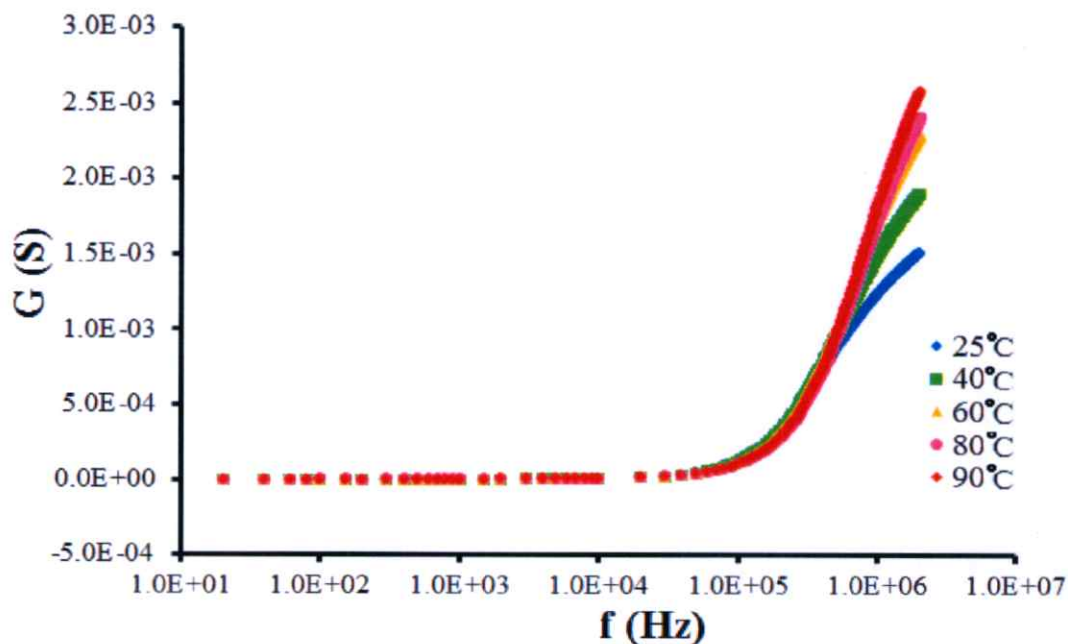
**รูปที่ 4.44** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่ออวิวิชันของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



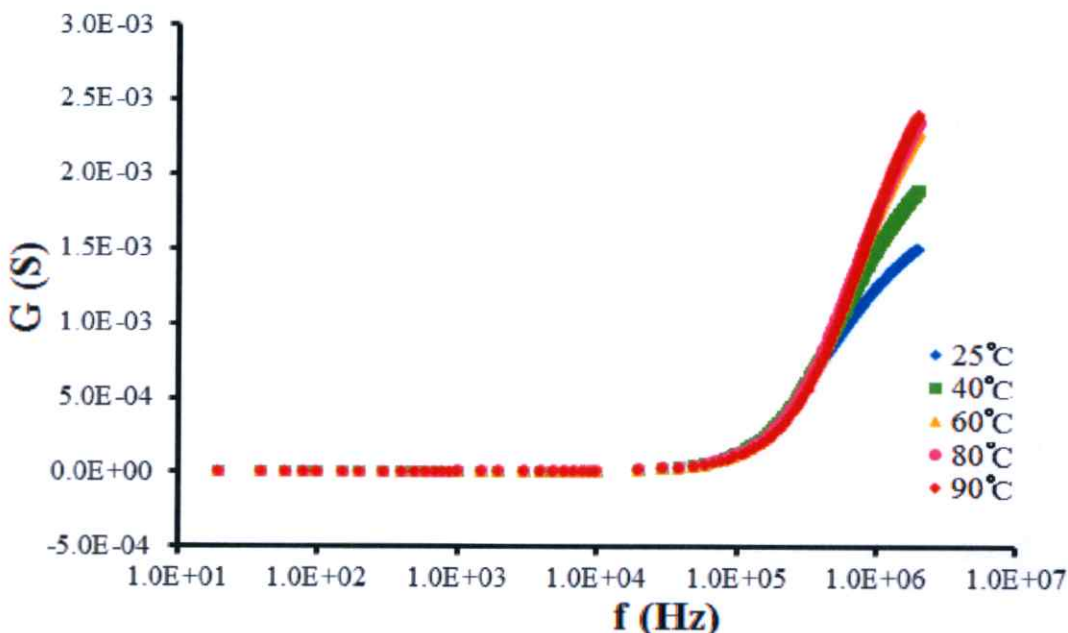
รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่ออวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



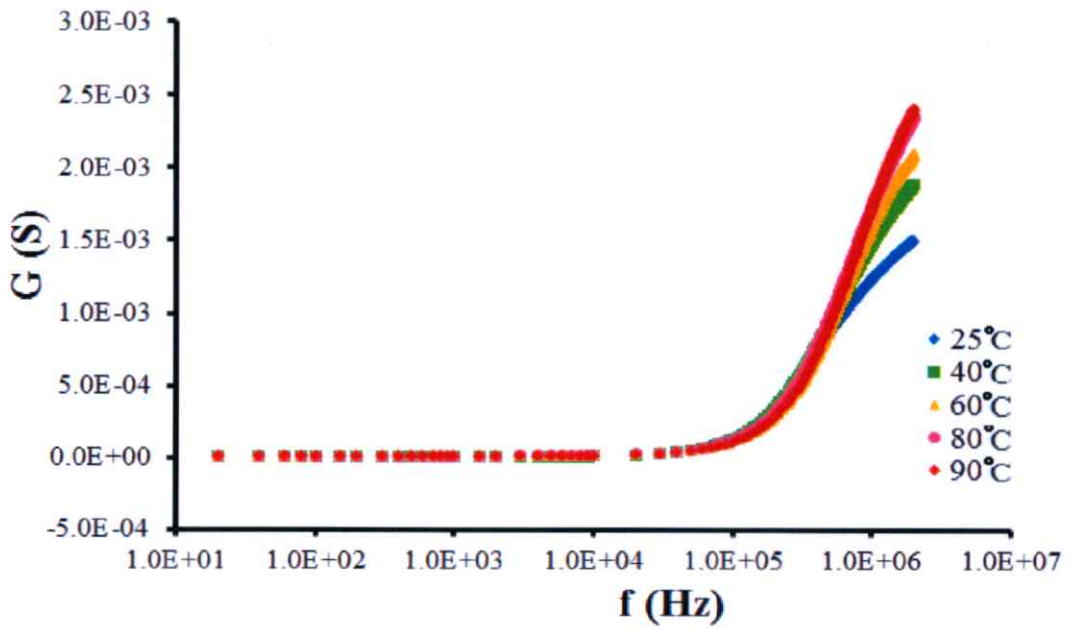
รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่ออวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์– 2 เมกะเฮิรตซ์ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เมื่อนำเอาข้อมูลของความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาหารด้วยความถี่เชิงมุม ( $2\pi f$ ) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความถี่ที่มีการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง  $-0.5$  ถึง  $0.5$  โวลต์ ดังรูปที่ 4.50 ถึงรูปที่ 4.54 จะเห็นว่ากราฟของค่า  $G/\omega$  จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำในช่วงความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิรตซ์ขึ้นไป ส่วนในช่วงที่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิรตซ์นั้นจะเป็นเส้นโค้งลงเชื่อมต่อเป็นหางของกราฟระฆังคว่ำ โดยจุดสูงสุดของกราฟระฆังคว่ำนั้นหมายถึงจุดที่มีค่าความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่ทำให้พาหะสามารถหลุดออกจากกับดักได้ หรือจะอธิบายได้อีกอย่างว่า ณ จุดความถี่ที่เกิดค่า  $G/\omega$  สูงสุดนั้น คือความถี่ที่สอดคล้องกับพลังงานที่สัญญาณไฟสลับสูญเสียไปเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักประจุ ซึ่งจะนำมาใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของกับดักและช่วงชีวิตของพาหะที่ระดับพลังงานต่างๆ ได้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับสมการที่ว่า

เมื่อกับดักประจุมีระดับพลังงานเพียงค่าเดียว (single trap)

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.33)$$

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักได้จาก

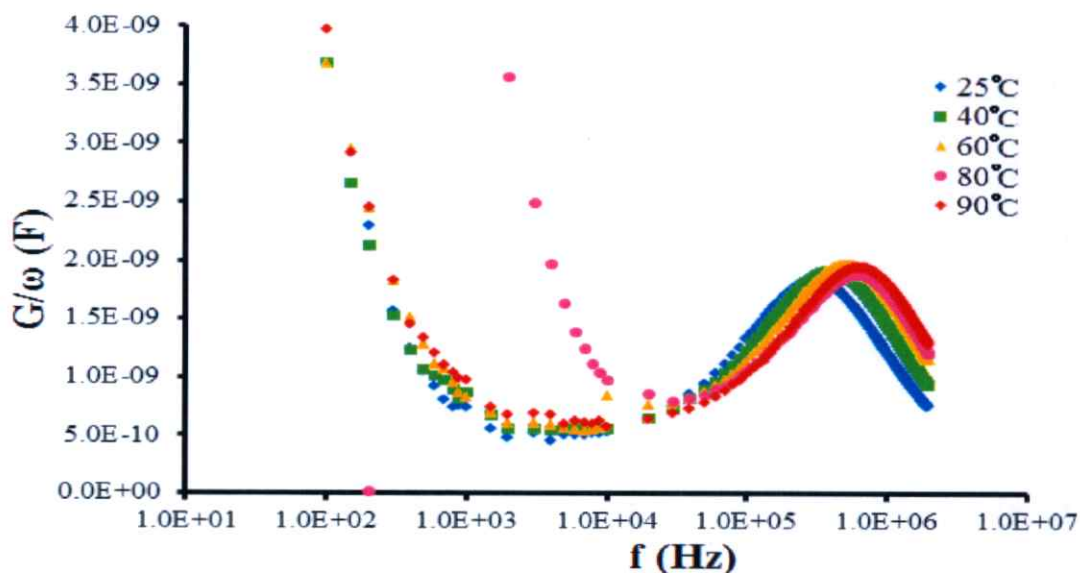
$$D_{it} = \frac{2}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (4.34)$$

และถ้ากรณีที่มีกับดักมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

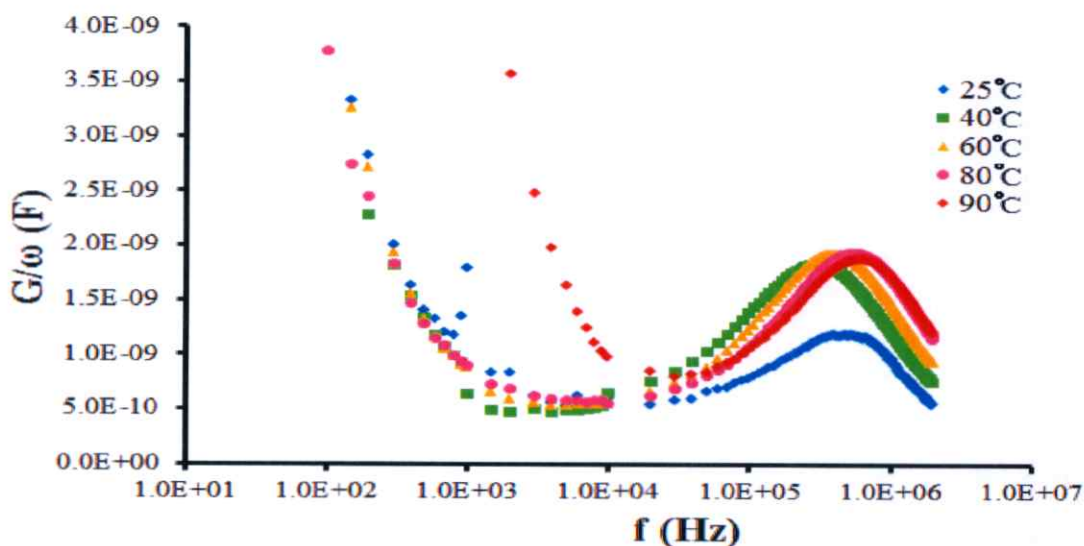
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2)}{2\omega \tau_{it}} \quad (4.35)$$

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักได้จาก

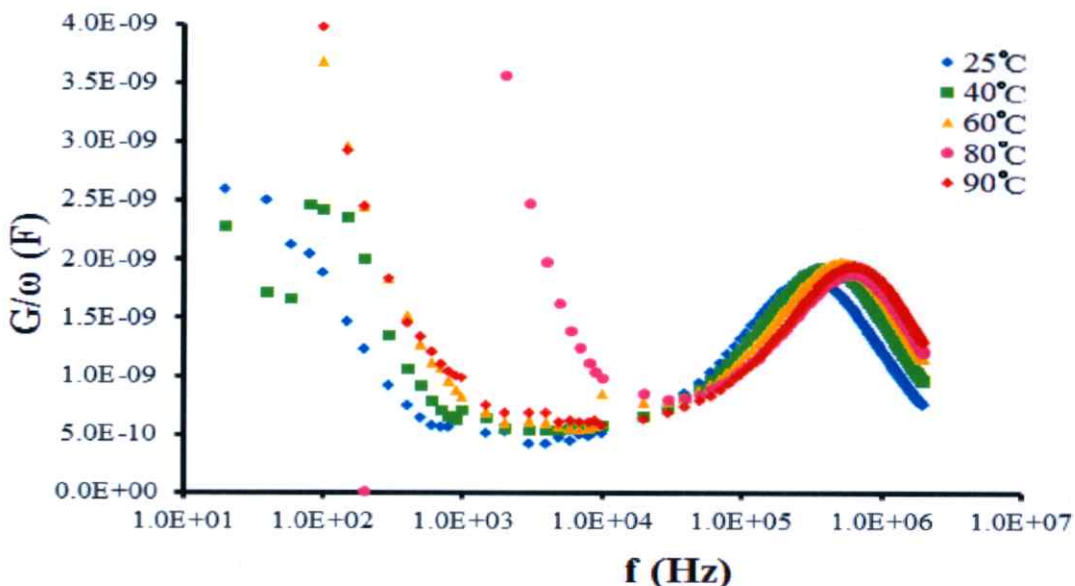
$$D_{it} \approx \frac{2.5}{q} \left( \frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (4.36)$$



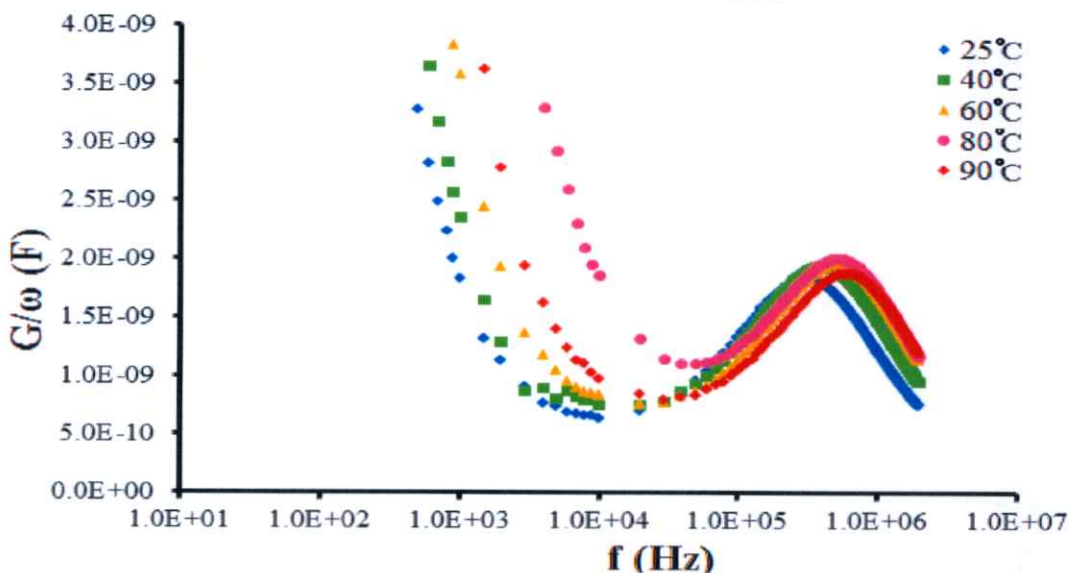
รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



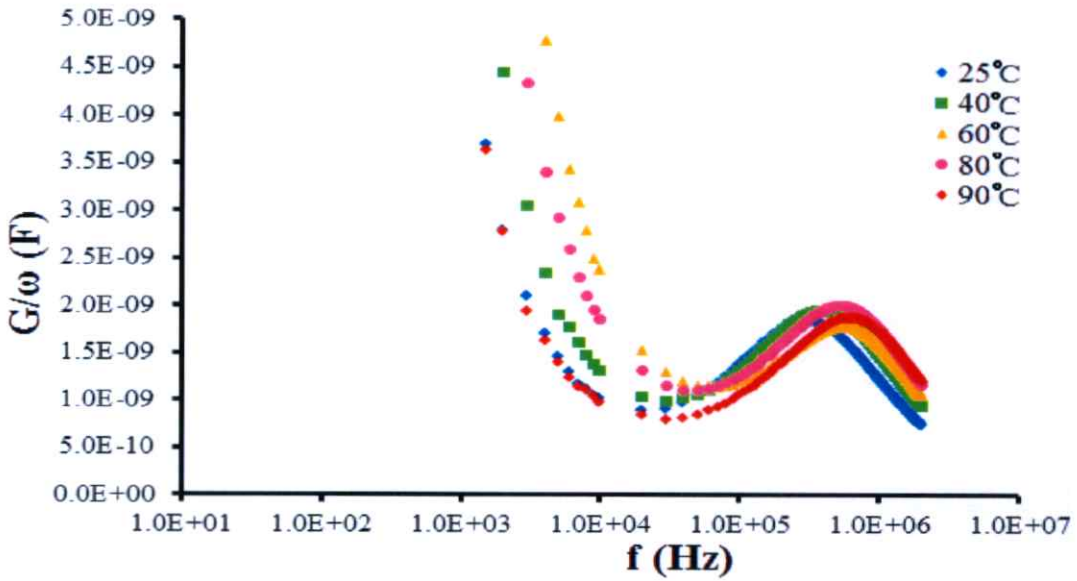
รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



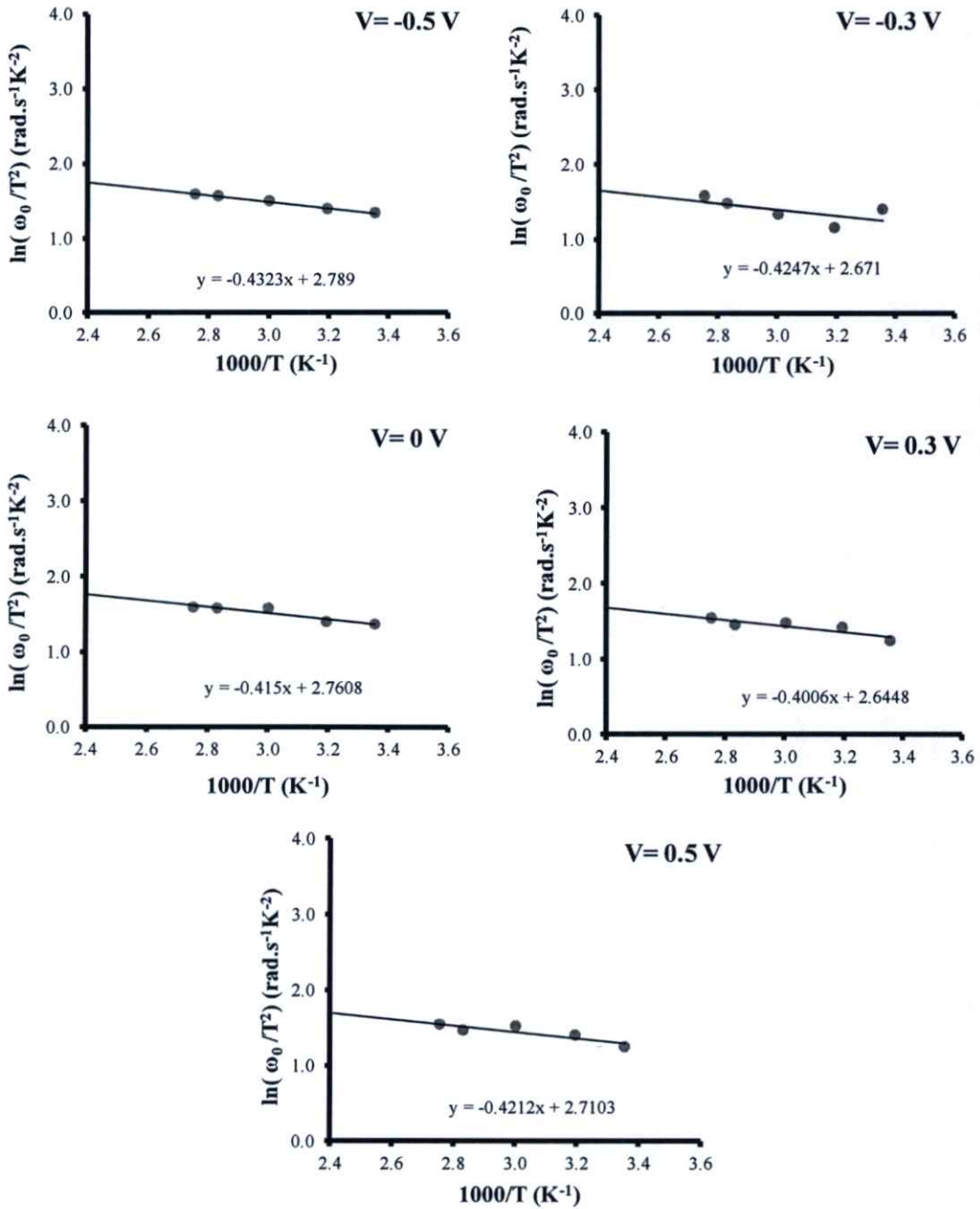
รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



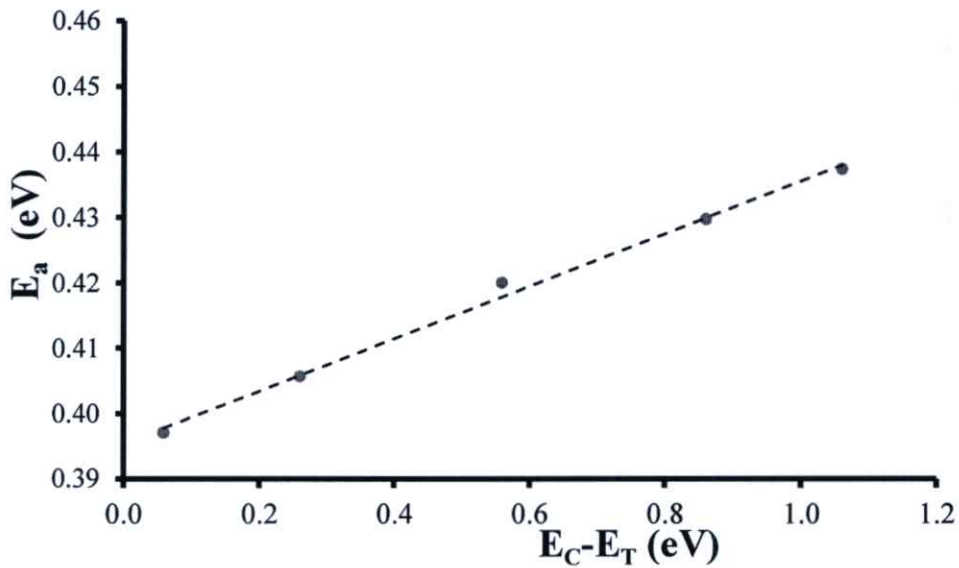
**รูปที่ 4.54** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



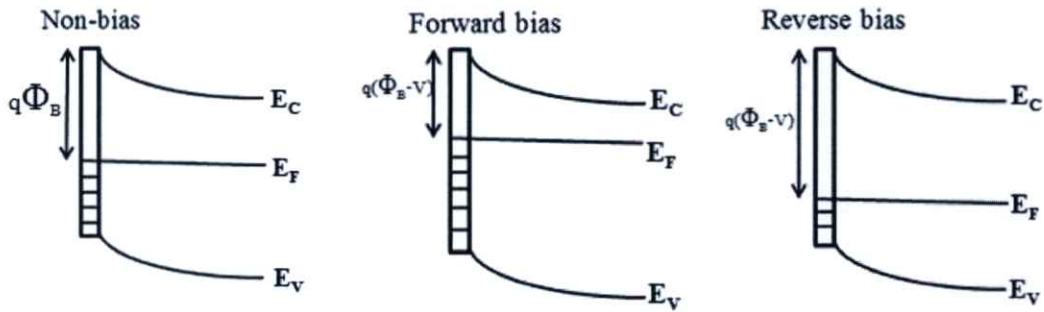
รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหา  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $E_C-E_T$  ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) และค่าความหนาแน่นของกักตักที่ผิวเชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Bias Voltage (V)	$E_C-E_T$ (eV)	$E_a$ (eV)	$D_{it}$ ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ )
-0.5	1.06	0.038	4.32E+11
-0.3	0.86	0.037	4.28E+11
0	0.56	0.036	4.24E+11
0.3	0.26	0.035	4.21E+11
0.5	0.06	0.034	4.17E+11

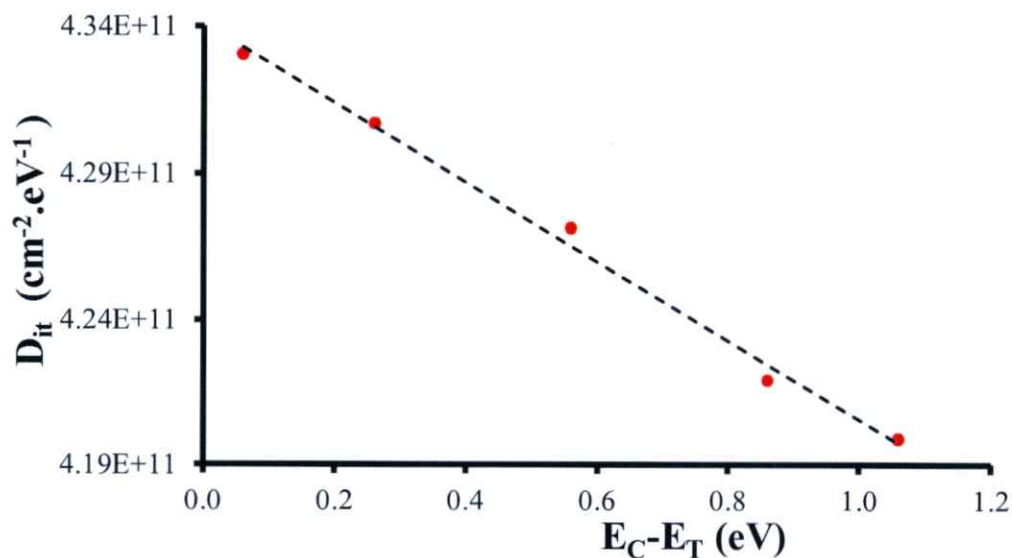


รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_a$  กับ  $E_C-E_T$  ที่ได้จากการหา  $\omega_0$  จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

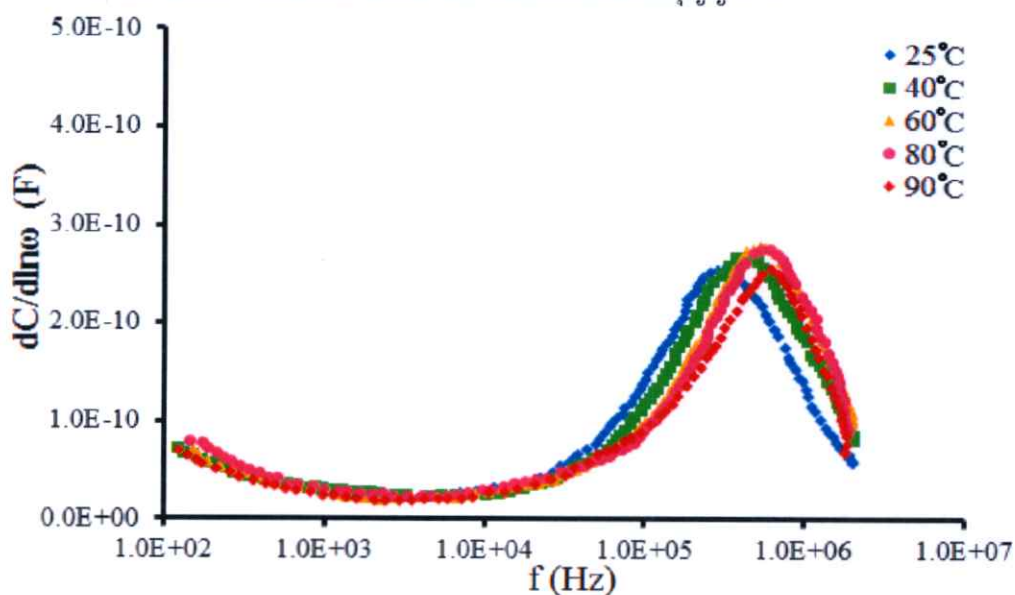


รูปที่ 4.57 แสดงแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานที่แสดงค่า  $E_C - E_T$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $q(\Phi_B - V)$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอส

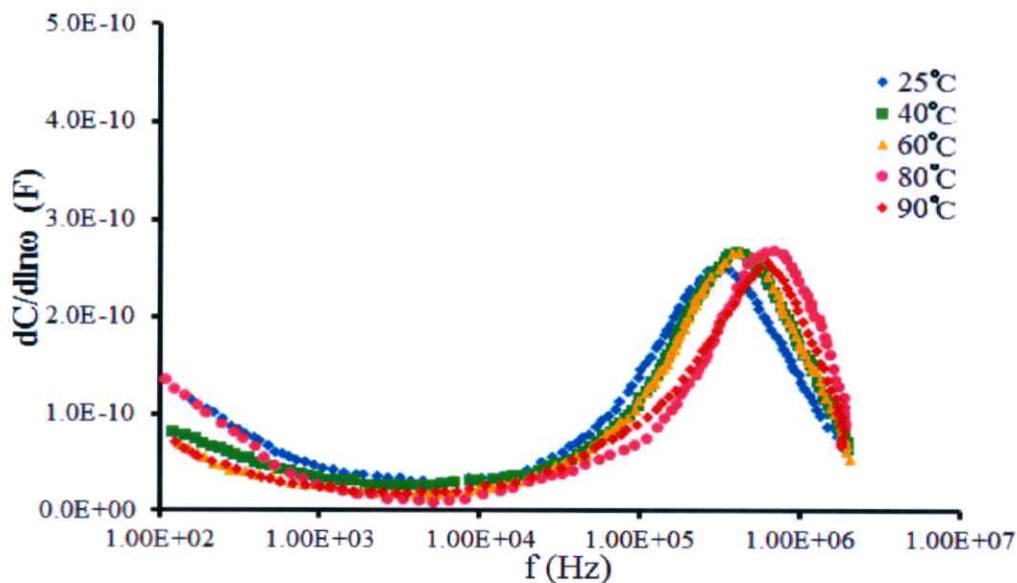
จากตารางที่ 4.6 ค่า  $E_C - E_T$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์  $E_C - E_T = q(\Phi_B - V)$  เมื่อ  $\Phi_B$  คือค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในช่วงแรงดันไบแอสไปหน้า  $E_C - E_T$  จะมีค่าลดลง แต่สำหรับในช่วงแรงดันไบแอสย้อนกลับ  $E_C - E_T$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีไม่มีกับดักประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ระดับเฟอร์มิที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ สามารถเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงได้ตามแรงดันไบแอส พลังงานกระตุ้น ( $E_u$ ) ที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.6 คือผลต่างระหว่างระดับพลังงานกับกับดักประจุ ( $E_T$ ) กับ  $E_C$  ซึ่งจากการทดลองพบว่า  $E_u$  มีค่าต่างจาก  $E_C - E_T$  ค่อนข้างมาก แสดงว่าในความเป็นจริงระดับเฟอร์มิเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงตามแรงดันไบแอสเพียงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าระดับเฟอร์มิถูกตรึงอย่างแรงที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิทธิพลของสถานะผิวเชื่อมต่อ



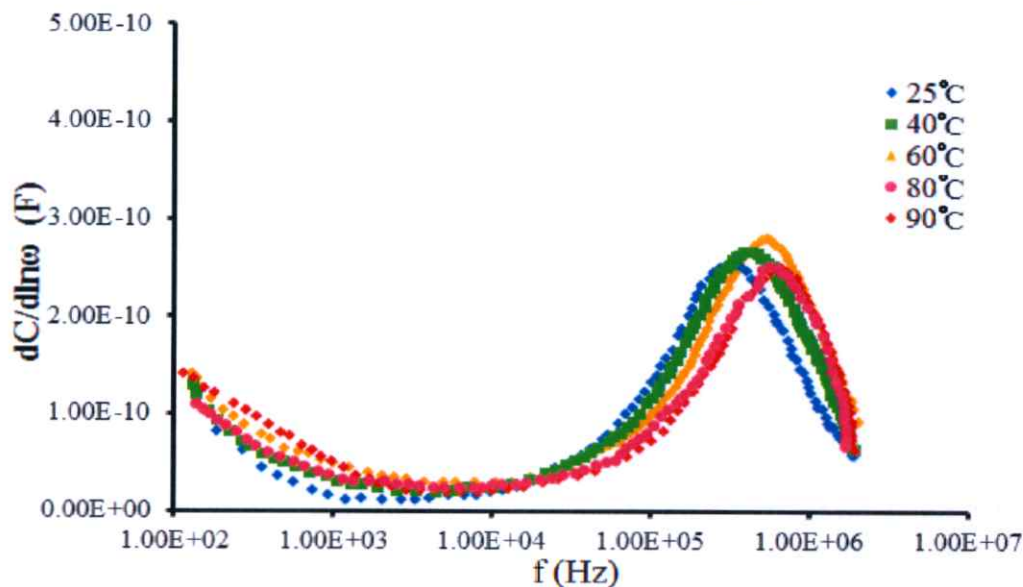
รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $D_{it}$  กับ  $E_C - E_T$  ที่ได้จากการหา  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



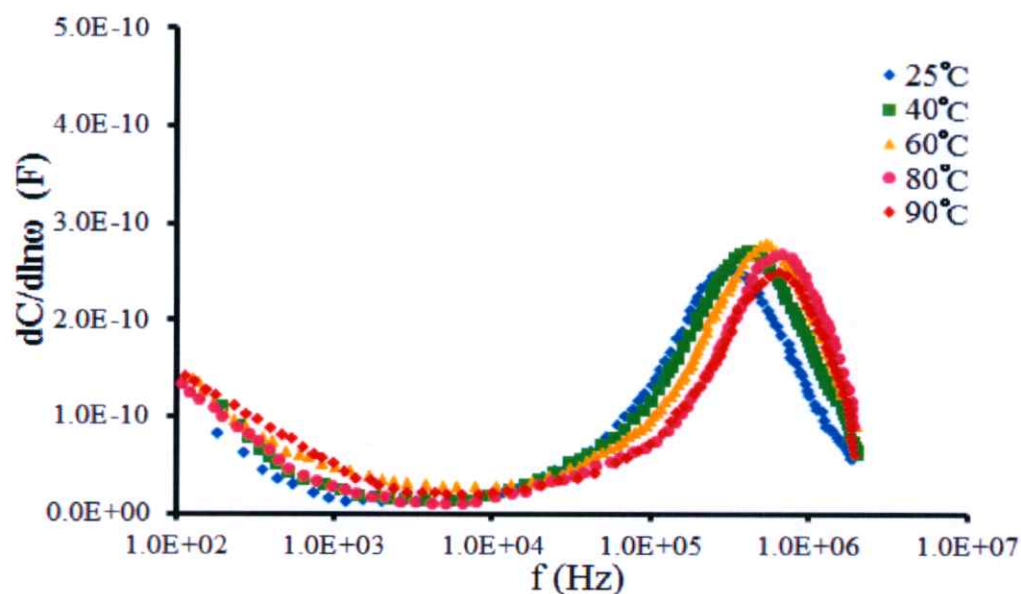
รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



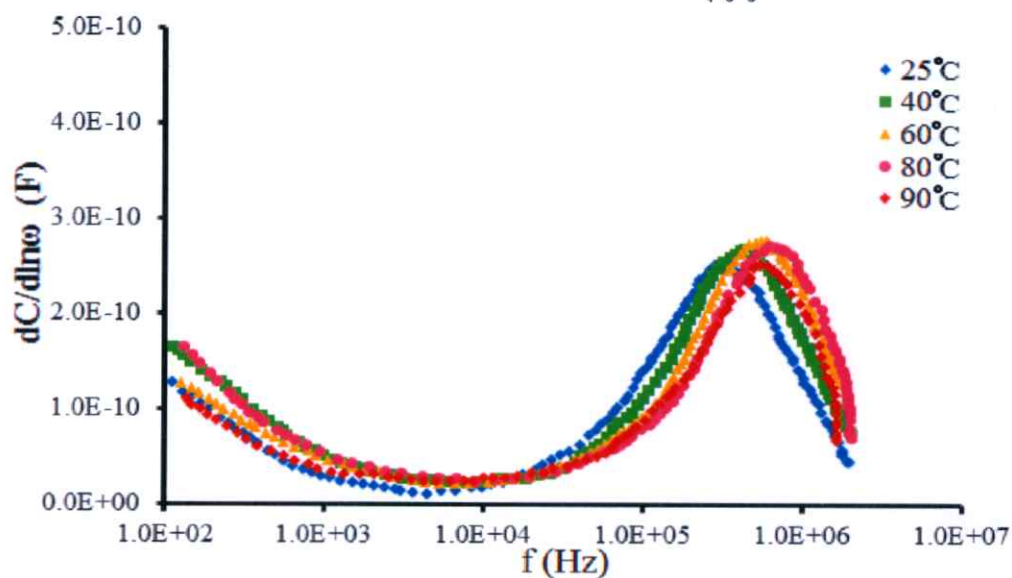
รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า -0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



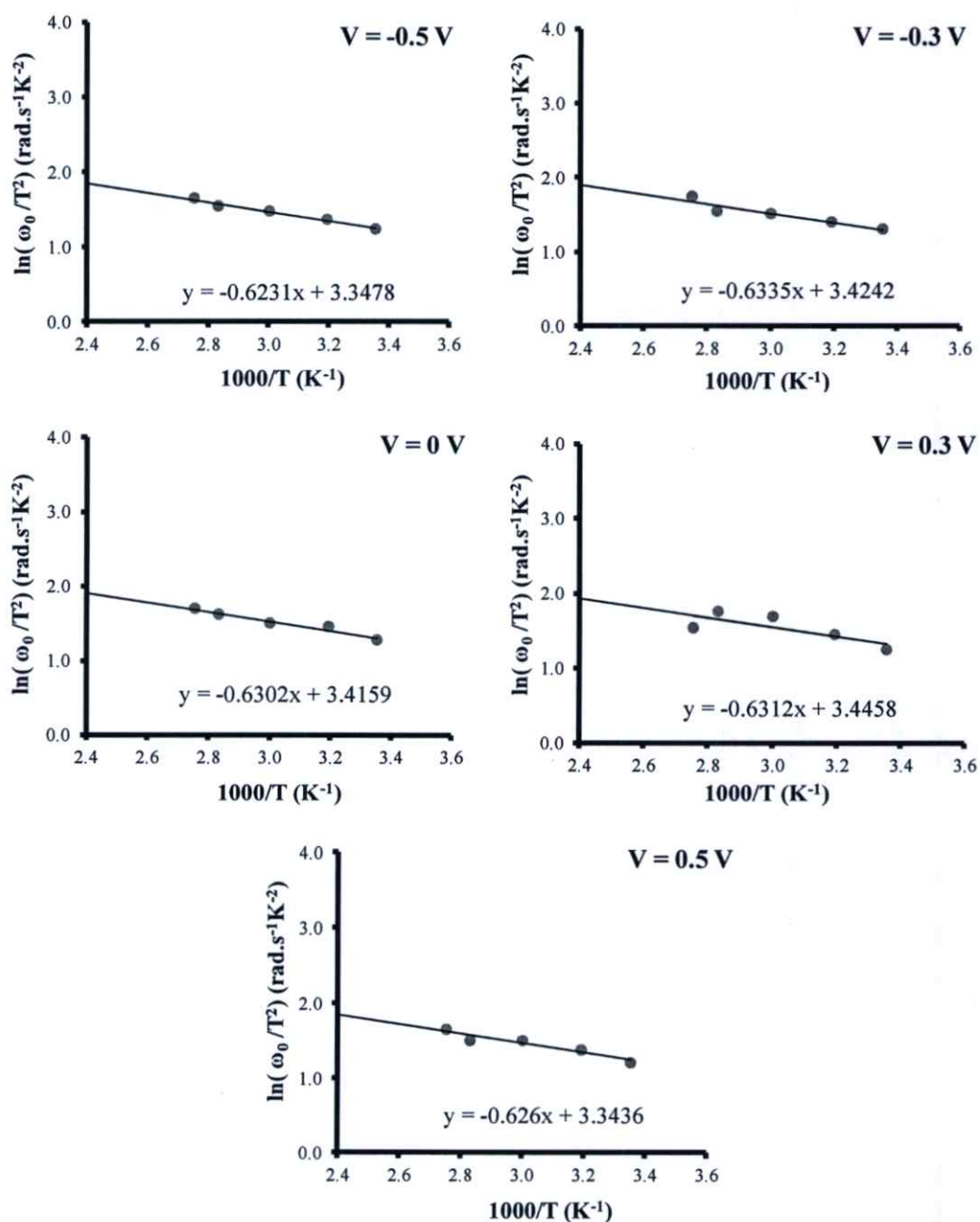
รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.3 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 0.5 โวลต์และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหา  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของ  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่ออวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

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

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.37)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.38ก.)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการที่ (4.38ก.) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.38ข.)$$

จุดตัดแกน y นั้นคือค่า  $\ln\xi_0$  แล้วจะสามารถหา  $\xi_0$  ได้ และสามารถหาค่า  $\sigma_T$  ได้จากสมการความสัมพันธ์

$$\xi_0 = 2\sigma_T v_{th} N_c$$

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_c} \quad (4.39)$$

เมื่อ  $\xi_0$  คือ พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน  $\sigma_T$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยอิเล็กตรอนของกับดักประจุ

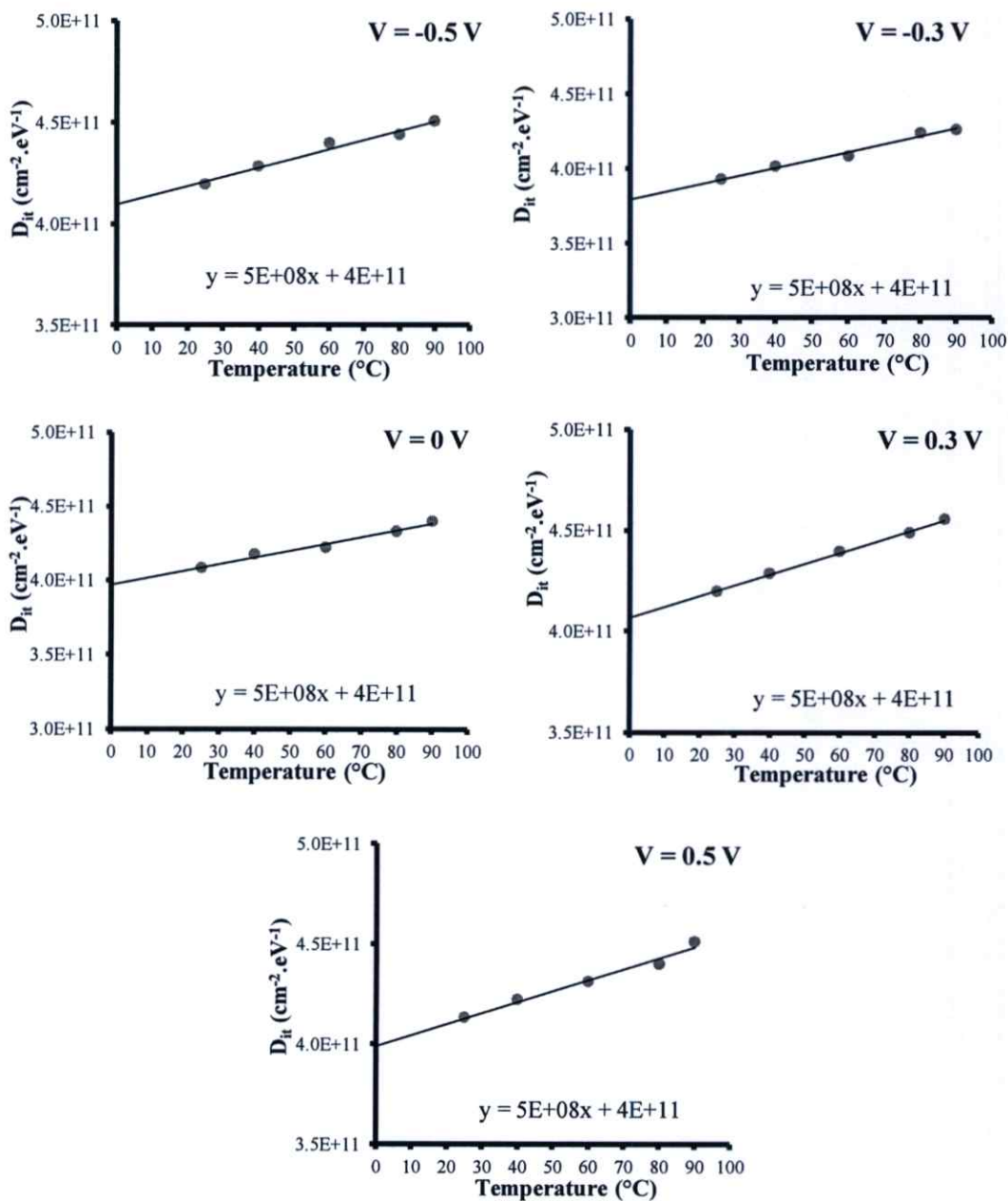
ค่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $1,000/T$  ซึ่ง  $\omega_0$  สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น และ  $\sigma_T$  มีค่าใกล้เคียงกันดังที่แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่ และจากกราฟความสัมพันธ์ของ  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ ค่าความหนาแน่นของสถานะผิว เชื่อมต่อ ( $D_{it}$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่ จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส

Bias Voltage (V)	T (°C)	$G/\omega$ -f				$(dC/d\ln\omega)$ -f				$D_{it}(\text{cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1})$	
		$\omega_0$ (Hz)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ ( $\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$ )	$\sigma_T$ ( $\text{cm}^2$ )	$\omega_0$ (Hz)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ ( $\text{s}^{-1}\text{K}^{-2}$ )	$\sigma_T$ ( $\text{cm}^2$ )	$G/\omega$ -f	$(dC/d\ln)-f$
-0.5	25	3.38E+05	0.038	16.265	4.51E-16	3.09E+05	0.055	28.440	7.90E-16	4.19E+11	4.20E+11
	40	3.98E+05				4.38E+05				4.20E+11	4.29E+11
	60	5.37E+05				4.98E+05				4.25E+11	4.40E+11
	80	5.97E+05				5.47E+05				4.30E+11	4.44E+11
	90	6.47E+05				5.57E+05				4.44E+11	4.51E+11
-0.3	25	3.09E+05	0.037	14.454	4.02E-16	3.28E+05	0.054	30.698	8.53E-16	4.20E+11	3.93E+11
	40	3.98E+05				3.98E+05				4.25E+11	4.02E+11
	60	4.18E+05				5.08E+05				4.32E+11	4.08E+11
	80	5.47E+05				5.57E+05				4.44E+11	4.24E+11
	90	6.37E+05				6.37E+05				4.48E+11	4.26E+11
0	25	3.18E+05	0.036	15.815	4.39E-16	2.18E+05	0.053	30.444	8.46E-16	4.09E+11	4.08E+11
	40	3.98E+05				4.18E+05				4.12E+11	4.17E+11
	60	5.08E+05				5.97E+05				4.13E+11	4.22E+11
	80	6.07E+05				6.27E+05				4.20E+11	4.33E+11
	90	6.47E+05				7.16E+05				4.28E+11	4.40E+11
0.3	25	3.09E+05	0.035	14.081	3.91E-16	3.09E+05	0.052	31.368	8.71E-16	3.99E+11	4.20E+11
	40	4.08E+05				4.18E+05				4.28E+11	4.29E+11
	60	4.88E+05				5.97E+05				4.30E+11	4.40E+11
	80	5.37E+05				6.17E+05				4.40E+11	4.49E+11
	90	6.17E+05				7.16E+05				4.41E+11	4.55E+11
0.5	25	3.09E+05	0.034	15.034	4.18E-16	2.99E+05	0.051	28.321	7.87E-16	4.32E+11	4.13E+11
	40	3.98E+05				3.88E+05				4.34E+11	4.22E+11
	60	5.08E+05				4.98E+05				4.37E+11	4.31E+11
	80	5.37E+05				5.57E+05				4.39E+11	4.40E+11
	90	6.17E+05				6.37E+05				4.41E+11	4.51E+11

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าจำนวนจริง และค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

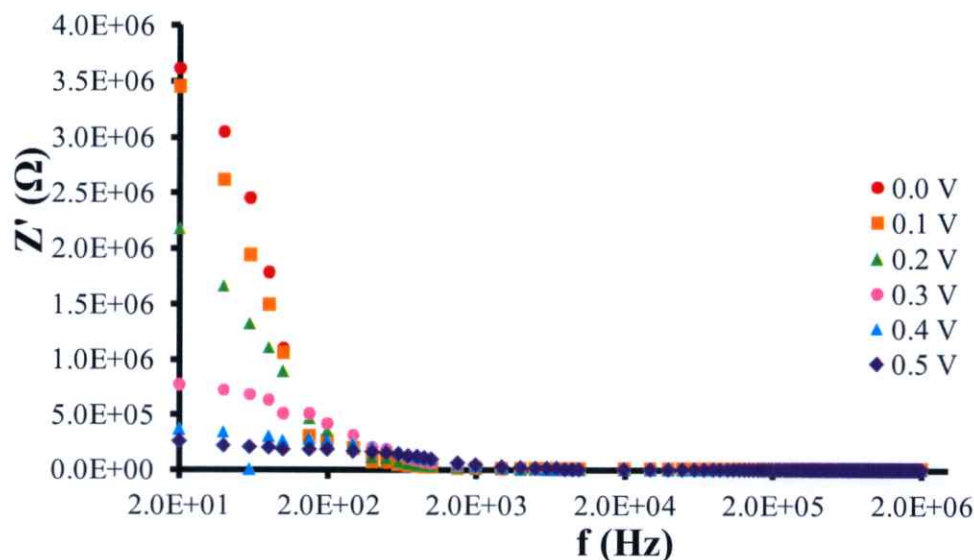
Bias Voltage (V)	T (°C)	Z'-Z''			
		$\omega_0$ (Hz)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ ( $s^{-1}K^{-2}$ )	$\sigma_t$ ( $cm^2$ )
0	25	17.30	0.0489	743.370	2.06E-14
	40	21.79			
	60	30.06			
	80	31.95			
	90	33.83			



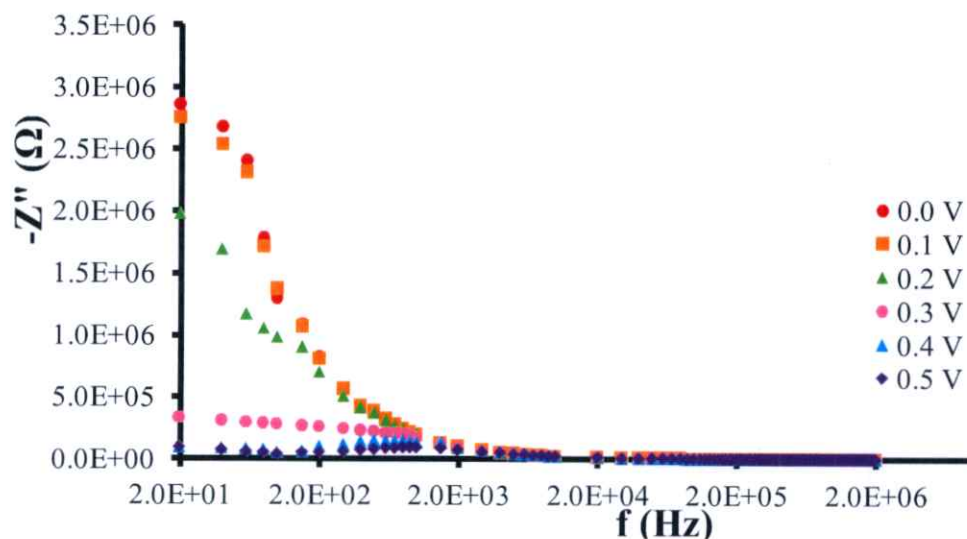
รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $D_{it}$  กับ อุณหภูมิที่ได้จากการหา  $\omega_0$  ของกราฟ ความสัมพันธ์ของ  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่ออวิจรันท์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25–90 องศาเซลเซียสและทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์–2 เมกะเฮิรตซ์ ของรอยต่ออิวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

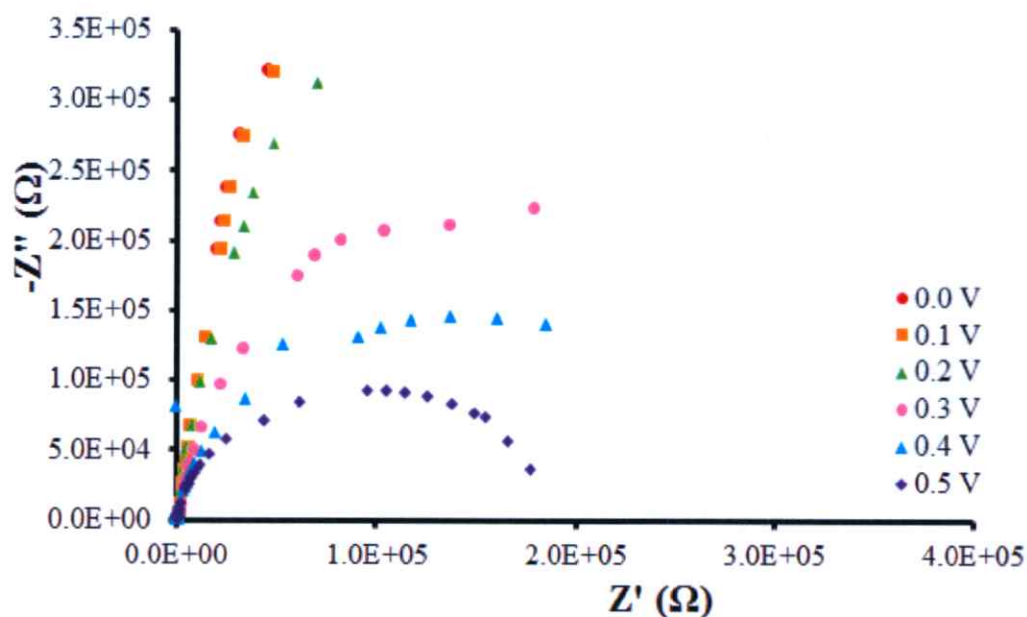
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่ทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยในรูปที่ 4.66 ได้แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนจริงของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยในช่วงความถี่ต่ำๆ จะเป็นช่วงที่จำนวนจริงของอิมพีแดนซ์มีค่าสูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.67 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ โดยในช่วงความถี่ต่ำๆจะเป็นช่วงที่จำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์มีค่าสูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ จะเขียนได้เพียงส่วนหนึ่งของกราฟครึ่งวงกลมเท่านั้น และที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าสูงๆ จะได้กราฟเป็นรูปครึ่งวงกลมดังที่แสดงในรูปที่ 4.68 จึงมีความจำเป็นในการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจากผลการทดลองที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่จำเป็นต่อการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



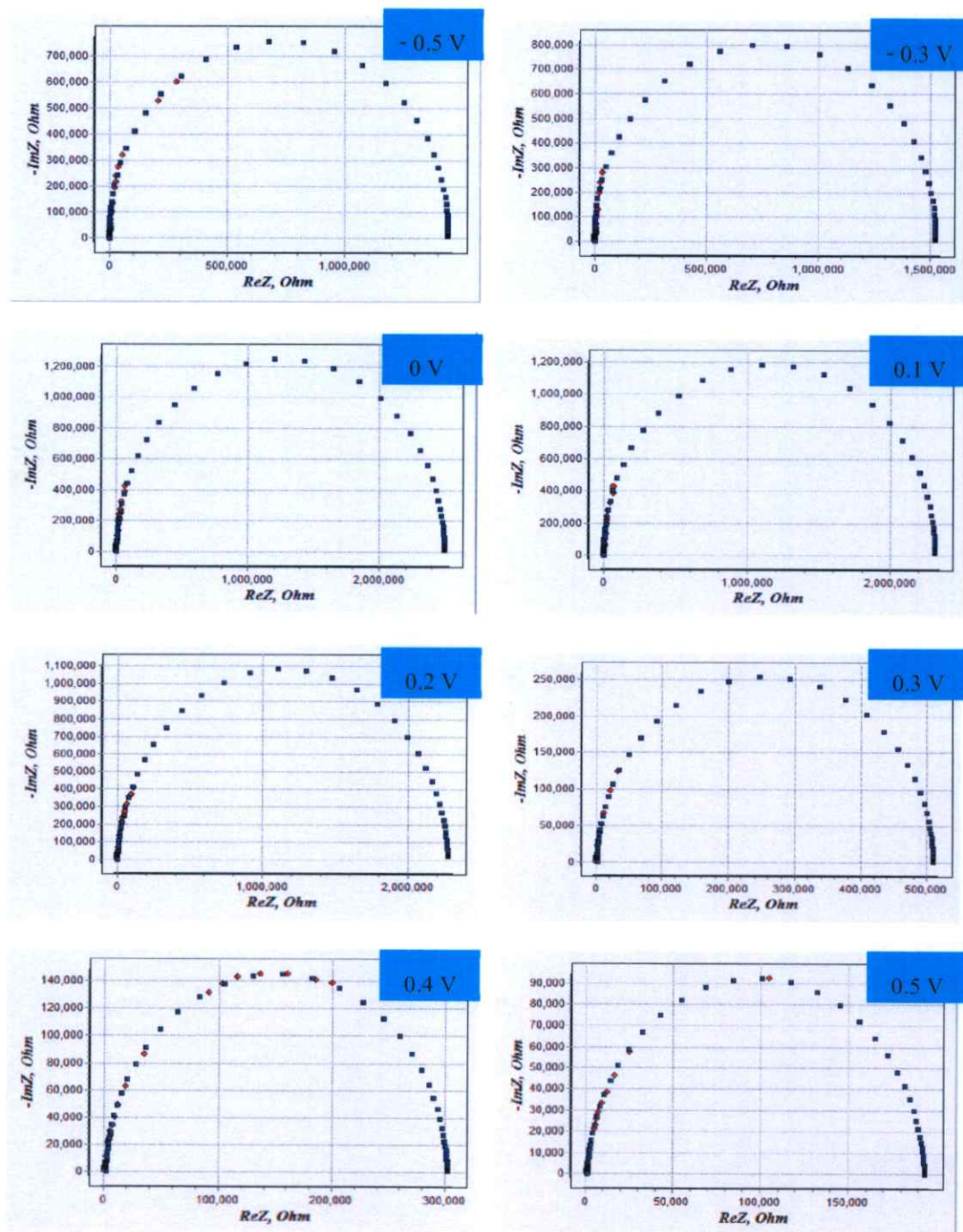
รูปที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่แรงดันไบแอสไปหน้าค่าต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสไปหน้าในช่วง 0 – 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



**รูปที่ 4.69** แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

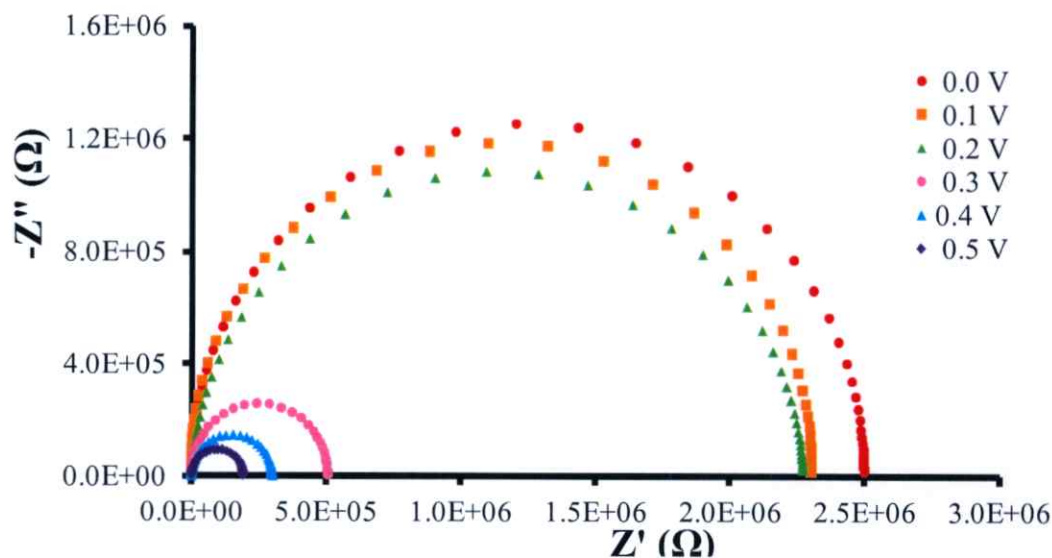
ในรูปที่ 4.69 ได้แสดงแบบจำลองของกราฟ โคล-โคล พล็อต (Cole-Cole plot) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก โดยจะขึ้นกับสมการ

$$\left[ Z' - \left( R_s + \frac{R_p}{2} \right) \right]^2 + [Z'']^2 = \left( \frac{R_p}{2} \right)^2 \quad (4.40)$$

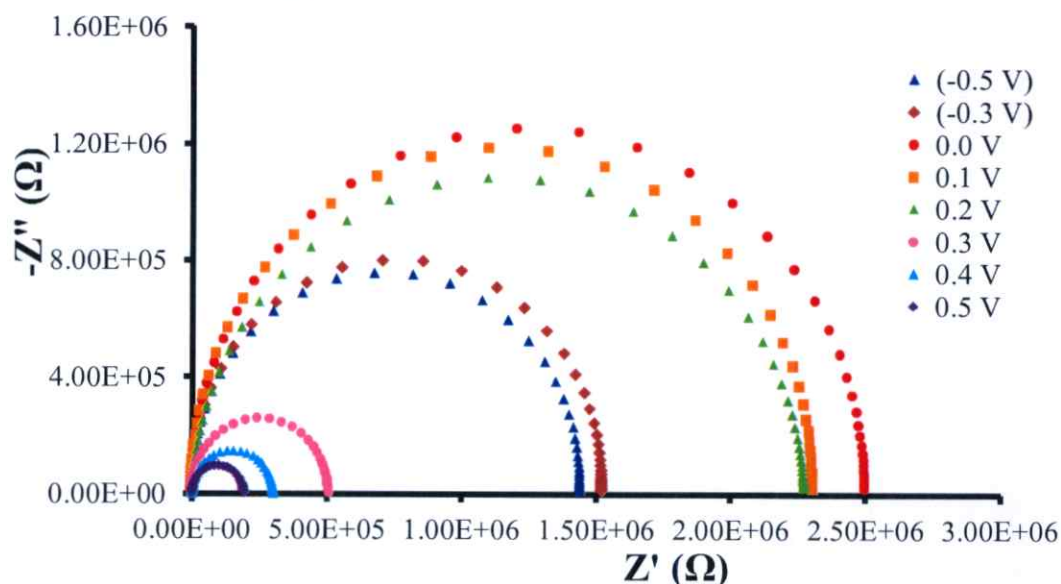
ก็จะสามารถหาค่าความจุของรอยต่อแล้วนอกจากนี้ยังหาค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดได้จากกราฟที่ได้จากการจำลองแบบนี้อีกด้วย และเมื่อนำกราฟที่ได้จากการจำลองแบบมาพล็อตรวมกันตามรูปที่ 4.70 และรูปที่ 4.71 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่อแรงดันไบแอสไปหน้าสูงขึ้น เนื่องจากขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปหน้าให้กับไดโอดแล้วไดโอดจะนำกระแสได้มากขึ้นตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้ความต้านทานของไดโอดลดลง ดังนั้นทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจึงลดลง สำหรับกรณีป้อนแรงดันไบแอสกลับทางให้กับไดโอดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนไม่ได้เพิ่มขึ้นมากนัก เนื่องจากแรงดันไบแอสกลับทางไดโอดมีกระแสรั่วมาก จึงทำให้ความต้านทานของไดโอดไม่เพิ่มขึ้นมากนัก และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าเช่นกัน ส่วนในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะได้จากสมการ

$$C_p = \frac{(PR_p)^{1/n}}{R_p} \quad (4.41)$$

ช่วงชีวิตของพาหะจะหาได้จากสมการ  $\tau = R_p C_p$  และความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์สูงสุดจะมีค่าเท่ากับ  $2\pi f_{\max}$



รูปที่ 4.70 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอสไปหน้า 0 – 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

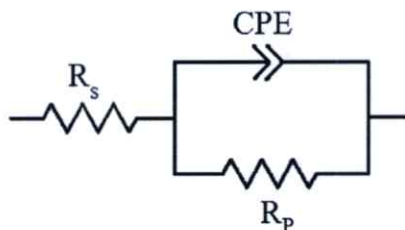


รูปที่ 4.71 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไบแอส -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.9 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่ แรงดัน ไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและทำการวัดที่ ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Bias Voltage (V)	Extracted Parameters							
	$R_s$	CPE			$C_p$	$\tau$	$f_{(max)}$	$\omega\tau$
		$R_p$	$P_1$	$n$				
-0.5	1.45E+03	1.44E+06	8.13E-07	1.003	1.26E-06	1.81E+00	0.088	1.000
-0.3	1.50E+03	1.52E+06	7.80E-07	0.999	1.22E-06	1.86E+00	0.086	1.000
0.0	2.00E+03	2.50E+06	3.80E-07	1.000	3.79E-07	9.49E-01	0.168	1.000
0.1	1.90E+03	2.31E+06	5.00E-07	0.985	4.01E-07	9.24E-01	0.172	1.000
0.2	1.80E+03	2.17E+06	6.00E-07	0.975	4.16E-07	9.03E-01	0.176	1.000
0.3	1.75E+03	5.07E+05	6.20E-07	1.000	6.19E-07	3.14E-01	0.507	1.000
0.4	1.60E+03	3.00E+05	7.00E-07	0.992	6.25E-07	1.87E-01	0.850	0.999
0.5	9.00E+02	1.93E+05	7.70E-07	0.990	6.68E-07	1.29E-01	1.235	1.000

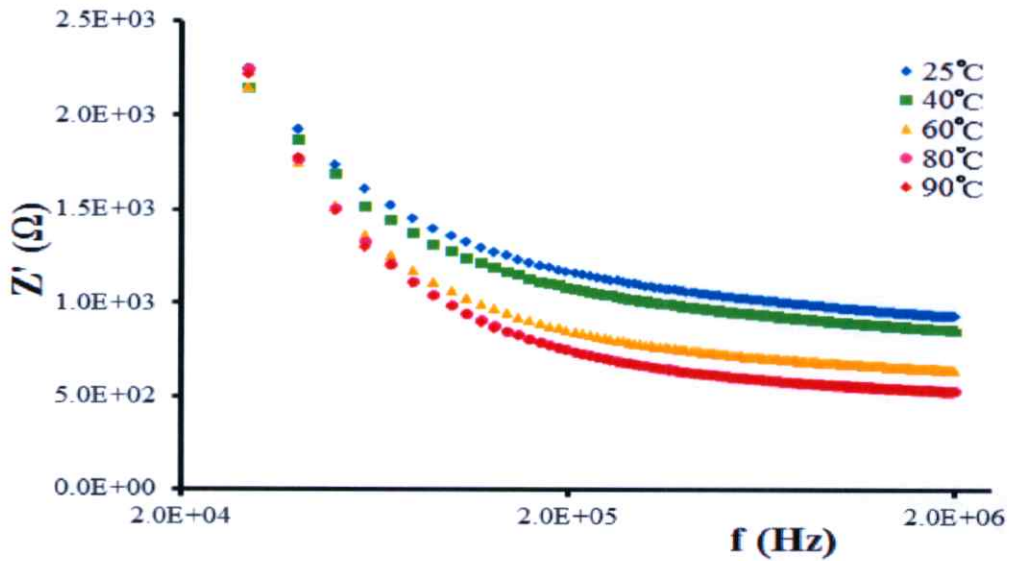
จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่า  $R_s$  และ  $R_p$  มีค่าลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ เมื่อ  $R_p$  ลดลงแล้ว  $\tau$  ( $\tau=R_p C$ ) จะมีค่าลดลงจึงส่งผลให้ค่าความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) มีค่าสูงขึ้น



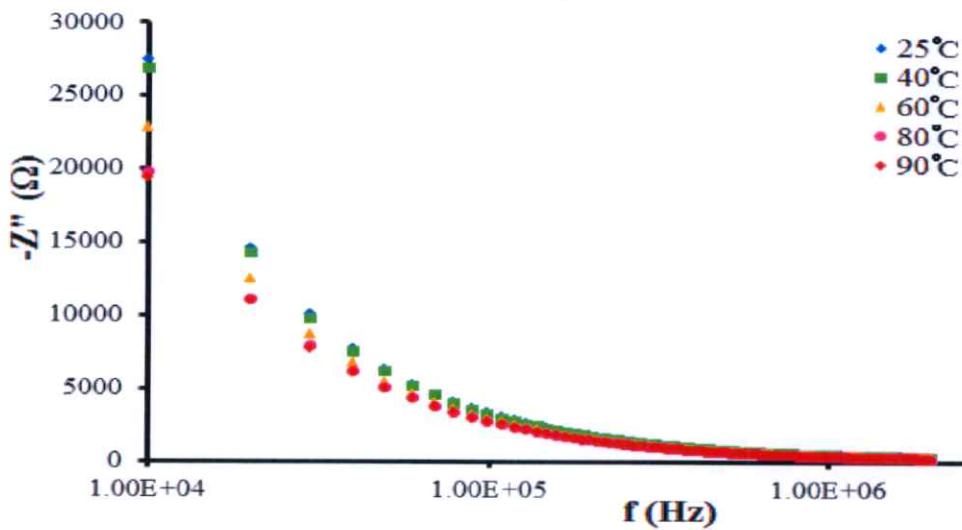
**รูปที่ 4.72** วงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ รวมทั้งเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลของการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่ทำกรวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยในรูปที่ 4.73 ได้แสดงความสัมพันธ์ของส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ ในช่วงความถี่ต่ำ จะเป็นช่วงที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และในส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์นั้นจะไม่สามารถพบจุดสูงสุดของค่าจินตภาพได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นเพียงส่วนที่เป็นกราฟทางลาดลงเท่านั้นแสดงในรูปที่ 4.74

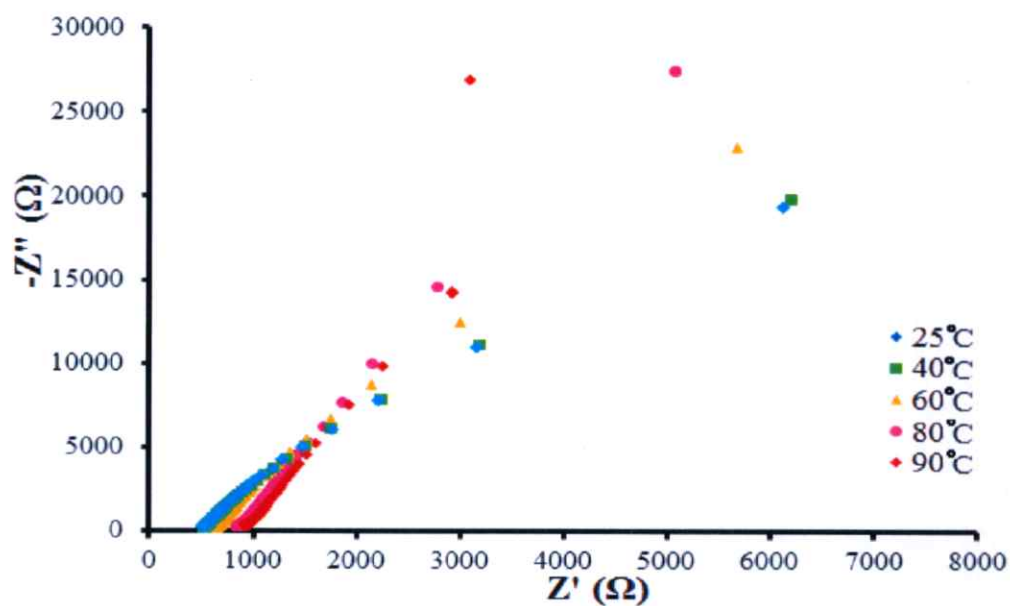
และเมื่อทำการเขียนกราฟของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ แล้วจะเขียนได้เพียงส่วนหนึ่งของกราฟครึ่งวงกลมเท่านั้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.75 จึงมีความจำเป็นในการจำลองค่าของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจากผลการทดลองที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่จำเป็นต่อการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



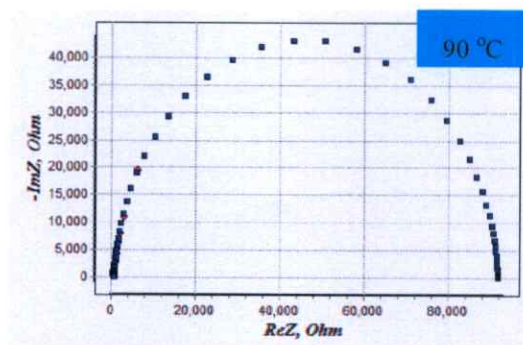
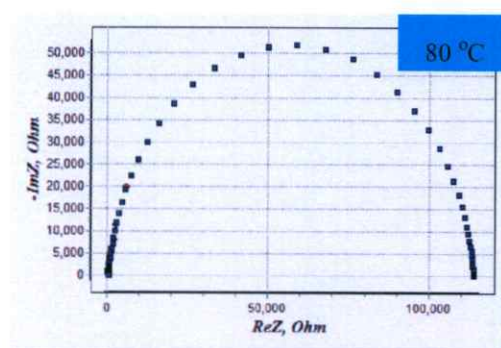
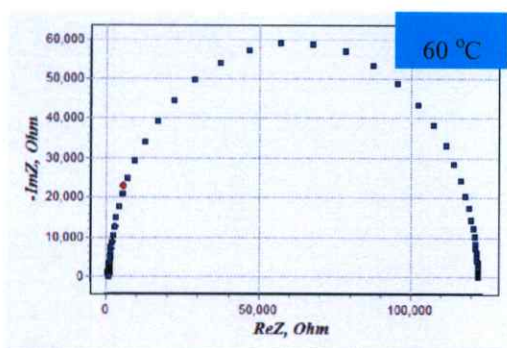
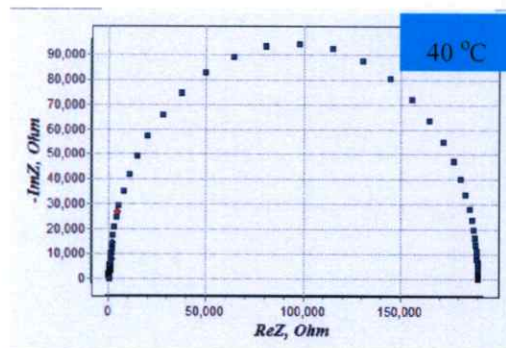
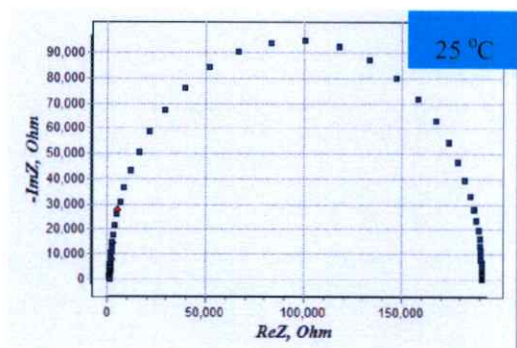
รูปที่ 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

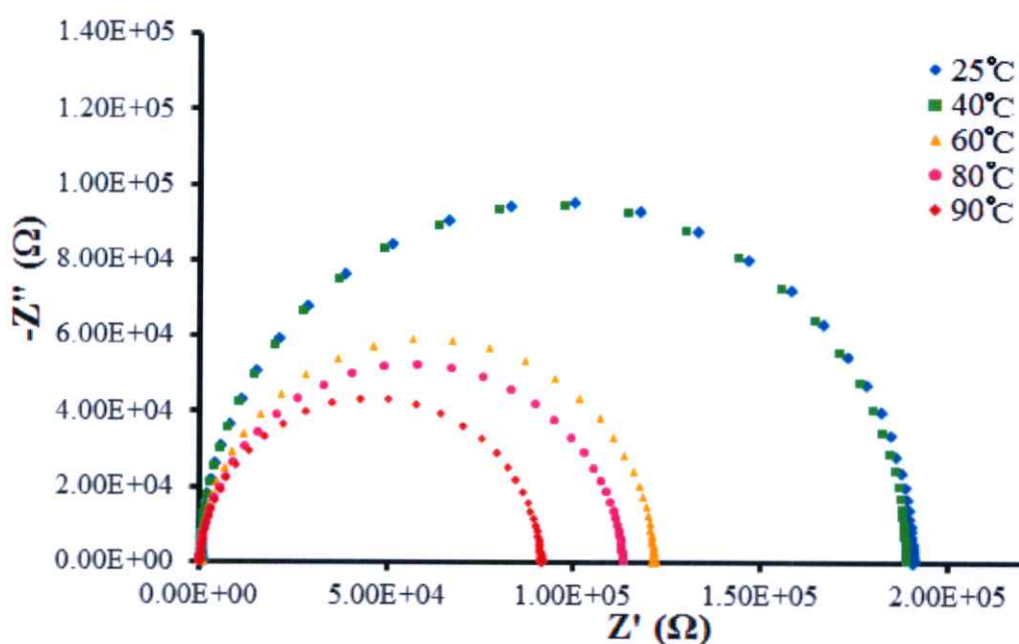


รูปที่ 4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.76 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

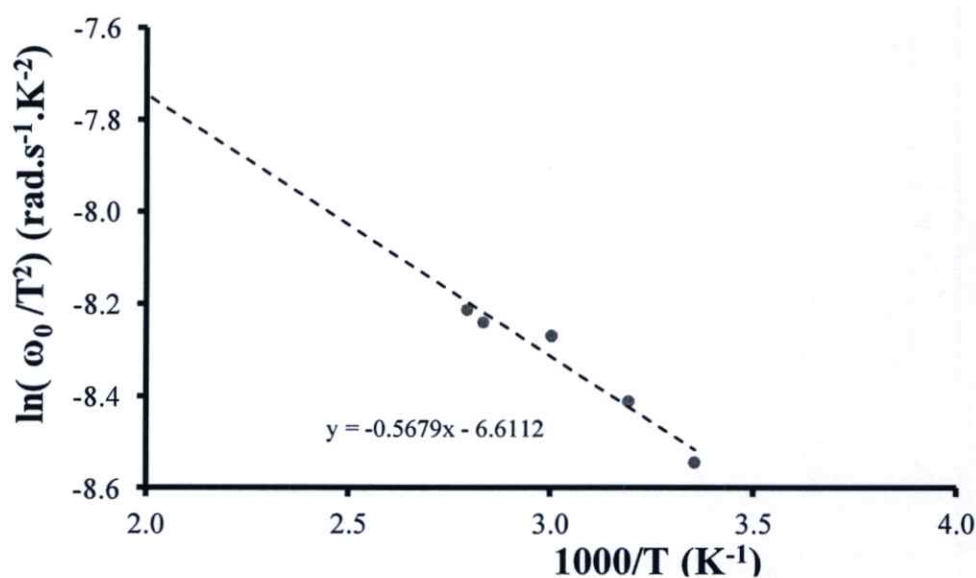
ในรูปที่ 4.76 ได้แสดงแบบจำลองของกราฟ โคล-โคล (Cole-Cole plot) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก และเมื่อนำกราฟที่ได้จากการจำลองค่ามาพล็อตรวมกันตามรูปที่ 4.77 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน



รูปที่ 4.77 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียสและที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.10 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากความสัมพันธ์  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $1000/T$  ของค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

T (°C)	T (K)	$\omega_0$	$(\omega_0/T)^2$	$\ln(\omega_0/T^2)$	1000/T(K)	$E_a$ (eV)
25	298.0	17.29	1.95E-04	-8.54	3.35	0.049
40	313.0	21.78	2.22E-04	-8.41	3.19	
60	333.0	30.05	2.71E-04	-8.26	3.00	
80	353.0	31.94	2.56E-04	-8.23	2.83	
85	358.0	33.82	2.64E-04	-8.21	2.79	



รูปที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหา  $\omega_0$  ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เรายังสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ตามสมการที่ (4.38ก.) และสมการ (4.38ข.) ตามที่เคยเสนอไปในหัวข้อที่แล้ว และเมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากวิธีการต่างๆ มาสรุปตามตารางที่ 4.11 จะพบว่าค่าที่ได้จากการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนนั้นมีความคลาดเคลื่อนมากทั้งนี้มีส่วนมาจากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนนั่นเอง โดยค่าของความถี่ที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นควรจะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าแต่ด้วยในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีสัญญาณรบกวนอยู่มากจึงทำให้สามารถทำการวัดได้เพียงบางส่วนของกราฟอิมพีแดนซ์เท่านั้น โดยสัญญาณรบกวนดังกล่าวนี้ อาจเกิดจากกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีค่ามากกว่าหนึ่งชนิดที่สามารถตอบสนองได้ในช่วงความถี่ต่างๆ จึงส่งผลให้เกิดความไม่คงที่และความไม่ต่อเนื่องกันของข้อมูลที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะในช่วงบริเวณความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ ไปจนถึงช่วง 100 เฮิร์ตซ์นั่นเอง

**ตารางที่ 4.11** แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และที่ความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Temperature (°C)	Extracted Parameters							
	$R_s$	CPE			$C_p$	$\tau$	$f_{(max)}$	$\omega\tau$
		$R_p$	$P_l$	$n$				
25	1.00E+03	1.90E+05	2.91E-07	1.000	2.91E-07	5.52E-02	2.754	0.955
40	9.80E+02	1.89E+05	2.99E-07	1.000	2.98E-07	5.62E-02	2.754	0.973
60	8.00E+02	1.21E+05	3.11E-07	0.985	2.48E-07	3.00E-02	4.786	0.902
80	7.00E+02	1.13E+05	3.46E-07	0.991	3.02E-07	3.41E-02	4.786	1.026
85	6.50E+02	9.11E+04	3.70E-07	0.991	3.23E-07	2.94E-02	5.386	0.995

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำ ( $N_C$ ) ของ CdS สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_C = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.42)$$

$$= 4.83 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left( \frac{m_e^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ ( $m_e^*$ ) ของ CdS มีค่าเท่ากับ  $0.165m_0$  [32] ดังนั้น  $N_C$  ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้คือ

$$N_C = (4.83 \times 10^{15}) (300)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{0.165m_0}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 1.68 \times 10^{18} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า (C-V measurement) พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำของ CdS มีค่าเท่ากับ  $2.54 \times 10^{14}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับระดับเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_C - E_F = kT \ln \left( \frac{N_C}{N_d} \right) \quad (4.43)$$

$$= (0.0258) \ln \left( \frac{1.68 \times 10^{18}}{2.54 \times 10^{14}} \right)$$

$$= 0.227 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ( $N_V$ ) ของ CuO คือ

$$N_V = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.44)$$

$$= 4.83 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left( \frac{m_h^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์ของ CuO ( $m_h^*$ ) มีค่าเท่ากับ  $7.90m_0$  [33] ดังนั้น  $N_V$  ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned} N_V &= (4.83 \times 10^{15})(300)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{7.90m_0}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \\ &= 5.57 \times 10^{20} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า (C-V measurement) พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของ CuO มีค่าเท่ากับ  $1.00 \times 10^{18}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_F - E_V &= kT \ln \left( \frac{N_V}{N_a} \right) \quad (4.45) \\ &= (0.0258) \ln \left( \frac{5.57 \times 10^{20}}{1 \times 10^{18}} \right) \\ &= 0.163 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \end{aligned}$$

ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของ CdS และ CuO มีค่าเท่ากับ 4.20 และ 4.07 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ[34] ส่วนช่องว่างและแถบพลังงานของ CdS และ CuO มีค่าเท่ากับ 2.40 และ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ค่าออฟเซต (offset) ของแถบนำ ( $\Delta E_C$ ) และค่าออฟเซตของแถบนำวาเลนซ์ ( $\Delta E_V$ ) ของโครงสร้างแถบ พลังงานของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ n-CdS/p-CuO สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้คือ[35]

$$\begin{aligned} \Delta E_C &= \chi(\text{CdS}) - \chi(\text{CuO}) \quad (4.46) \\ &= 4.20 - 4.07 = 0.13 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} \Delta E_V &= E_g(\text{CdS}) - E_g(\text{CuO}) - \Delta E_C \quad (4.47) \\ &= 2.40 - 1.35 - 0.13 = 0.92 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \end{aligned}$$

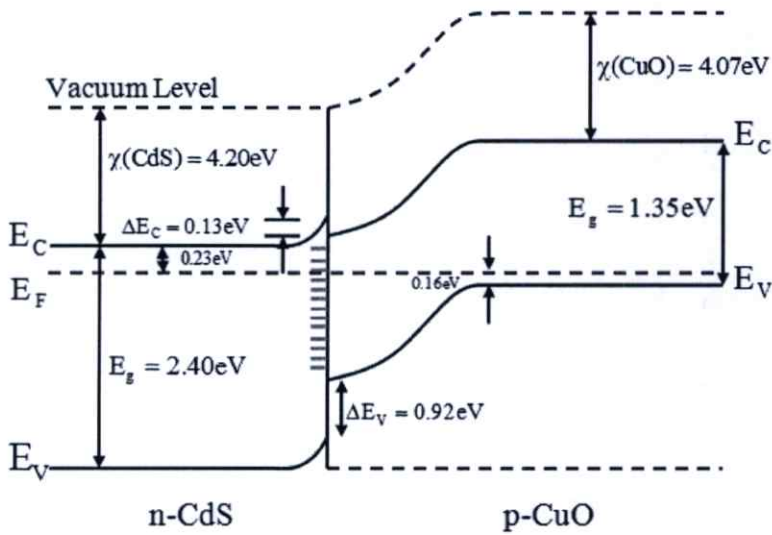
โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ n-CdS/p-CuO แสดงได้ในรูปที่ 4.79

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ (built-in-potential) สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

$$qV_{bi} = \chi(\text{CdS}) - \chi(\text{CuO}) + E_g(\text{CuO}) - (qV_n + qV_p) \quad (4.48)$$

$$= 4.20 - 4.07 + 1.35 - (0.23 + 0.16) = 1.09 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}$$

ซึ่งค่า  $V_{bi}$  นี้สอดคล้องกับแรงดันทำงาน (working voltage) หรือ เทิร์นออน (turn on voltage) ของกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีค่าประมาณ 1 โวลต์



รูปที่ 4.79 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิหพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัย การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง และรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผล พร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

#### ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีผิวหน้าที่เรียบสะท้อนแสงได้ดี ยึดติดแน่นดีกับแผ่นฐานรองรับและมีสีเหลืองส้มโปร่งแสง

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ผลปรากฏพบพีคการเลี้ยวเบนเด่นชัดที่สุด ที่มุม  $2\theta = 26.54$  องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าเป็นระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะสภาพผิวหน้าฟิล์มบางจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนิลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนกล่าวคือทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นตามอุณหภูมิแอนนิลที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศา

เซลล์ซีสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ผลปรากฏว่ามีการส่งผ่านแสงประมาณ 60 – 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิแอนนียลมีค่าสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิแอนนียล 300 องศาเซลเซียสจะมีการลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงาน

#### รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ได้นั้นเป็นสีดำ และทำการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกจะเห็นว่าฟิล์มบางสีเหลืองส้มเคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิก สุดท้ายจะได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่ามีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม  $2\theta \approx 26.50$  องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ส่วนพีคการเลี้ยวเบนที่เหลือสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกสารกึ่งตัวนำ CuO ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ระนาบการเลี้ยวเบนของสารกึ่งตัวนำ CuO จะปรากฏที่มุม  $2\theta \approx 32.47, 35.49, 38.68, 48.65, 53.40, 58.25, 61.45, 65.72, 66.14, 67.84, 72.32$  และ  $74.92$  องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (110), (-111), (111), (-202), (020), (202), (-113), (022), (-311), (113), (311) และ (004) ตามลำดับ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากภาพถ่าย SEM ของภาคตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีความหนาประมาณ 500 นาโนเมตรแต่ไม่สามารถเห็นขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ได้ ส่วนเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuO มีขนาดเกรนประมาณ 2 ไมโครเมตร

## สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ

20 – 300 เคลวิน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.50 โวลต์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ประมาณ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของ CuO และของ CdS อยู่ในระดับ  $10^{16}$  และ  $10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ p<sup>+</sup>-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชอตต์กีโดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.50 โวลต์พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.55 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  จะได้ค่าแพกเตอร์อุณหภูมิและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตซ์ย้อนกลับและนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแพกเตอร์อุณหภูมิและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $H(I)$  กับ  $I$  จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่อุณหภูมิ 20 เคลวินที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.17 โวลต์ (Region I) เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า

0.17 – 0.61 โวลต์ (Region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.6 โวลต์ (Region III) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มี การแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก

**ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน**

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง -5 ถึง 2 โวลต์ เมื่อใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C^2$  กับ  $V$  จุดตัดที่ได้จากกราฟคือ  $V_i$  ซึ่งสามารถนำไปหาแรงดันตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ได้ และความชันนั้นสามารถใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) พบว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และค่าความสูงของกำแพงศักย์ชนิดแถบพลังงานแบนราบจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้

**ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO**

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เราสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ซึ่งค่า  $\omega_0$  หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ  $G/\omega$  กับความถี่และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dC/d\ln\omega$  กับความถี่ โดยที่ค่าพลังงานกระตุ้นจากกราฟความสัมพันธ์ทั้งสองกรณีในแต่ละแรงดันไบแอสจะมีค่าใกล้เคียงกัน เป็นวิธีการศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้นพบว่าเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ ค่าพลังงานกระตุ้นจะลดลง และค่าความหนาแน่นของกับดักบริเวณผิวเชื่อมต่อกันจะลดลงที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ และทำการวัดที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.67 เป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอีลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น เกรน ขอบของเกรน และผิวของเซรามิกที่ไม่เรียบ เป็นต้น

## ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO ทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์อย่างมาก อาทิเช่น ต้องมีการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม รวมทั้งรวบรวมข้อมูลที่ได้ เพื่อทำความเข้าใจให้เพียงพอสำหรับทำงานวิจัย ต้องมีเวลาเอาใจใส่ในงานวิจัย มีความพยายาม และอดทนตั้งมั่นที่จะทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะงานวิจัยค่อนข้างที่ซับซ้อน และต้องอาศัยประสบการณ์ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยจะเริ่มจากการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เป็นเม็ดเซรามิกส์นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงการหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ค่าความเครียด และขนาดของเกรนจากค่า FWHM ของพีคการเลี้ยวเบน รวมทั้งโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และความสัมพันธ์ของขนาดของเกรนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอนนัล

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงหลักการหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน และความสัมพันธ์ของช่องว่างแถบพลังงานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอนนัล

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งมีกลไกการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน จากนั้นคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ อย่างเช่น แฟกเตอร์อุดมคติ, ความสูงกำแพงศักย์และความต้านทานอนุกรม และพลังงานกระตุ้นของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับความถี่ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ทำให้ทราบการหาค่าพลังงานกระตุ้น และค่าความหนาแน่นของกักบริเวณผิวเชื่อมต่อ

จากการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ทำให้ทราบการหาค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) และความต้านทานชั้น ( $R_{sh}$ )

## ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด n-CdS/p-CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ได้มีปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นในงานวิจัย และหาข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

1. ควรเช็ดทำความสะอาดระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จ เนื่องจากฟิล์มบางที่เคลือบอยู่ภายในระบบสุญญากาศจะเป็นตัวจับออกไซด์ไว้ภายใน เมื่อทิ้งระบบไว้นานย่อมส่งผลให้ชั้นออกไซด์ที่สะสมไว้หนาขึ้นทำให้ระบบสุบอากาศออกได้ช้าในการทำงานครั้งต่อไป

2. ในการเตรียมฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่ได้วางแผนงานไว้จะต้องมีกระบวนการที่ต่อเนื่องจนได้สิ่งประดิษฐ์ในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อลดผลกระทบจากสถานะผิวรอยต่อที่เกิดจากสภาพแวดล้อม

3. หัววัดความหนาของฟิล์มบางควรปรับระดับให้มีระดับเดียวกับหน้ากาะอะลูมิเนียมระเหยสารเคมีเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของความหนาของฟิล์มบางที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

4. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าต้องทำขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ โดยกาวเงินที่ใช้ใช้นั้นต้องมีคุณสมบัติในด้านความเงาที่ที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาการแพร่อย่างรวดเร็วกวของกาวเงินในเนื้อฟิล์มบาง

**ภาคผนวก**

## ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 75-1546		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated	
Cd S		2 $\theta$	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Cadmium Sulfide		26.505	100	1	1
		30.699	22	2	0
		43.969	47	2	2
		52.076	33	3	1
		54.579	5	2	2
		63.932	6	4	0
		70.468	11	3	3
		72.585	5	4	2
		80.842	10	4	2
		86.902	7	5	1
<b>Lattice :</b> Face-centered cubic <b>S.G. :</b> F-43m (216)		<b>Mol. weight =</b> 144.47 <b>Volume [CD] =</b> 197.14			
<b>a =</b> 5.82000		<b>Dx =</b> 4.868			
<b>Z =</b> 4		<b><i>l</i>/cor =</b> 14.05			
ICSD COLLECTION CODE : 031075 TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.					
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 62, page 260, (1925) : Ulrich, F., Zachariasen, W.					
<b>Radiation :</b> CuK $\alpha$ 1 <b>Lambda :</b> 1.54060		<b>Filter :</b> Not specified <b>d-sp :</b> Calculated spacings			

## ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 80-1916		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
CuO Copper Oxide		2th	I	h	k	l
		32.476	7	1	1	0
Lattice : Monoclinic		Mol. weight = 79.55		35.495	95	-1 1 1
S.G. : Cc (9)		Volume[CD]= 81.50		38.686	100	1 1 1
a = 4.69270	Bata = 99.55 Z = 4	Dx = 6.483		38.891	29	2 0 0
b = 3.42830		I/Icor = 3.88		46.193	2	-1 1 2
c = 5.13700		51.313	1	1 1 2		
a/b=1.36881		48.659	28	-2 0 2		
c/b=1.49841		53.407	10	0 2 0		
		55.642	1	0 2 1		
ICSD COLLECTION CODE : 069757		58.250	14	2 0 2		
TEMPERATURE FACTOR : ATF		61.458	18	-1 1 3		
REMARKS FROM ICSD : REM TEM Mentioned.		65.723	13	0 2 2		
		66.144	14	-3 1 1		
		67.848	8	1 1 3		
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997)		68.008	15	2 2 0		
primary refernce:		68.789	<1	-2 2 1		
*J.Phys.: Condens. Matter, volume 3 , page8173,		71.574	<1	-3 1 2		
(1983) : Koehler , B.U., Jansen, M.		72.320	6	3 1 1		
		72.864	<1	2 2 1		
		74.923	5	0 0 4		
		75.129	8	-2 2 2		
		79.634	<1	0 2 3		
Radiation : CuK $\alpha$ 1	Fitter : Not specified	80.050	2	-2 0 4		
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings					

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen Aiping, Long Hua, Li Xiangcheng, Li Yuhua, Yang Guang \* and Lu Peixiang, 2008. "Controlled growth and characteristics of single-phase  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$  films by pulsed laser deposition." **Vacuum.**, 83 : 927 – 930.
- [2] Alkoy E.M., Kellya P.J. 2005. "The structure and properties of copper oxide and copper aluminium oxide coatings prepared by pulsed magnetron sputtering of powder targets." **Vacuum.**, 79 : 221–230.
- [3] Le Chen,\* Sudhakar Shet, Houwen Tang, Heli Wang, Todd Deutsch, Yanfa Yan,\* John Turner and Mowafak Al-Jassim. 2010. "Electrochemical deposition of copper oxide nanowires for photoelectrochemical applications." **Journal of Materials Chemistry.**, 20 : 6962–6967.
- [4] Siripala, W. et. Al. 1995. "Spectral responses of electrodeposited cuprous oxide thin film electrodes" **J. Nath. Sci.**, 23(1) : 49 – 54.
- [5] Ezenwa I.A. et. Al. 2012. "Optical Analysis of Chemical bath Fabricated  $\text{CuO}$  Thin Films." **Research Journal of Recent Sciences.**, 1(1) : 46-50.
- [6] Poulston S., Parlett P. M., Stone P. and Bowker M., 1996. "Surface Oxidation and Reduction of  $\text{CuO}$  and  $\text{Cu}_2\text{O}$  Studied Using XPS and XAES." **SURFACE AND INTERFACE ANALYSIS.**, 24 : 811-820.
- [7] Matsuzaki Kosuke., Nomura Kenji., Yanagi Hiroshi., Kamiya Toshio., and Masahiro Hirano, 2008. "Epitaxial growth of high mobility  $\text{Cu}_2\text{O}$  thin films and application to pchannel thin film transistor." **Appl. Phys. Lett.**, 93 : 202107.
- [8] Jeong SeongHo. et. al. 2010. "Thin zinc oxide and cuprous oxide films for photovoltaic applications." **J. Appl. Phys.**, 56 : 3601.
- [9] Satischandra, B. et. al. 2005. "Thin films and Heterostructures for oxide electronics." **Springer** 10 : 303 - 307.
- [10] Chavez,H., Jordan M. , McClure J.C. , Lush G. and Singn V.P. , 1997. Physical and Electrical Characterization of  $\text{CdS}$  Films Deposition by Vacuum Evaporation , Solution Growth and Spray Pyrolysis , **J.Master.Sci : Matter Elec** , 8 : 151-154.

- [11] Nicollian E.H. And Brews J.R. **MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology**. New York : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 1982.
- [12] Schroder D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 1990.
- [13] Sze S.M. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 2nd ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2002.
- [14] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2005.
- [15] ฐิตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [16] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [17] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริภักดิ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [18] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [19] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

- [20] จิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ฉัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การพัฒนา  
ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ  
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [21] จิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ฉัฐพร พรหมรส “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดย  
วิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์  
แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [22] จิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก  
ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์”  
รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง. 2549.
- [23] จิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $\text{CuAlO}_2$   
เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [24] ปกรณ์ สิทธิเชตรกรรม. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียม  
ได้จากกระบวนการซีดีในแซน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [25] สุกฤษฎ์ เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสง  
อาทิตย์ CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [26] จิตติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่เตรียมโดย  
เทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิต  
วิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [27] อดุลย์ หาญวังม่วง. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสาร  
ในระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิต  
วิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

- [28] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [29] ไกรศักดิ์ ชื่นยั้ง “การศึกษาข้อสัมผัสโอห์มิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [30] สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นชนิดกึ่งไดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [31] Kordoš, P., Stoklas, R., Gregušová, D., Gaží, Š., and Novák, J., “Trapping effects in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn/ GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistor investigated by temperature dependent conductance measurements” **Applied Physics Letters**. vol.96 . 2010. pp. 013505-1 – 013505-3.
- [32] Abrikosov N.Kh., Bankina V.F., Poretskaya L.V., Shelimova L.E. and Skudnova E.V. Semiconducting II-VI,IV-VI, and V-VI Compounds. New York : PLENUM PRESS. 1969.[22] Ray B. **II-VI Compounds**. Oxford : PERGAMON PRESS. 1969.
- [33] Jasennek A., Rau U., Nadenau V. and Schock H.W. “Electronic Properties of CuGaSe<sub>2</sub>-Based Heterojunction Solar Cells Part II Detect Spectroscopy” **J. Appl. Phys.** vol. 87. 2000. pp. 594-602.
- [34] Barsoukov E. and Macdonald J.R. **Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application**. 2nd Ed.,John Wiley&Sons Inc. Hoboken. New Jersey. 2005.
- [35] Friesen G.,Ozsar M.E. and Dunlop E.D. “Impedance Model for CdTe Solar Cells Exhibiting Constant Phase Element Behavior” **Thin Solid Films**. vol. 361-362. 2000. pp. 303-308.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาววรรณภา จำเนียรพีช
เกิดเมื่อ	วันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2530
ภูมิลำเนา	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
การศึกษา	2553 ปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือ วิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2555 ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง